

Универзитет у Београду

Машински факултет

Александар П. Симић

**Енергетска ефикасност
речних самоходних теретних бродова**

докторска дисертација

Београд, 2012.

University of Belgrade
Faculty of Mechanical Engineering

Aleksandar P. Simić

**Energy Efficiency of Inland Waterway
Self-Propelled Cargo Vessels**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2012.

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор: Проф. др Милан Хофман, редовни професор
Машински факултет у Београду

Чланови Комисије: Проф. др Дејан Радојчић, редовни професор
Машински факултет у Београду
Проф. др Владета Чолић, редовни професор у пензији
Саобраћајни факултет у Београду

Датум одбране:

Предговор

За одређивање снаге потребне за погон различитих типова морских бродова данас постоји више поузданих метода које су развијене на основу резултата моделских испитивања или испитивања бродова у природној величини. Значај поменутих испитивања се огледа не само у формулисању метода (инжењерских алата) којима се рачунским путем може одредити потребна снага него и у томе што је кроз експерименте систематски спровођена и оптимизација форми бродова. Ово је имало за последицу да су данашњи морски бродови, у односу на бродове који су грађени у прошлости, далеко ефикаснији и то како у погледу нижих трошкова транспорта тако и у погледу очувања животне средине. Међутим, упркос чињеници да данас унутрашњим пловним путевима Европе плови више од 8000 самоходних теретних бродова, укупне носивости од скоро 10 милиона тона, не само да не постоји довољно поуздана емпиријска метода за одређивање потребне снаге, него је и расположив број експерименталних испитивања релативно скроман. Одавде је проистекла идеја о истраживању хидродинамичких појава које се односе на погон самохотки и развоју методе за процену енергетске ефикасности ових бродова.

Иако докторска дисертација представља резултат дуготрајног и посвећеног рада појединца, овога рада сигурно не би било без несебичне подршке мог дугогодишњег професора Дејана Радојчића од кога сам, у почетку кроз наставу, а касније и кроз заједнички рад на великом броју пројеката, научио такоређи све што о погону бродова знам, на чему сам му немерљиво захвалан.

Искрену захвалност осећам и према мојим професорима Милану Хофману који је увек био ту када је то било потребно и Милораду Мотоку који ме је, нарочито у време израде дисертације, подстицао и бодрио у тренуцима када бих посустао.

Велику захвалност дугујем и млађим колегама Игору Бачкалову, Милану Калајџићу и Николи Момчиловићу, али и Јасни Јововић који су ме подржавали и

који су на себе преузели велики део мојих свакодневних обавеза како бих могао да се посветим истраживању.

Без велике подршке на првом месту родитеља и сестре, али и пријатеља, који су имали пуно разумевања за мој рад и честа одсуства, привести дисертацију крају би било далеко теже, на чему сам им свима дубоко захвалан.

И на крају, најдубљу захвалност дугујем мојој Јелени која се упоредо самном носила са многим обавезама у мом „одсуству“ и нарочито у последњих годину дана, стрпљиво слушајући сваку моју дилему и трудећи се да ме охрабри, и сама научила пуно о пропулзији брода.

Београд, септембар 2012.

Александар Симић

Енергетска ефикасност речних самоходних теретних бродова

Апстракт

Дисертација је проистекла из вишегодишњег истраживања проблема погона речних самоходних теретних бродова.

Хидродинамичке појаве које су последица сложених услова у којима плове речни самоходни теретни бродови чине избор адекватног пропулзивног комплекса при пројектовању веома сложеним, али и изазовним задатком. Посебан проблем представља недостатак метода за одређивање утицаја ограничења пловног пута на хидродинамичку ефикасност. Одатле проистичу и потешкоће при одређивању укупне енергетске ефикасности бродова овог типа.

На основу свих података прикупљених из литературе до којих је било могуће доћи, али и доступних извештаја, оформљена је база са основним димензијама и резултатима мерења апсорпције снаге великог броја различитих типова речних самоходки. Формирана база је послужила као основа за истраживања хидродинамичких појава до којих долази при пловидби.

У оквиру истраживања је спроведен низ непосредних мерења апсорпције снаге на бродовима у реалним условима. Ово је омогућило проширење формиране базе, али и указало на комплексност поступка мерења из чега проистичу некада и велике разлике између расположивих резултата мерења апсорпције снаге на истом броду, али и између моделских испитивања и испитивања бродова у природној величини.

На основу резултата моделских испитивања развијен је математички модел помоћу кога се за познате димензије и носивост брода, као и ограничења пловног

пута може проценити снага коју је неопходно ангажовати у циљу постизања жељене брзине.

Анализом резултата испитивања бродова у природној величини, и поређењима са резултатима моделских испитивања, уз примену постојећих метода за одређивање ефеката спољашњих утицаја, изведене су препоруке за процену додатка за службу. Указано је на пут којим се на основу испитивања бродова у природној величини могу одредити коефицијенти пропулзије у зависности од ограничења пловног пута. Резултати до којих се дошло никако нису коначни. Будућа истраживања ће потврдити и/или унапредити неке од закључака и поставки овог рада.

На основу изведених закључака је наговештен пут којим се може одредити индекс енергетске ефикасности и успоставити референтне криве за речне самоходне теретне бродове.

Кључне речи: отпор самоходки, ограничења пловног пута, мерење момента на пропелерском вратилу, математички модел, вештачке неуронске мреже, апсорпција снаге, коефицијенти пропулзије, спољашњи утицаји, додаток за службу, индекс енергетске ефикасности

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Бродоградња

UDK 629.122:532.543(043.3)

Energy efficiency of inland waterway self-propelled cargo vessels

Abstract

This dissertation has originated from many years of research on the issue of propulsion of inland-waterway self-propelled cargo vessels (I WV).

Hydrodynamic effects stemming from complex conditions related to I WV navigation make selecting the appropriate propulsion system during the project phase a very complex and challenging task. A particularly important issue is the scarcity of methods for determining the influence of waterway restrictions on hydrodynamic efficiency. This produces difficulties when determining the overall energy efficiency of these ship types.

Based on all the data collected from the available references and reports, a database was created containing basic dimensions and results of power absorption measurements of many different types of I WV. The data served as a basis for research devoted to navigation-related hydrodynamic effects.

During the course of the research, numerous direct measurements of ship power absorption in realistic conditions were performed. This enabled the expansion of the aforementioned base, but also indicated the complexity of measurement methods, which occasionally produce considerable differences between the available results of power absorption measurements of the same ship, but also between examinations of models and corresponding full-scale I WV.

Based on the available results of model-scale examinations, a mathematical model was developed that can determine the power required for achieving the desired speed, on the basis of the known ship dimensions and displacement, as well as waterway restrictions.

The analysis of full-scale ships examinations and comparisons of model and full-scale measurements, along with the application of existing methods of determining the effects of external influences, led to the formulation of recommendations for estimating power

power margin. A method was indicated, based on the examination of full-scale ships, whereby the propulsion coefficients depending on waterway restrictions can be determined.

Resulting from the derived conclusions, a method was suggested that can determine the energy efficiency index and establish the reference curve/curves for inland waterway self-propelled cargo vessels.

Key words: ship resistance, waterway restrictions, propeller-shaft torque measurements, mathematical model, artificial neural network, power absorption, propulsion coefficients, external influences, power margin, energy efficiency design index

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Naval Architecture

UDK 629.122:532.543(043.3)

Садржај

1 Уводна разматрања	1
2 Улога самохотки у савременом транспорту	5
2.1 Транспорт робе унутрашњим пловним путевима Европе.....	5
2.2 Специфичности пловних путева Европе	10
2.3 Типови речних самохотки.....	15
3 Уопштено о погону и енергетској ефикасности самохотки	27
3.1 Класичан поступак за одређивање потребне снаге мотора	27
3.1.1 Отпор брода	28
3.1.2 Пропулзија брода	34
3.2 Значај разматрања енергетске ефикасности бродова.....	40
3.2.1 Еколошки аспект енергетске ефикасности транспорта робе пловним путевима.....	41
3.2.2 Индекс енергетске ефикасности при пројектовању – <i>EEDI</i>	43
3.2.3 Индикатор енергетске ефикасности у експлоатацији – <i>EEOI</i>	48
4 База резултата мерења апсорпције снаге речних самоходних теретних бродова	49
4.1 Анализа главних димензија самохотки.....	49
4.1.1 Дужина брода на водној линији.....	52
4.1.2 Положај тежишта истиснућа	52
4.1.3 Оквашена површина брода	53
4.1.4 Област која је покривена прикупљеним подацима	54
4.2 Прва група испитивања – Резултати прикупљени из доступних извештаја	58
4.2.1 Прелиминарна анализа поузданости резултата прве групе испитивања	59
4.3 Друга група испитивања – Резултати моделских испитивања	63
4.3.1 Прелиминарна анализа поузданости резултата друге групе испитивања	63
4.4 Трећа група испитивања – Допуна базе директним мерењима на постојећим бродовима у реалним околностима	68
4.3.1 Прелиминарна анализа поузданости резултата треће групе испитивања.....	70

5	Експериментално одређивање апсорпције снаге на бродовима у реалним условима.....	74
5.1	Мерења апсорпције снаге	75
5.1.1	Мерење броја обртаја пропелерског вратила	76
5.1.2	Мерење обртног момента на пропелерском вратилу	77
5.1.3	Опрема која је коришћена при мерењима	80
5.1.4	Калибрација мерне опреме	82
5.1.5	Припрема за мерења на броду - тестирање опреме	84
5.3	Мерење брзине брода.....	91
5.4	Остали утицаји	93
6	Математички модел.....	95
6.1	Вештачке неуронске мреже – <i>ANN</i> метода	95
6.2	Разматране концепције математичких модела	96
6.3	Математички модел базиран на моделским испитивањима	98
6.3.1	Разматрања независних променљивих.....	98
6.3.2	Разматрања конфигурације вештачке неуронске мреже	102
6.3.3	Изведени математички модел	103
6.3.4	Анализа стабилности модела и границе за примену	108
7	Анализа резултата испитивања бродова у природној величини	133
7.1	Поређење резултата испитивања бродова у природној величини са резултатима који се добијају применом усвојеног математичког модела	133
7.2	Анализа тока снаге од мотора до пропелера код морских бродова	137
7.3	Отпор речних самоходних теретних бродова	140
7.4	Повећање ефективне снаге услед деловања спољашњих утицаја.....	147
7.4.1	Утицај ограничења пловног пута.....	148
7.4.2	Утицај кормиларења	153
7.4.3	Угао курса и позиција брода у односу на ток реке	157
7.4.4	Повећање храпавости оплате и пропелера услед обраштања	158
7.4.5	Утицај ветра на отпор брода.....	165
7.4.6	Повећање отпора услед утицаја таласа	169
7.4.7	Остали утицаји	172

7.5	Додатак за службу.....	177
7.6	Хидродинамичка ефикасност пропулзивног комплекса	178
7.7	Процена вредности квази-пропулзивног коефицијента за одабране бродове....	181
7.8	Предлог поступка за одређивање коефицијената пропулзије на основу испитивања бродова у природној величини.....	184
8	Енергетска ефикасност речних самоходних теретних бродова.....	186
8.1	Предлог препорука за утврђивање критеријума неопходних за одређивање EEDI.....	186
8.2	Израчунавање индекса енергетске ефикасности – нумерички пример	187
8.2.1	Процена вредности снаге применом развијеног математичког модела....	188
8.2.2	Процена вредности снаге на основу прорачуна отпора брода	190
8.2.3	Поређење резултата.....	192
8.2.4	Процена вредности индекса енергетске ефикасности речних самоходних теретних бродова.....	193
9	Закључне напомене и смернице за будућа истраживања.....	197
9.1	Закључне напомене	197
9.2	Смернице за будућа истраживања	200
	Литература	202
	ПРИЛОГ 1 – Основне димензије речних самоходних теретних бродова који су коришћени при анализи.....	211
	ПРИЛОГ 2 – База резултата испитивања хидродинамичких карактеристика речних самоходних теретних бродова.....	216
	ПРИЛОГ 3 – Принцип рада мерне траке	232
	ПРИЛОГ 4 – Уопштено о ANN методи	240
	ПРИЛОГ 5 – Поређење резултата добијених развијеним математичким моделом са резултатима моделских испитивања	248
	ПРИЛОГ 6 – Поређења резултата добијених модификованим математичким моделом са резултатима моделских испитивања	254
	ПРИЛОГ 7 – Повећање отпора брода услед деловања спољашњих утицаја	260

Номенклатура

A_e	раширена површина пропелера	$[m^2]$
A_M	површина главног ребра	$[m^2]$
A_O	површина диска пропелера	$[m^2]$
A_R	површина листа кормила	$[m^2]$
A_{XV}	површина попречног пресека надводног дела брода	$[m^2]$
B	ширина брода	$[m]$
b	ширина пловног пута	$[m]$
b_R	висина листа кормила	$[m]$
C_a	корелациони додатак	$[-]$
C_{AA}	коэффициент отпора ветра	$[-]$
C_B	коэффициент пуноће истиснућа	$[-]$
C_D	коэффициент предате снаге	$[-]$
CF	специфични коэффициент емисије CO_2	$[t CO_2/t]$
C_F	коэффициент отпора трења	$[-]$
C_R	коэффициент преосталог отпора	$[-]$
C_T	коэффициент укупног отпора	$[-]$
C_{Th}	коэффициент потиска пропелера	$[-]$
D	печник пропелера	$[m]$
D_v	пречник вратила	$[m]$
DWT	носивост брода (дедвејт)	$[t]$
E	модул еластичности	$[GPa]$
FC	маса потрошеног горива	$[t]$
F_n	Фрудов број	$[-]$
F_{nh}	Фрудов број на бази дубине	$[-]$
G	модул клизања	$[GPa]$
g	гравитационо убрзање	$[m/s^2]$
h	дубина воде	$[m]$
i	преносни однос редуктора	$[-]$
I_P	поларни момент инерције	$[m^4]$

J	коэффицијент напредовања пропелера	[-]
k	фактор мерне траке	[-]
K_T	коэффицијент потиска пропелера	[-]
K_Q	коэффицијент обртног момента пропелера	[-]
L	дужина брода	[m]
L_{vl}	дужина брода на водној линији	[m]
L_{oa}	максимална дужина брода	[m]
LCB	положај тежишта истиснућа брода по дужини	[m]
M	момент	[kNm]
n	број обртаја пропелера у јединици времена	[o/s]
n_M	број обртаја мотора у јединици времена	[o/s]
P	корак пропелера	[m]
P_B	снага на спојници мотора	[kW]
P_D	предата снага	[kW]
P_E	ефективна снага	[kW]
P_I	индукована снага	[kW]
P_S	снага на вратилу	[kW]
P_T	снага потиска пропелера	[kW]
Q	обртни момент на вратилу	[kNm]
Q_O	обртни момент пропелера у слободној вожњи	[kNm]
R	електрични отпор	[Ω]
R_{AA}	отпор ветра	[kN]
R_C	електрични отпор калибрационог отпорника	[Ω]
R_F	отпор трења	[kN]
R_h	хидраулички радијус	[m]
R_n	Рејнолдсов број	[-]
R_R	преостали отпор	[kN]
R_T	укупни отпор брода	[kN]
R_V	вискозни отпор	[kN]
R_W	отпор таласа	[kN]
$R_{\beta\beta}$	отпор услед занешења	[kN]
$R_{\delta\delta}$	отпор услед октлона кормила	[kN]

S	оквашена површина брода	$[m^2]$
SFC	специфична потрошња горива	$[g/kWh]$
S_R	реални склиз	$[-]$
t	коэффициент смањеног потиска	$[-]$
T	газ брода	$[m]$
U_E	напон напајања мерног моста	$[V]$
U_M	излазни напон мерног моста	$[V]$
V	брзина брода	$[m/s]$
V_A	брзина дострујавања воде пропелеру	$[m/s]$
V_{ref}	референтна брзина брода	$[m/s]$
V_{WR}	релативна брзина ветра	$[m/s]$
z	број крила пропелера	$[-]$
w	коэффициент суструјања	$[-]$
α	релативни угао таласа	$[rad]$
β	угао заносења брода	$[rad]$
Δ	депласман брода	$[t]$
δ_R	угао отклона кормила	$[rad]$
ε	јединична деформација	$[-]$
η_B	ефикасност пропелера иза брода	$[-]$
η_D	коэффициент пропулзије	$[-]$
η_H	коэффициент ефикасности трупа брода	$[-]$
η_M	губици у мотору	$[-]$
η_O	ефикасност пропелера у слободној вожњи	$[-]$
η_R	коэффициент прелаза	$[-]$
η_{RED}	ефикасност редуктора	$[-]$
η_S	ефикасност вратила	$[-]$
η_T	укупна ефикасност пропулзије	$[-]$
λ_R	коэффициент виткости кормила	$[-]$
μ	Поасонов коэффициент	$[-]$
ν	кинематска вискозност воде	$[m^2/s]$
ξ_W	висина таласа	$[m]$
ρ	густина воде	$[t/m^3]$

ρ_A	густина ваздуха	[t/m ³]
Ψ_{WR}	релативни угао ветра	[rad]
∇	истиснуће брода	[m ³]

Скраћенице коришћене у раду

ANN	Artificial Neural Network
CFD	Computational Fluid Dynamics
DGPS	Differential Global Positioning System
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator
EFD	Experimental Fluid Dynamics
EIAPP	Engine International Air Pollution Prevention
GPS	Global Positioning System
IMO	International Maritime Organization
ISO	International Organization for Standardization
ITTC	International Towing Tank Conference
MCR	Maximum Continuous Rating
MEPC	Marine Environment Protection Committee

1

Уводна разматрања

Добро пројектован брод представља компромисно решење између великог броја, некада и међусобно противречних захтева. Од брода се очекује да буде довољно чврст како би издржао сва оптерећења којима је изложен у експлоатацији, а да при томе буде што лакши. Требало би да има задовољавајући стабилитет, што боље маневарске карактеристике, да троши што мање горива, итд. Уз то од брода се очекује да може да понесе што више терета како би одговорио потребама тржишта и своме власнику обезбедио што већи профит. Усклађивање споменутих захтева представља крупан инжењерски изазов. Међутим, изазов постаје још и већи уколико су околности под којима брод треба да плови неповољне, а још и променљиве, као што је то случај код речних самоходних теретних бродова.

Пловни путеви којима плове речне самоходке су ограничени кривинама, мостовима, плићацима, а некада и сужењима. Уколико се овоме додају и честе осцилације водостаја које утичу и на брзину тока реке, али и на конфигурацију

половног пута, тада изазови при пројектовању ових бродова постају још израженији.

Упркос свему, годишње се у западној Европи изгради преко 180 нових самохотки, што је условљено бројим предностима транспорта робе унутрашњим пловним путевима. Међу најзначајнијим предностима издвајају се: велика носивост, нижи трошкови транспорта, безбедност робе и људи и мање загађење животне средине у односу на остале видове транспорта. Значај речних самоходних теретних бродова и њихова улога у савременом транспорту, специфичности пловних путева и најчешћи типовима ових бродова који данас плове европским пловним путевима описани су у **Поглављу 2**.

Један од кључних задатака при пројектовању ових бродова је решавање питања погона. Када је о морским бродовима реч данас постоји велики број метода за решавање различитих проблема бродске хидродинамике везаних за погон брода. Иако су поједини проблеми у погону речних самохотки по много чему другачији у односу на морске бродове, овоме се данас недовољно посвећује пажња и ретки су стручни радови који их обрађују. При истраживању које је спроведено за потребе израде ове дисертације није пронађена одговарајућа метода за одређивање отпора/снаге речних самохотки. Осим тога, није пронађен довољно поуздан поступак за процену вредности коефицијената пропулзије при пловидби ограниченом пловним путем.

Ефикасност теретног брода, у енергетском смислу, пре свега зависи од количине терета који је могуће транспортовати, али и од снаге мотора коју је при томе потребно ангажовати. Према томе, анализа енергетске ефикасности речних самохотки, а што је и основна тема овог рада, не може се спровести без проналажења правих одговора на низ питања која се тичу пропулзије ове групе бродова. У **Поглављу 3** су рашчлањени основни проблеми које је у том смислу потребно решити. Осим тога описани су и уобичајени поступци који се примењују када је реч о морским бродовима.

У циљу покушаја да се набројани проблеми превазиђу и да се дође до конкретних закључака који би требало да помогну у бољем разумевању погона речних самохотки, у оквиру **Поглавља 4** је оформљена база са резултатима великог броја испитивања апсорпције снаге и то како на моделима, тако и на бродовима у природној величини у реалним околностима. Овде је спроведена и прелиминарна анализа расположивих резултата. Том приликом су констатована извесна одступања у резултатима и то:

- 1) између појединих моделских испитивања и испитивања одговарајућих бродова у пуној величини,
- 2) између моделских испитивања истог брода при различитим размерама модела и
- 3) између испитивања истог брода у природној величини која су спроведена са извесном временском дистанцом.

Ове нелогичности су отвориле простор за истраживања која су спроведена у наредним поглављима.

Важан део овог истраживања представљају експерименти у оквиру којих је на више бродова, при експлоатацији у реалним околностима, измерена апсорпција снаге. Ово је обрађено у **Поглављу 5**. Спроведени експерименти су били изузетно важни за боље разумевање могућих разлога за поменута одступања у резултатима мерења. У овом поглављу је детаљно описана опрема која је при мерењима коришћена. Указано је на кључна места којима је приликом мерења важно посветити посебну пажњу. Показало се да су коректна мерења апсорпције снаге изузетно захтеван подухват који подразумева истовремено праћење великог броја утицајних фактора, без којих каснију анализу резултата мерења није могуће до краја спровести.

На основу прикупљених резултата испитивања апсорпције снаге већег броја речних самохотки (директним мерењима, као и из расположивих извештаја) развијен је применом методе вештачких неуронских мрежа (*ANN*) математички модел за процену потребне снаге у зависности од основних димензија брода и ограничења пловног пута. При развоју модела су истовремено испитане и

могућности ове, релативно нове математичке методе за развој одговарајућих инжењерских алата у области бродоградње. Овај део истраживања је представљен у **Поглављу 6**.

Можда најзначајнији део истраживања у оквиру кога је, на бази свега што је у претходним поглављима изнето, али и шире, разматран ефекат спољашњих утицаја на пропулзију речних самоходки, обрађен је у **Поглављу 7**. Овде су наговештена објашњења, некада и великих разлика у мерењима апсорпције снаге на истом броду. Осим тога, разматране су и могућности за одређивање коефицијената пропулзије, односно утицаја трупа брода на рад пропелера и у том смислу дате су извесне препоруке.

У претпоследњем, не мање значајном **Поглављу 8**, применом препорука за процену индекса енергетске ефикасности (*EEDI*), који је развијен за морске бродове, одређени су показатељи енергетске ефикасности за неколико речних самоходки. Овде је наговештен пут којим би се могло доћи до референтних кривих, које ће највероватније, у блиској будућности, бити веома значајне како при пројектовању нових самоходки, тако и при поређењу постојећих, када је о енергетској ефикасности бродова овог типа реч.

Закључци до којих се дошло при истраживању енергетске ефикасности речних самоходних теретних бродова, као и смернице за даљи рад на унапређењу развијене методе за одређивање потребне снаге и понуђених концепција за процену коефицијената пропулзије и одређивање индекса енергетске ефикасности, изнети су у последњем **Поглављу 9** овог рада.

2

Улога самохотки у савременом транспорту

2.1 Транспорт робе унутрашњим пловним путевима Европе

Импресиван технолошки развој и незасита потрага за новим тржиштима обележили су протекле деценије. Произвести што већу количину робе, изборити се за тржиште и при томе смањити трошкове у највећој могућој мери, постали су апсолутни приоритети модерног света. Данас скоро да је могуће купити било шта, било где, и то у било којој количини без обзира на то где је произведено. Ово би било незамисливо без добро организованог транспорта робе.

Улога транспорта робе између произвођача и крајњег потрошача, чији су трошкови некада и већи од трошкова производње, постала је посебно важна. Тим пре што је трошкове производње данас могуће значајно умањити пресељењем

производних погона у регије у којима је радна снага јефтинија, ефикасност транспорта је постала веома важан фактор.

Према доступним подацима [22] унутрашњу транспортну мрежу Европе чини више од 410 хиљада километара друмова националног и међународног значаја, 210 хиљада километара железничких пруга и свега нешто више од 36 хиљада километара пловних путева. У складу са оваквим стањем путне инфраструктуре, транспорт робе унутрашњим пловним путевима је (са неких 7% укупно превезених тона терета по километру) на трећем месту иза транспорта железницом и друмовима. Међутим, у периоду од 1970. године до данас, забележен је пораст транспорта унутрашњим пловним путевима за око 20%. Упркос далеко развијеније копнене инфраструктуре, бројни су разлози који транспорт робе пловним путевима из године у годину чине све интересантнијим.

Неке од значајнијих предности транспорта терета унутрашњим пловним путевима, у односу на остале видове транспорта, су:

Велика носивост – један брод носивости 2000 тона може да замени композицију од 50 вагона са по 40 тона терета у сваком, или 80 камиона са по 25 тона терета. Према томе, пребацивањем терета са друмова и пруга на реке и канале, у великој мери се може растеретити веома оптерећена копнена инфраструктура. Ово је изводљиво тим пре што су капацитети пловних путева недовољно искоришћени. Примера ради, свега око 15% пловног потенцијала Дунава је у овом тренутку искоришћено.

Нижи трошкови транспорта – када је реч о потрошњи горива за транспорт тоне робе по превезеном километру, железницом је потребно потрошити негде око 50% горива више, а друмовима и читавих пет пута више горива у односу на транспорт бродом [25]. Одавде се јасно види колико је транспорт терета бодовима јефтинији. Уколико се при том има у виду да је количина фосилних горива ограничена и да се сваким даном све више смањује, ова предност постаје још израженија.

Безбедност терета и људи – статистички посматрано инциденти на рекама су веома ретки, те се овај вид транспорта може сматрати изузетно сигурним. Овоме

доприносе и веома строги захтеви, као и контроле по питању безбедности, што је утолико израженије уколико се превозе опасне материје.

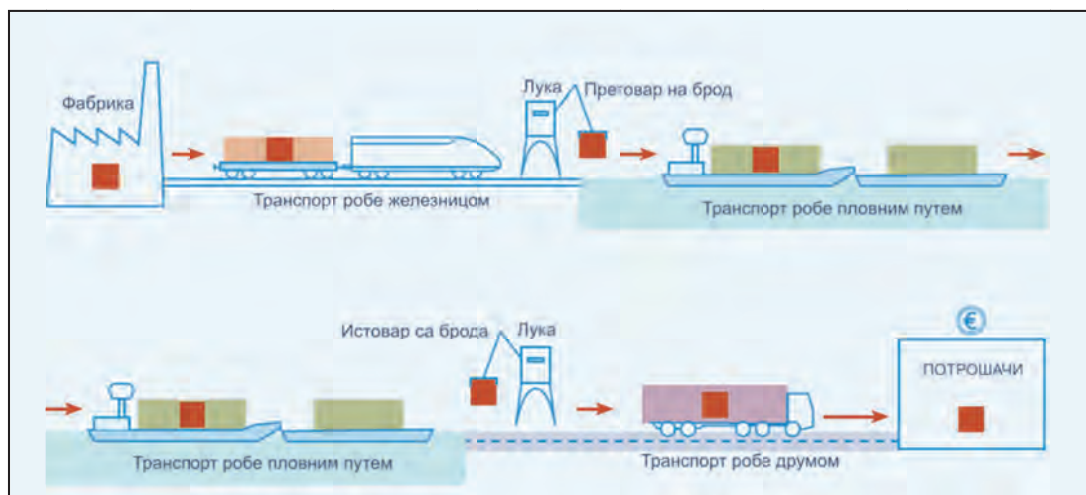
Мање загађење животне средине – Најзначајнији штетни гасови које погонски и помоћни мотори бродова емитују у атмосферу су:

- угљен-диоксид (CO_2) - емисија директно зависи од потрошње горива,
- оксиди азота (NOx) - емисија зависи од конструкције мотора и од општег стања мотора,
- оксиди сумпора (SOx) - емисија зависи од концентрације сумпора у гориву и
- честице чађи (PM) – емисија зависи од врсте горива и одржавања мотора.

Како је потрошња горива мања по тона-километру, у односу на остале видове транспорта, бродови емитују знатно мању количину CO_2 у атмосферу. Међутим, емисија NOx и честица чађи је већа услед чињенице да су мотори који данас покрећу бродове углавном старије генерације од савремених камионских мотора. Последњих година се овом проблему посвећује велика пажња, и како се показало, уградњом одговарајућих филтера и употребом квалитетнијег погонског горива (с мањим процентом сумпора) постигнути су изузетни резултати.

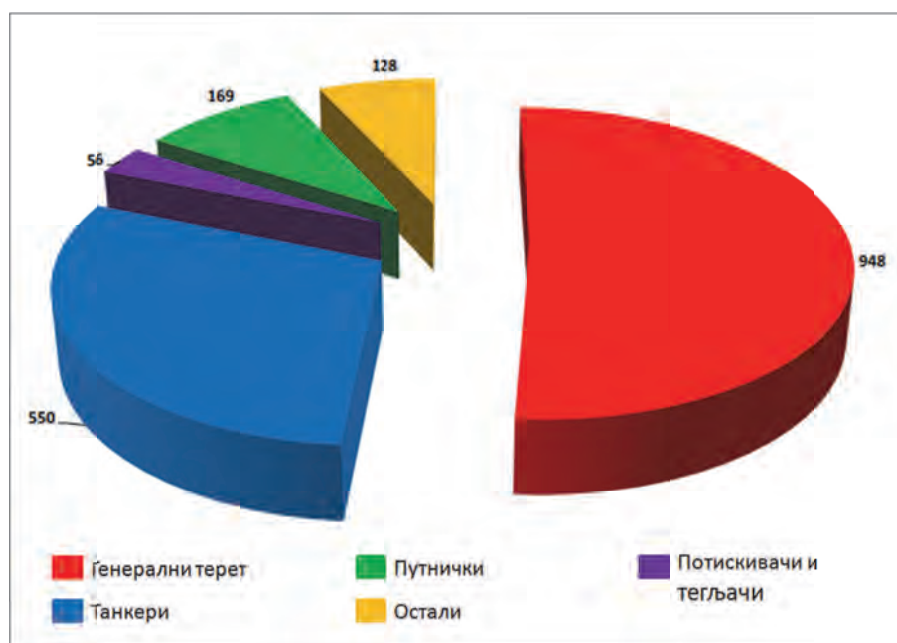
За разлику од осталих видова (друмски и железнички) транспорт бродовима омогућава и превоз неуобичајено великих и тешких терета – специјалних терета који се на други начин не могу транспортовати.

Велики потенцијал унутрашњих пловних путева лежи и у доброј повезаности са осталим видовима транспорта услед чега се уз добру логику може организовати тзв. интермодални транспорт (од врата фабрике до врата потрошача), уз минималне трошкове. На тај начин се комбинују добре стране свих видова транспорта, изузев ваздушног, и на најрационалнији начин користи постојећа инфраструктура.



Слика 2.1 – Интермодални транспорт робе од произвођача до потрошача

Према подацима који су доступни на интернет страници IVR-а [24] у 2011. години флота западне Европе је располагала са 6552 самохотки за превоз генералног терета укупне носивости од скоро 7.5 милиона тона, као и са 1966 самоходних танкера носивости око 3.2 милиона тона.



Слика 2.2 – Број новоизграђених бродова у периоду од 2000-2010 године [24]

У периоду од 2000-2010. године флота западне Европе је увећана за 1851 брод, од чега су 81% самохотке. Од тога, Холандија је своју флоту увећала за 1288 бродова, Белгија за 285, а Немачка за 160 бродова. У истом периоду Француска,

Швајцарска и Луксембург повећали су флоте за укупно 118 бродова. Према томе, може се закључити да се западно-европска флота у великој мери подмлађује и да се у извесној мери повећава, што указује на то да ће у времену које долази транспорт робе унутрашњим пловним путевима у Европи добијати на значају.

И док на западно-европским пловним путевима доминирају самохотке, на Дунаву је ситуација нешто другачија. Услед специфичних карактеристика пловног пута, а пре свега због релативно мале дубине и велике ширине, овде још увек доминирају потискивачи.

Табела 2.1 – Постојећа флота на Дунаву [23]

Бродови на Дунаву	2008 година			2009 година		
	Број	Укупна уграђена снага [kW]	Укупна корисна носивост [t]	Број	Укупна уграђена снага [kW]	Укупна корисна носивост [t]
Самохотке	440	254,156	453,855	427	233,982	436,975
Потискивачи	418	470,421	-	418	473,513	-
Барже	1947	-	2,650,955	1916	-	2,625,820

У табели 2.1 изостављени су тегљачи и шлепови којих на Дунаву има не мали број, али се у последње време, како се чини, од овог концепта одустаје. Постојећа флота се још увек користи, али углавном при ниском водостају.

Из доступних података, датих у табели 2.1, може се уочити благи пад броја самохотки на Дунаву у периоду између 2008 и 2009. године. Ово се донекле може објаснити тиме да највећи део пловног пута Дунава (средњи и доњи Дунав) протиче кроз земље које су у економском смислу у последње време у извесној стагнацији. Ипак, може се очекивати да ће даљи економски развој ове регије, као и добра пракса из развијених подручја Европе, значајно променити овакво стање.

2.2 Специфичности пловних путева Европе

Потенцијал мреже унутрашњих пловних путева Европе је велики и још увек недовољно искоришћен. Читава Европа је покривена разгранатом мрежом река и канала од којих је већина пловна, али и многим мањим и недовољно уређеним токовима, који би се уз одређена улагања могли учинити проходним за бродове. Тренутно више од 36000 километара пловних путева у Европи повезује стотине градова и индустријски значајних области, обезбеђујући десетинама милиона људи квалитетнију егзистенцију. Више стотина лука и пристаништа омогућавају директну везу са осталим видовима транспорта, а пре свега са мрежом железница и друмском инфраструктуром, када је о копненом транспорту реч, односно са поморским линијама, којима је Европа повезана са осталим континентима.

Економски значај транспорта робе пловним путевима Европе условио је да се већ деценијама многобројне институције, али и владе земаља широм Европе кроз доношење и спровођење неопходних политичких одлука, баве уређењем и анализама могућности унапређења овог вида транспорта. У том смислу, на нивоу Економске комисије Уједињених нација за Европу (*UNECE*), као и Европске конференције Министара транспорта (*CEMT*), кроз документа која су усвојена, успостављена је класификација пловних путева Европе (видети табелу 2.2).

Основни критеријуми при овој класификацији су димензије и носивост бродова који безбедно могу да плове појединим пловним путевима. У приказаној табели посебна пажња је посвећена самоходним теретним бродовима, јер је ова категорија бродова од посебног значаја за истраживање у овој дисертацији.

Сви пловни путеви у Европи разврстани су у две основне групе:

1. пловни путеви од локалног значаја – класе од 1 до 3
2. пловни путеви од међународног значаја – класе од 4 до 7

Табела 2.2 – Класификација европских пловних путева [13]

Значај пловног пута	Класа пловног пута	Самохотке и барже					
		Класа брода	Тип брода - основне карактеристике				
			Максимална дужина L [m]	Максимална ширина B [m]	Максималан газ T [m]	Корисна носивост [t]	
1	2	3	4	5	6	7	
Регионални	Западно од Елбе	I	Peniche	38.5	5.05	1.8 - 2.2	250 - 400
		II	Kempenaar	50 - 55	6.6	2.5	400 - 650
		III	Gustav Koenigs	67 - 80	8.2	2.5	650 - 1000
	Источно од Елбе	I	Gross Finow	41	4.7	1.4	180
		II	BM 500	57	5.7 - 9.0	1.6	500 - 630
		III	(1)	67 - 70	8.2 - 9.0	1.6 - 2.0	470 - 700
Интернационални	IV	Johann Welker	80 - 85	9.5	2.5	1000 - 1500	
	Va	GMS	95 - 110	11.4	2.5 - 2.8	1500 - 3000	
	Vb	Потискивани састав	172 - 185	11.4	2.5 - 4.5	3200 - 6000	
	Vla	Потискивани састав	95 - 110	22.8	2.5 - 4.5	3200 - 6000	
	Vlb	(2)	140	15	3.9		
	Vlc	Састав 2+2+2 Састав 3+3	270 - 280 190 - 200	22.8 33.0 - 34.2	2.5 - 4.5	9600 - 18000	
	VII	Састав 3+3+3	285	33.0 - 34.2	2.5 - 4.5	14500 - 27000	

(1) - Бродови који плове у региону између Елбе и Одре

(2) - Бродови који су намењени за транспорт контејнера, као и Ro-Ro бродови.

Даљом класификацијом, сви пловни путеви Европе, разврстани су на седам поткатегорија.

Процентуални удео појединих класа, у укупном пловном путу земаља ЕУ, дат је у следећој табели.

Табела 2.3 – Укупне дужине појединих класа пловних путева у ЕУ [21]

	План	Класе I, II и III	Класа IV	Класа Va	Класа Vb	Класа Vla	Класа Vlb	Класа Vlc	Класа VII	Укупно
Дужина [km]	1489	4286	3969	3270	5051	667	5766	1592	1621	27711
%	5.37	15.47	14.32	11.80	18.23	2.41	20.81	5.75	5.85	100

Као што се из претходне табеле може уочити, у плану је проширење мреже пловних путева за око 1500 километара. Ово ће бити реализовано повећањем капацитета постојећих пловних путева локалног значаја (проширивањем и продубљивањем) или прокопавањем додатних канала, којима би се повезали постојећи капацитети. Нови пловни путеви, који би на овај начин били оспособљени, требало би да буду од међународног значаја.

Осим споменуте класификације, у складу са проходношћу, пловни путеви Европе се према политичко-економским факторима који владају у земљама где се налазе могу поделити на четири коридора:

- **Рајнски коридор** – обухвата слив Рајне као и пловне канале у западној Немачкој, Белгији, Холандији, Швајцарској, источном делу Француске и Луксембургу. У погледу водног транспорта ово је најразвијенија област Европе. Овде плови више од 5500 самохотки за транспорт генералног терета просечне носивости од око 1000 тона и нешто више од 1000 самоходних танкера носивости од око 1500 тона. Више од 80% свог терета који се транспортује пловним путевима Европе је концентрисано у овој области. Према томе ова регија има пресудан утицај на развој водног транспорта али и европске флоте бродова.
- **Дунавски коридор** – обухвата слив Дунава са свим пловним каналима у регији, као и канал Дунав-Мајна-Рајна. За разлику од Рајне где су углавном заступљене самохотке, на Дунаву доминирају потискивани састави. Крајем осамдесетих година више од 90% терета на Дунаву је транспортовано потискивачима са баржама. У последње време се ова слика полако мења, међутим потискивани састави су и даље у значајној предности. Иначе, са приближно 4% транспортованог терета на Европском нивоу, овај коридор, упркос могућностима, у великој мери је неискоришћен.
- **Коридор Исток-Запад** – чине га сливови река Елбе, Одре и Висле, заједно са каналима који их повезују са западном Европом. Мали газ је основна одлика ове групе пловних путева. Флота бродова, у овој регији, далеко је мања него н Дунаву.

- **Коридор Север-Југ** – обухвата пре свега пловне путеве у Француској. Главним пловним путевима ове регије плове бродови који су уобичајени и на Рајни. Осим тога, више од 850 малих самохотки, чије су носивости до 360 тона, плови густом мрежом канала у овој области.



Слика 2.3 – Мрежа пловних путева северо-западне Европе [20]



Слика 2.4 – Мрежа пловних путева – слив Дунава [20]

На претходним сликама су приказане мапе најзначајнијих пловних путева Европе, у складу са споменутом класификацијом.

Кључни ограничавајући фактори за пловидбу рекама и каналима, који у великој мери отежавају пловидбу, су:

1. Природна ограничења:

- ширина пловног пута се директно одражава на максималну дозвољену ширину брода,
- дубина пловног пута утиче на највећи дозвољени газ брода, а тиме директно и на његову корисну носивост,
- кривине на пловном путу могу бити ограничавајући фактор када је о дужини бродова или састава реч.

2. Вештачка ограничења:

- ширине преводница директно ограничавају ширину брода – многе преводнице, некада и на главним пловним путевима, прављене су пре више деценија и када је о проходности реч сасвим су задовољавале потребе времена из ког потичу; међутим, данас, када су потребе далеко веће, заправо представљају „уска грла“ и отежавају пролаз данашњим бродовима, а тиме и неометан проток робе;
- висине мостова у спрези са водостајем значајно утичу на то да ли брод може безбедно проћи испод моста; ово нарочито долази до изражаја уколико је мост низак, а водостај висок.



Слика 2.5 – Брод у преводници (лево), брод пролази испод моста (десно)

Природна ограничења пловних путева, осим на споменуте начине, значајно утичу и на хидродинамичке карактеристике бродова:

- У хидродинамичком смислу, ширина пловног пута (близина обала) значајно утиче на отпор брода – уколико је пловни пут ужи, утолико је отпор брода већи. Осим тога, таласи који се јављају услед кретања брода могу оштетити обале. Да би се ова појава избегла неопходно је да се смањи брзина кретања брода, а што се значајно одражава на економску ефикасност транспорта.
- Дубина пловног пута такође значајно утиче на отпор брода – уколико је дубина воде мања, утолико је отпор брода већи. Дубина воде утиче и на хидродинамички урон, што може довести до оштећења брода у случају контакта са дном. У плиткој води се значајно мења и слика таласа, а велики таласи могу довести до ерозије обале. Плитка вода се неповољно одражава и на ефикасност пропелзора услед комплексније интеракције између трупа брода и пропелера и чињенице да је дострујавање воде, неопходне за рад пропелера, отежано.
- Кривине на пловном путу изискују чешћу употребу контролних уређаја на броду (кормила и прамчани пропелери), што доводи и до појаве заносења брода, а што све заједно додатно повећава отпор брода.

Према томе, проблеми који се јављају при пловидби ограниченим пловним путевима (по дубини и ширини), у великој мери могу утицати на ефикасност транспорта. За разлику од морских бродова, који углавном плове „неограниченим“ пловим путевима, код речних бродова су ова ограничења сасвим уобичајена. Према томе, и проблеми са којима се суочавају пројектанти ових бродова могу бити комплекснији.

2.3 Типови речних самохотки

Речни самоходни теретни брод – самохотка – је речни депласмански брод са најчешће равним дном, који има сопствени погон. Покреће је најчешће 1 до 3

пропелера/мотора у зависности од димензија брода. Услед тога што је газ самохотки ограничен дубином пловног пута и што неретко није могуће уградити пропелере довољно великог пречника, често се уграђују пропелери у сапницама. Иза сваког пропелера се налази једно до два кормила. Командни мост се углавном налази на крми изнад машинског простора, а испред је велико складиште (или танкови) које се затвара телескопским поклопцима (сем у случају танкера) на које се не може крцати терет.

Табела 2.4 – Најзначајније класе самохотки које данас плове рекама Европе [14]

Тип брода	Димензије L x B x T	Корисна носивост	Опис
<i>Peniche (Spits)</i>	38.70 X 5.05 X 2.20	~ 364 тона	Развијени су у Белгији. Плове каналима у Холандији, Белгији и Француској.
<i>Theodor Bayer</i>	48.00 X 5.05 X 2.30	~ 370 тона	
<i>Oskar Teubert</i>	53.00 X 6.29 X 2.50	~ 562 тоне	
<i>Kempenaar</i>	50.00 X 6.60 X 2.50	~ 600 тона	Плове узаним пловним путевима пре свега у каналима на југу Холандије и у Белгији
<i>Karl Vortisch</i>	57.00 X 7.04 X 2.50	~ 605 тона	
<i>Kempenaar II</i>	55.00 X 7.20 X 2.50	~ 683 тоне	Плове каналима и пловним путевима локалног значаја
<i>Canal du Nord ship</i>	60.00 X 5.75 X 3.20	~ 800 тона	Плове каналима и пловним путевима локалног значаја
<i>Neo Kemp</i>	63.00 X 7.00 X 2.50	32 контејнера	Плове каналима и пловним путевима локалног значаја. Командни мост је на прамцу брода
<i>DEK (Dordmund-Ems-Canal) Gustav Koenigs</i>	67.00 X 8.20 X 2.50	~ 900 тона	Развијени су за пловидбу пловним путевима са ниским мостовима
<i>DEK II (Dordmund-Ems-Canal)</i>	80.00 X 8.20 X 2.50	~ 1100 тона	Развијени су за пловидбу пловним путевима са ниским мостовима
<i>RHK (Rhine-Herne Canal) Johann Welker</i>	80.00 X 9.50 X 2.50	~ 1350 тона	Развијени су за пловидбу великим пловним путевима са ниским мостовима
<i>Ship Europa</i>	85.00 X 9.50 X 2.50	~ 1500 тона	
<i>Steinklasse</i>	95.00 X 11.40 (11.00) X 2.70	~ 1960 тона	Изузетно успешна класа самохотки за превоз генералног терета и контејнера на Дунаву
Бродови дужи од 100 метара			Развијени су за главне пловне путеве
Бродови за превоз сувог терета			Погодни за транспорт контејнера и расутог терета.
<i>GMS</i>	110.00 X 11.45 X 3.50	~ 3240 тона	~ 208 ISO контејнера
	135.00 X 11.45 X 3.50	~ 3950 тона	~ 268 ISO контејнера
	135.00 X 16.80 X 3.60	~ 5200 тона	~ 398 ISO контејнера (4 реда по висини), ~ 470 ISO контејнера (5 редова по висини)
Танкери			Развијени за транспорт нафте и нафтних деривата као и хемикалија
	110.00 X 11.45 X 3.60	~ 2990 тона	
	110.00 X 13.50 X 4.20	~ 4250 тона	
	125.00 X 11.45 X 3.60	~ 3500 тона	
	135.00 X 13.50 X 4.20	~ 5500 тона	
	135.00 X 15.00 X 4.20	~ 5700 тона	
	135.00 X 16.80 X 4.20	~ 6500 тона	

Речне самохотке најчешће не поседују сопствене уређаје за прекрцај терета, мада има изузетака.

Услед значајних разлика које карактеришу пловне путеве Европе, данас рекама Европе плови велики број различитих класа речних самоходних теретних бродова (табела 2.4). Основне разлике између класа се огледају у димензијама и корисној носивости, а одатле проистичу и разлике у снагама уграђених мотора.

Осим тога, све самохотке се могу поделити и према врсти терета који носе на бродове за превоз :

- генералног терета, расутог терета и контејнера,
- танкере,
- Ро-Ро бродове и
- путничке бродове.

Први и најстарији бродови су били и најмањи. Да би било могуће одговорити све већим захтевима индустрије и потребама тржишта, носивост самохотки се временом повећавала. Ово је за последицу имало и потребу за уградњом погонских мотора веће снаге. Упоредо са поменутиим повећањима, расла је и брзина самохотки. Међутим, техничке могућности, ограничења пловних путева, као и цена горива, успоставили су извесну равнотежу и успорили су даљи пораст димензија и брзина ових бродова.

Неки од бродова набројаних класа су показани на следећим сликама. Све слике бродова које су овде дате су преузете са [16], [17] и [18].

- Бродови класе ***Peniche*** (***Penische***) намењени су за пловидбу малим пловним путевима класе 1. Иако су много чешће грађени у првој половини прошлог века, интересантно је да се бродови *Peniche* класе још увек граде. Према информацијама које су доступне на <http://www.naiades.info> 2005. године поринута су три брода намењена за транспорт шљунка на кратким дистанцама на каналима у Француској. Ови бродови се донекле разликују од осталих у класи.



Слика 2.6 – Брод класе *Peniche*; димензије: 39x5.05x2.40; носивост: 354 тоне; година градње: 1961; уграђена снага: 242 kW

Кормиларница је померена на прамац, уграђен је аутоматски систем контроле баласта, поседују прамчани пропелер и број чланова посаде је смањен на једну особу. Носивост ових бродова је 280 тона на газу од 2 метра, а уграђена снага износи око 135 kW. Значајна одлика ових бродова је добра покретљивост, те су погодни за транспорт терета у урбаним, као и за веће бродове неприступачним зонама.

- Бродови класа *Кемпенаар* и *Кемпенаар II* су развијени за пловидбу каналима у *Camphine* регији која се простире на североистоку Белгије и захвата део југозападне Холандије. Намењени су за пловидбу пловним путевима класе 2.



Класа:	Kempenaar
Име брода:	Res Nova
Димензије:	50.00x6.60x2.65
Носивост:	520 тона
Година градње:	1959
Уграђена снага:	270 kW

Класа:	Kempenaar II
Име брода:	Seolto
Димензије:	55x7.20x2.82
Носивост:	681
Година градње:	1965
Уграђена снага:	224 kW

Слика 2.7 – Бродови класе *Кемпенаар* и *Кемпенаар II*

- Класа бродова *Gustav Koenigs* развијена је за пловидбу Дортмунд-Емс каналом који, делимично уз помоћ природног тока реке Емс, повезује Дортмунд, који се налази дубоко у територији Немачке, и поморску луку Емден на северном мору. Канал је дугачак 269 километара, и у складу са раније описаном класификацијом пловних путева, спада у класу 3. Као одговор на повећане захтеве тржишта бродовима класе *Gustav Koenigs* је повећана дужина на 80 метара и тако је настала класа бродова *Gustav Koenigs II*.

Носивост ових бродова у зависности од газа је дата у следећој табели:

Газ	1.5 m	2.0 m	2.5 m
<i>Gustav Koenigs</i>	420 t	670 t	1000 t
<i>Gustav Koenigs II</i>	500 t	800 t	1100 t



Класа:	Gustav Koenigs
Име брода:	Catharina
Димензије:	67x8.20x2.38
Носивост:	839 тона
Година градње:	1929
Уграђена снага:	737 kW



Класа:	Gustav Koenigs II
Име брода:	La Primavera
Димензије:	80.00x8.20x2.55
Носивост:	1100 тона
Година градње:	1958
Уграђена снага:	590 kW

Слика 2.8 – Бродови класе *Gustav Koenigs* и *Gustav Koenigs II*

Бродови ове класе најчешће имају један пропелер пречника између 1.2 и 1.5 метара са једним до два кормила у струји пропелера.

- Бродови *Johann Welker* класе развијени су за пловидбу *Rhine-Herne* каналом, који повезује луку на Рајни у Дуисбургу са Дортмунд-Емс каналом. Овај пловни пут спада у класу 4.



Класа:	Johann Welker
Име брода:	Reiderland
Димензије:	80x9.50x3.20
Носивост:	1765 тона
Година градње:	1929
Уграђена снага:	783 kW

Класа:	Ship Europa
Име брода:	Nicotrans
Димензије:	85.9x9.50x2.75
Носивост:	1421 тона (90 TEU)
Година градње:	1995
Уграђена снага:	720 kW

Слика 2.9 – Бродови класе *Johann Welker* и *Ship Europa*

Бродови ове класе се могу срести широм западне Европе, али и на Дунаву. Развијани су пре свега да носе генерални терет, међутим данас постоје бродови ове класе који носе контејнере (60-90 TEU), као и танкери. Многи бродови који данас плове су изведени на основу ове класе – имају ширину 9.5 метара, а дужине им се крећу и до 105 метара. Тако је настала и класа бродова *Ship Europa*. Најчешће имају 1 до 2 пропелера у сапници, чији су пречници између 1.3 и 1.6 метара, са по једним до два кормила по пропелеру. Често имају премчане пропелере.

Носивост бродова ове класе, у зависности од газа је дата у следећој табели:

Газ	1.5 m	2.0 m	2.5 m	2.7 m
<i>Johann Welker</i>	600 t	940 t	1280 t	-
<i>Ship Europa</i>	570 t	930 t	1350 t	1500 t

- Половином седамдесетих година двадесетог века, у аустријском бродоградилишту у Линцу, направљена је серија од 6 бродова класе *Stein* (*Aggstein, Dürnstein, Greifenstein, Jochenstein, Kreuzenstein* и *Partenstein*). Ови бродови су се показали веома добро на Дунаву и направљено је 10 објеката за немачке компаније и 15 бродова за Украјинце.



Класа:	Steinklasse
Име брода:	Aggstein
Димензије:	95x11.40x2.70
Носивост:	1982 тоне
Година градње:	1975
Уграђена снага:	2 x 607 kW @ 900 rpm



Класа:	GMS
Име брода:	Benja
Димензије:	109.88x11.45x3.24
Носивост:	2667 тона (208 TEU)
Година градње:	2001
Уграђена снага:	1135 kW

Слика 2.10 – Бродови класе *Steinklasse* и *GMS*

Пројектовани су да транспортују генерални терет, али и контејнере. Украјински бродови су широки 11 метара, док су немачки шири за 40 см. Ширина од 11.40 метара им је омогућила да у складишту носе четири реда контејнера по ширини. Укупна висина брода износи 6.5 метара. Ово је нарочито важно због проласка испод мостова. На максималном газу од 2.7 метара могу да носе 2000 тона терета. Врло често бродови ове класе плове у саставу са једном или више баржи.

- Бродови класе *GMS* су развијени за пловидбу пловним путевима класе Va. Имају један до два пропелера, чији су пречници између 1.6 и 1.8 метара, са по једним или два кормила по пропелеру. Најчешће имају прамчани пропелер.

Газ	1.5 m	2.0 m	2.5 m	2.7 m	2.8 m	3.5 m
<i>Steinklasse</i>	-	-	-	1960 t	-	-
<i>GMS</i>	600 t	1200 t	1800 t	-	2100 t	3000 t

- Масовнија примена ISO контејнера и повећани захтеви тржишта довели су до појаве *JOWI* класе – великих речних контејнерских бродова. Ширина ових бродова је повећана на 17 метара, тако да у складиште може да стане шест редова контејнера по ширини. И дужина им је 25 метара већа у односу на бродове *GMS* класе.



Класа: JOWI
Име брода: Jowi
Димензије: 134.16x16.9x3.52

Носивост: 5175 тона (392 TEU)
Година градње: 1998
Уграђена снага: 3x685 kW

Слика 2.11 – Брод класе *Jowi*

Могу да понесу 392 TEU контејнера сложених у 4 реда по висини. Због газа, који се креће између 2.8 и 4 метра, углавном плове Рајном која је знатно уређенија и дубља од Дунава. Најчешће имају два до три пропелера у сапницама, чији се пречници крећу између 1.6 и 1.8 метара, са једним до два листа кормила по пропелеру. Ради бољих маневарских карактеристика, имајући у виду димензије ових бродова, најчешће имају по два прамчана пропелера.

- У исто време са речним самохоткама за транспорт генералног терета и контејнера, развијали су се и речни самоходни танкери. Овде су показане само, за данашње време, најзначајније класе танкера чије су дужине веће од 100 метара.



Име брода: Talisman
Димензије: 110x11.45x3.75
Носивост: 3150 тона
Година градње: 2005
Уграђена снага: 1343 kW

Име брода: Tricolore
Димензије: 125x11.45x3.59
Носивост: 3384 тоне
Година градње: 2005 (Береј)
Уграђена снага: 2x970 kW

Слика 2.12 – Танкери – *GMS* и продужени *GMS*



Име брода: Novamente
 Димензије: 135x13.5x2.42
 Носивост: 4188 тона
 Година градње: 2005
 Уграђена снага: 2x1030 kW



Име брода: Va-Banque
 Димензије: 135x16.8x3.41
 Носивост: 6355 тона
 Година градње: 2004
 Уграђена снага: 2x1030 kW

Слика 2.13 – Велики речни танкери

Осим наведених класа бродова, рекама и каналима Европе плови и велики број бродова који се својим димензијама не уклапају у споменуте класе. Њихове димензије су пре свега одређене карактеристикама пловних путева за које су пројектовани, али и специфичним захтевима бродовласника.

Око 4300 километара европских пловних путева (око 15.5%) спада у категорију тзв. регионалних пловних путева и није приступачно за бродове шире од 8.2 метра.



Класа: Neo Kemp
 Име брода: Kube Nopper
 Димензије: 63.00x7.03x3.02
 Носивост: 914 тона (32 TEU)
 Година градње: 2000
 Уграђена снага: 2x406 HP

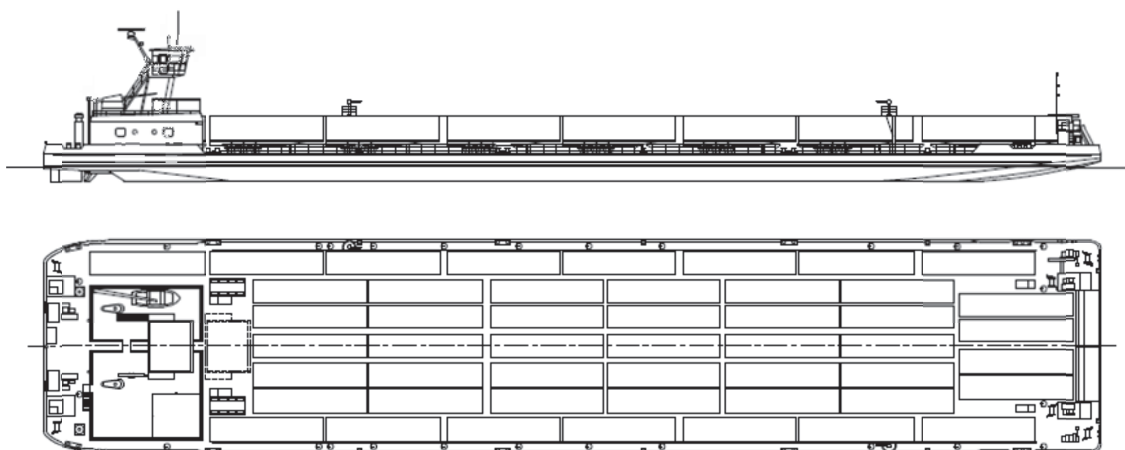


Тип: Ro-Ro
 Име брода: Han Tervel
 Димензије: 114x22.8x1.65
 Носивост: 1372 тона (49 шлепера)
 Година градње: 1982
 Уграђена снага: 2x926 kW

Слика 2.14 – Мали контејнерски брод и дунавски Ro-Ro брод

Према томе, експанзија транспорта терета у контејнерима довела је до појаве малог контејнерског брода класе *Neo Kemp*, чија је ширина прилагођена да у складиште могу да стану два реда TEU контејнера по ширини. За трећи ред би минимална ширина брода требала да буде 9 метара, што би захтевало пловни пут класе 4. Ови бродови најчешће плове каналима у Француској и Холандији. Осим тога, постоје планови за развој тзв. *Freycinet 2000* бродова, по угледу на *Peniche* бродове, који би били још ужи и који би могли да носе само један ред контејнера у складишту. Ови бродови би могли да понесу највише 10 контејнера.

Веома интересантни су и *Ro-Ro* бродови који су развијени за пловидбу Дунавом. Већ тридесет година четири *Ro-Ro* брода, пловећи на релацији *Pasau* (Немачка) – *Vidin* (Бугарска), повезују западну и источну Европу. Два брода (*Han Asparuh* и *Han Tervel*), са формама семи-катамарана, су изграђена у Дегендорфу (Немачка) за потребе бугарске компаније SOMAT.



Слика 2.15 – Генерални план *Ro-Ro* семи-катамарана за пловидбу Дунавом

Преостала два брода (*Han Krum* и *Han Kardam*) су пројектовани и изграђени у Србији, у бродоградилиштима у Апатину и Мачванској Митровици, за исту компанију. Ови бродови имају форму катамарана. Интересантно је да је један од пројектних захтева био да се обезбеди могућност растављања трупова према потреби, ради ремонта, од чега се касније одустало. У ове бродове су уграђена по два мотора од по 793 kW.

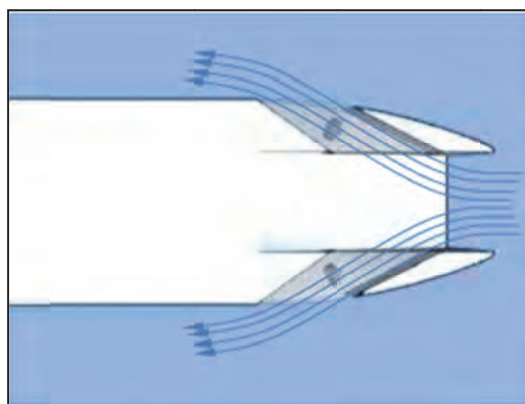


Име брода: RMS Kiel
(данас RMS Futura Carrier)
Димензије: 97.5x13.6x2.8
Носивост: 2500 тона
Година градње: 2006
Уграђена снага: 4x600 kW

Име брода: Til I Deymann
Димензије: 97.5x13.6x2.8
Носивост: 2500 тона
Година градње: 2006
Уграђена снага: 4x600 kW

Слика 2.16 – *Futura Carrier* и *Till Deymann* [19]

И на крају свакако треба споменути недавно изграђене бродове које је развио *NEW-LOGISTICS GmbH*. До сада су изграђена четири брода овог типа (*Futura Carrier*, *Till Deymann*, *Sophia Soraya* и *Kaja Josephine*). Подручје пловидбе ових бродова обухвата Рајну, доњи ток Елбе (*Brunsbüttel – Hamburg*) и приобалне области Медитерана, Северног и Балтичког мора. Ови бродови се по примењеним техничким решењима значајно разликују од свих бродова који су до сада споменути. У прамац ових бродова, који има форму семи-катамарана, уграђена су два погонска пропелера који осим што доприносе потиску, редукујући прамчани талас, знатно поправљају слику таласа. Имајући у виду подручје пловидбе ових бродова, могу се сматрати речно-морским бродовима.



Слика 2.17 – Шематски приказ и принцип рада прамчаних пропулзора [19]

Прамчани пропулзори, код ових бродова, имају значајну улогу и у побољшању маневарских карактеристика, што се остварује прекретом пропелера са циљем обезбеђивања силе потиска у жељеном смеру. Први пут на европским речним бродовима примењен је систем за смањење отпора трења убризгавањем ваздуха у гранични слој између трупа брода и околне воде. Осим наведених, на овим бродовима је примењен и низ других иновативних техничких решења.

3

Уопштено о погону и енергетској ефикасности самохотки

3.1 Класичан поступак за одређивање потребне снаге мотора

Изузетно важан задатак који се поставља пред пројектанта речне самохотке, када је о бродској хидродинамици реч, је одабир адекватног погонског система који ће броду омогућити захтеване перформансе, а имајући у виду и остале захтеве који се тичу носивости брода, чврстоће, стабилитета, итд. Чињеница да су унутрашњи пловни путеви често ограничени по дубини и/или по ширини значајно отежава овај задатак. Овде ће проблем одабира одговарајућег пропулзивног комплекса бити рашчлањен на низ инжењерских проблема које је неопходно решити, а у циљу добијања јасније слике о обиму задатка.

3.1.1 Отпор брода

На брод који плута на мирној површини воде делује хидростатички притисак околне воде. Силе које делују на брод, а које су последица овог притиска су управне на оплату брода. Сума свих вертикалних компоненти ових сила (резултујућа сила узгона) једнака је тежини брода. Равнотежа ових сила, у складу са Архимедовим законом, обезбеђује плутање брода на површини воде. Међутим, када брод почне да се креће долази до значајног поремећаја у пољу притиска у околној води, што уз појаву трења доводи до нарушавања равнотеже између сила које су деловале на брод у мировању. Код депласманских бродова који се крећу на мирној води нема значајније промене вертикалних сила, услед чега се при кретању газ брода практично не мења. Најизраженије су промене на силама које делују у правцу кретања брода.

Отпор брода (R_T) је сила којом је потребно гурати (или вући) брод кроз воду да би се кретао жељеном брзином у односу на воду. Ова резултујућа сила је једнака суми свих спољашњих сила које делују на брод у правцу кретања брода, а које су последица и хидродинамичких и аеродинамичких ефеката који се јављају при његовом кретању. Додатну потешкоћу представља и изузетно компликована интеракција између појединих хидродинамичких ефеката.

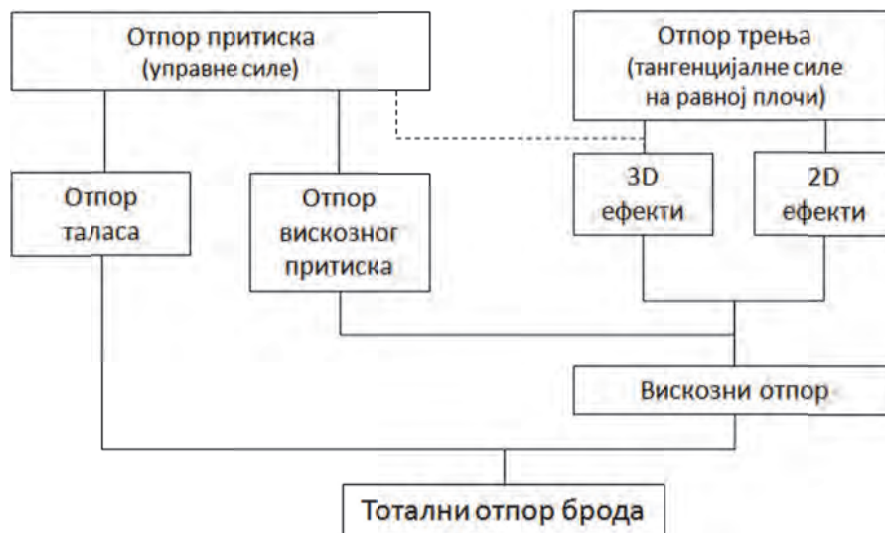
Постоји више начина како се сила отпора брода може рашчланити. Према једном, савременијем, најзначајније компоненте отпора брода су [26]:

- **отпор трења** – јавља се услед тангенцијалних сила које делују на труп брода, што је последица чињенице да је вода по својој природи вискозан флуид;
- **отпор притиска** – јавља се услед поремећаја поља притиска у води око брода, што доводи до низа ефеката који се значајно одражавају на интензитет силе отпора; неке од последица су:
 - отпор таласа – појава система таласа на чије формирање и одржавање се троши значајна енергија; са повећањем брзине кретања брода ова

компонента отпора расте; осим тога, при кретању брода, нарочито већим брзинама, неретко долази до појаве таласа који губе стабилност (долази до лома) и нестају, па према томе не опстају у таласном трагу али односе извесну енергију;

- отпор вискозног притиска – представља утицај граничног слоја, који је последица вискозних појава, на поље притиска око брода, а тиме и на силе које делују на брод у правцу кретања; ова појава је нарочито изражена у зони крме где суструјно поље значајно утиче на расподелу притиска по трупу брода;

Упрошћена шема са основним компонентама отпора је приказана на слици 3.1.



Слика 3.1 – Основне компоненте отпора брода [26]

Поред наведених компоненти отпора које су по интензитету и најутицајније, постоји и низ других ефеката и спољашњих утицаја на отпор брода, а који зависе од форме брода и његове брзине. Неки од ових утицаја су:

- **отпор вртлога** – при опструјавању брода на израженијим превојима оплате и на изданцима долази до појаве вртлога који се откидају са површине брода и одлазе ношени током воде, чиме се додатно расипа енергија;

- **отпор откидања** – код бржих објеката код којих је крмењача уроњена, може доћи до „откидања“ струјница са крмењаче и појаве потпритиска у зони крме што додатно повећава отпор;
- **отпор изданака** – сваки изданак (кормило, скег, скрок, ногавица пропелерског вратила, љуљне кобилице итд.) додатно утиче на повећање отпора; са порастом брзине овај утицај постаје израженији;
- **отпор храпавости** – зависи од храпавости оплате брода и директно утиче на отпор трења; са порастом брзине овај утицај постаје израженији јер је повећање брзине брода праћено смањењем дебљине ламинарног подслоја у граничном слоју услед чега неравнине на оплати могу довести до интензивније турбуленције;
- **отпор ваздуха** – непосредно зависи од изложене површине надводног дела брода; уколико је површина већа, већи је и отпор ваздуха;

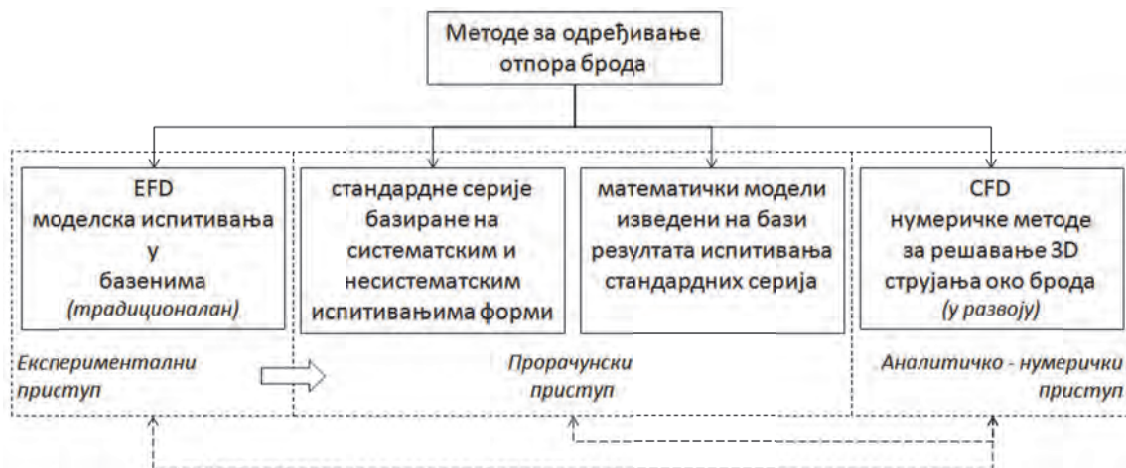
Услови експлоатације брода, такође значајно могу утицати на отпор брода:

- **обраштање** – са временом оплата брода обраста живим организмима из воде што повећава храпавост оплате и пропелера; интензитет обраштања зависи од специфичности екосистема пловних путева којима се брод креће; повећање храпавости оплате брода има за последицу повећање отпора трења;
- **утицај кормиларења** – приликом сваког отклона кормила, осим жељене попречне силе јавља се и сила у правцу кретања брода која повећава отпор кретању; интензитет ове силе је међутим занемарљив у односу на пораст отпора до кога долази услед заносу брода које је последица скретања; ово је нарочито важно у условима пловидбе ограниченим пловним путевима, какви су унутрашњи пловни путеви – реке и канали, где је неопходно често маневрисање;
- **ограничења пловног пута** – плитка вода и/или узан пловни пут, који су на рекама и каналима уобичајена појава, могу значајно утицати на повећање отпора кретању брода, некада и по неколико пута;

- **утицај ветра и таласа** – осим пораста отпора услед утицаја на надводни део брода, ветар је увек праћен таласима; обе појаве значајно могу значајно утицати на пораст отпора брода;
- **интеракција са објектима поред којих брод пролази** – било да су покретни (остали бродови) или непокретни сваки објекат поред кога брод пролази довољно близу ремети струјно поље око брода и тиме може утицати на отпор брода;

О већини поменутих, али и другим утицајима који су карактеристични за пловидбу рекама, ће бити више речи у поглављу седам.

Већина набројаних компоненти отпора данас се не може решити аналитичким методама са довољном тачношћу. Према томе, методе за одређивање отпора брода које су данас уобичајене углавном су базиране на експериментима. На слици 3.2 су по групама шематски приказане уобичајене инжењерске методе које се данас користе за одређивање отпора брода.



Слика 3.2 – Методе за одређивање отпора брода

Све методе помоћу којих је могуће одредити отпор брода, са мањом или већом тачношћу, се могу поделити у три основне групе:

- **Експериментална метода** (*EFD – Experimental Fluid Dynamics*) – подразумева моделска испитивања отпора брода; ово је најдиректнији и

најтачнији поступак за одређивање отпора брода у току израде пројекта који данас постоји; модел брода у одговарајућој размери се вуче помоћу колица дуж базена за моделска испитивања одговарајућом брзином и динамометром се мери сила којом колица вуку модел; потом се, на основу закона сличности између модела и брода, добијени резултати прерачунавају – екстраполирају на брод реалних димензија; ово је поступак који се успешно користи већ деценијама и на тај начин, паралелно са теоријским разматрањима, су и утврђене законитости које данас представљају основе овог сегмента бродске хидродинамике; данас у свету постоји више десетина института за бродску хидродинамику који се баве оваквим испитивањима;



Слика 3.3 – Базен за моделска испитивања у Дуизбургу (*DST*)

- **Прорачунске методе** (полу-емпиријске) – директно проистичу из експеримената
 - Данас постоји низ метода које су развијене на бази систематских или несистематских испитивања зависности отпора брода од брзине за различите типове бродова. Ове методе су развијене углавном на основу резултата испитивања, која су спроведена у базенима за моделска испитивања, а са циљем да се скрати време и смање трошкови израде пројекта новог брода.

- Увођењем рачунара у процес пројектовања брода време потребно за многе рачунске операције је значајно смањено. Међутим, дијаграми на којима су дати резултати моделских испитивања серија бродова у таквој форми нису погодни за примену на рачунарима. Да би се овај проблем превазишао, применом погодног математичког алата – регресионе анализе развијени су математички модели многих серија испитивања отпора. Многи од овако добијених математичких модела су данас саставни део софтверских пакета који се баве проблемима бродске хидродинамике. На овај начин, не само да је значајно смањено време потребно за израчунавање отпора брода, него је и отворена могућност да се кроз оптимизацију лакше дође до најбољег решења. У последње време се за развој нових математичких модела заснованих на испитивањима савремених форми бродова уместо регресионе анализе све чешће користи новија метода базирана на вештачким неуронским мрежама (*ANN – Artificial Neural Network*).
- **Аналитичко-нумеричке методе** – реч је о групи метода (*CFD – Computational Fluid Dynamics*) помоћу којих је нумеричким путем, уз извесна ограничења, могуће решити једначине струјања око брода. На тај начин, узимајући у обзир форму брода и физичке карактеристике воде и ваздуха, долази се до вредности појединих компоненти отпора брода. Велика предност овог приступа се огледа у томе што се на овако може анализирати утицај промена у форми брода на поједине компоненте отпора, а без великих материјалних улагања. Тако је могуће оптимизовати форму брода у циљу постизања већег степена енергетске ефикасности брода, а имајући у виду и остале пројектне захтеве. Међутим, велики недостатак овог приступа је недовољна тачност добијених резултата у квантитативном смислу, те се још увек не могу користити у свакодневној инжењерској пракси са довољном поузданошћу. Ипак, на даљем развоју ових метода се интензивно ради, уз сталну верификацију резултата кроз поређења са резултатима експеримената, те се према томе може очекивати да ће се и поузданост ових метода са временом побољшавати.

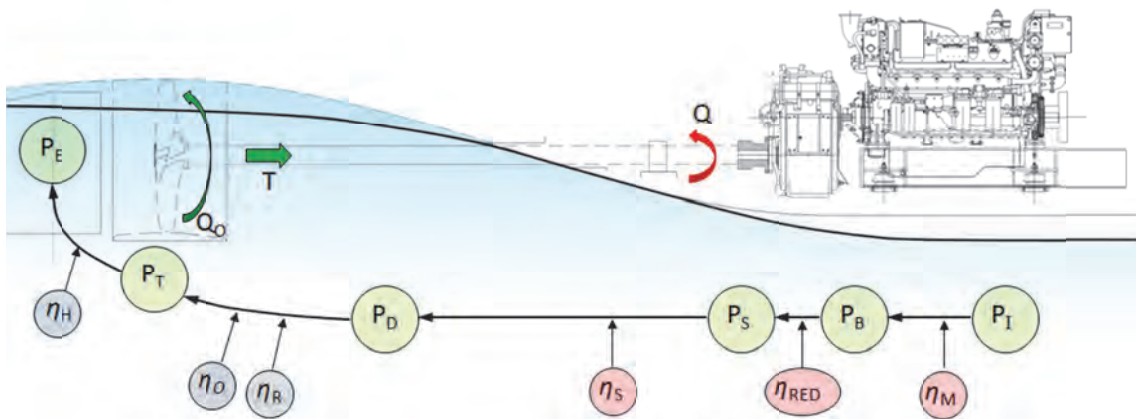
На основу свега изнетог може се закључити да је одређивање отпора кретању брода изузетно комплексан задатак.

Треба напоменути да међу десетинама постојећих полуемпиријских метода које су доступне у разним програмским пакетима, који се баве проблемима погона бродова, као и у стручној литератури, у току овог истраживања није пронађена ни једна метода за одређивање отпора која је развијена на основу испитивања речних самохотки. Овај проблем се најчешће решава тако што се користе методе које су развијене за одређене типове морских бродова уз примену извесних корекција. Међутим, како су форме морских бродова значајно другачије, остаје питање поузданости оваквог приступа. Према томе, моделска испитивања су тренутно једини довољно поуздан начин да се одреди зависност отпора од брзине речног самоходног теретног брода.

3.1.2 Пропулзија брода

Класичан пропулзивни комплекс речне самохотке, у зависности од величине и носивости, састоји се од једног или више погонских мотора, исто толико редуктора који смањују број обртаја на пропелерским вратилима и пропелера који обртни момент који долази од мотора преводе у силу потиска којом се савладава сила отпора кретању брода. Пренос снаге од мотора до пропелера и искоришћење расположиве снаге на пропелеру је процес који је праћен низом механичких и хидродинамичких губитака (видети слику 3.4). Сви ови губици се непосредно одражавају на енергетску ефикасност брода.

Сагоревањем погонског горива у цилиндрима, у мотору се развија индукована снага (P_I). Услед механичких губитака у самом мотору (η_M) на спојници мотора је на располагању нешто мања снага – кочиона снага (P_B). Ови губици су последица трења између елемената склопа мотора, али и услед тога што се одређени део развијене снаге користи за погон помоћних система мотора који су неопходни за његов рад (погон расхладне пумпе, погон пумпе уља за подмазивање, погон вентила, погон система за убризгавање горива, итд.).



Слика 3.4 – Шематски приказ тока снаге од мотора до пропелера

За погон речних самохотки најчешће се користе четвортактни, средње-брзоходи (400-600 грм) или брзоходи дизел мотори (1000-1800 грм). Да би се број обртаја на спојници мотора прилагодио оптималном броју обртаја пропелера неопходно је да у систему преноса снаге постоји редуктор. Механички губици у редуктору (η_{RED}) се крећу око 2-3%, тако да је излазна снага из редуктора (снага коју преноси вратило – P_S) нешто мања од кочионе снаге на спојници мотора. Даље, трење у лежајевима који носе вратило има за последицу додатне губитке (η_S) који се крећу између 2÷4%, што додатно умањује снагу која се може предати пропелеру (P_D). У случају погона брода кормиларско-пропулзивним уређајима (КПУ) губици у преносу снаге су нешто већи.

Степен корисног дејства пропелера (η_O) се одређује испитивањем модела пропелера у слободној вожњи у базену за моделска испитивања или у кавитационом тунелу, што зависи од кавитационог броја при коме се испитивање обавља. Међутим, присуство трупа брода испред пропелера значајно утиче на дострујавање воде пропелеру. Овај утицај се највише одражава на следеће:

- турбуленција у зони у којој пропелер ради иза брода је знатно израженија,
- дострујавање воде пропелеру није равномерно.

Ово значајно утиче на укупну ефикасност пропелера, који ради иза брода. Део утицаја трупа брода на хидродинамичку ефикасност пропелера узима се у обзир преко тзв. коефицијента прелаза (η_R), чија вредност се одређује експериментално

из теста аутопропулзије. Уобичајене вредности коефицијента прелаза се према [26] крећу између 0.95 и 1.05, у зависности од броја и карактеристика пропелера, као и форме брода. Према томе, ефикасност пропелера иза брода (η_B) може се одредити из израза:

$$\eta_B = \eta_O \cdot \eta_R.$$

Узимањем у обзир хидродинамичких губитака на пропелеру, од предате снаге (P_D) се долази до снаге потиска (P_T), коју пропелер заправо искористи.

Снага којом је потребно вући брод да би се кретао жељеном брзином (ефективна снага – P_E) се по интензитету разликује од снаге потиска пропелера. Ова разлика је последица интеракције између пропелера и трупа брода, чији део се узима у обзир преко коефицијента корисног утицаја трупа брода (η_H):

$$P_E = P_T \cdot \eta_H$$

Коефицијент корисног утицаја трупа зависи од форме брода, карактеристика пропелера и брзине кретања, а може бити и мањи и већи од један. Вредност овог коефицијента може се одредити из следећег израза:

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w}$$

где су : w – коефицијент суструјања,
 t – коефицијент смањеног потиска.

Поменуто је да присуство брода испред пропелера значајно ремети дострујавање воде пропелеру и тиме утиче на његову ефикасност. Ово је последица вискозности воде, односно присуства граничног слоја који се простире дуж брода и који је у зони крме најшири. Ово има за последицу да брод при кретању покреће велику количину воде, која се креће са бродом у правцу кретања брода. Отуда проистиче да брзина којом вода дострујава пропелеру (V_A) није једнака брзини којом се брод креће (V). Разлика између ове две брзине је последица суструјног поља у зони крме и квантитативно се исказује преко коефицијента ефективног суструјања (w):

$$w = \frac{V - V_A}{V}$$

Осим тога, пропелер својим радом убрзава воду у зони крме брода, што има за последицу:

- повећање тангенцијалних сила које делују на оплату, односно повећање отпора трења и
- смањење притиска (у складу са Бернулијевим принципом) испред пропелера што утиче на повећање отпора притиска.

Према томе, да би се брод кретао жељеном брзином неопходно је да пропелер оствари нешто већу силу потиска него што се добија мерењем силе отпора при кретању истом брзином када пропелер не ради. Овај ефекат се квантитативно исказује преко коефицијента смањеног потиска (t):

$$t = \frac{T - R_T}{T}$$

Вредности коефицијента суструјања и коефицијента смањеног потиска се одређују експериментално из резултата теста аутопропулзије.

Коначно, укупни коефицијент пропулзије (η_T), који представља укупне губитке пропулзивног комплекса брода, добија се множењем свих набројаних коефицијената:

$$\eta_T = \eta_{RED} \cdot \eta_S \cdot \eta_O \cdot \eta_R \cdot \eta_H$$

Ефикаснији пропулзивни комплекс брода свакако доприноси бољој енергетској ефикасности брода. Да би ефикасност пропулзивног комплекса била максимална потребно је да свака од компоненти буде на оптималном нивоу. На смањење механичких губитака у редуктору и у лежајима пропелерског вратила, који су ионако мали, не може се значајније утицати. Међутим, хидродинамички губици, на које одлази некада и преко 50% енергије, могу се умањити:

- избором повољније форме брода,
- уградњом оптималног/оптималних пропелера,

- применом разних решења којима се побољшава дострујавање воде пропелерима,
- применом решења којима се боље користи енергија одлазног вртлога иза пропелера.

За разлику од морских бродова, који у уобичајеним околностима плове у води неограничене дубине, речне самохотке су подређене пловидби у плиткој води. Ово се, између осталог, одражава и на ефикасност пропулзивног комплекса брода. Услед ограничења газа брода, на речним самохоткама често није могуће уградити пропелер довољно великог пречника, који је потребан за остварење максималне ефикасности пропелера. Да би се ово донекле превазишло често се на самохоткама могу срести тзв. тунели на крми (скица дата на слици 3.4), где се крма изнад пропелера „укопава“ да би било могуће уградити пропелер већег пречника и тиме остварити већа ефикасност. Најчешће ни то није довољно, па се уместо класичних пропелера уграђују пропелери у сапницама.

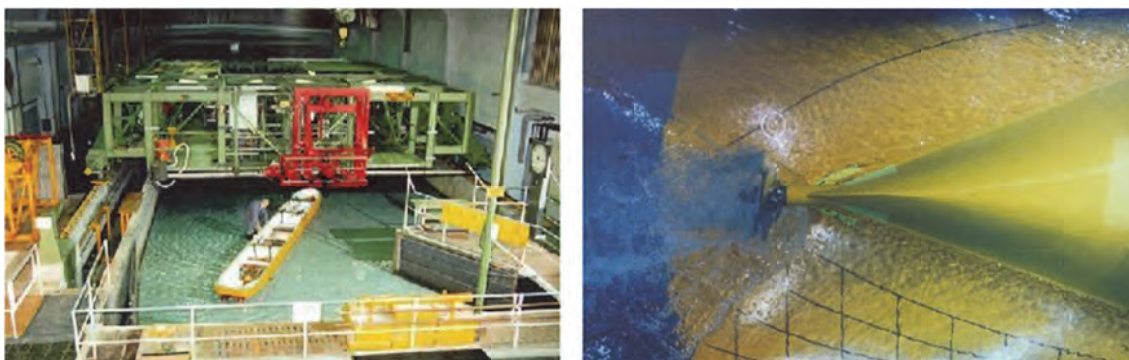
На ефикасност погона самохотки, осим примењених техничких решења, значајно утичу и спољашњи фактори. Ограничења пловног пута, брзина тока реке, храпавост оплате услед обраштања итд., осим на вредност отпора брода утичу и на дострујавање воде пропелеру, а тиме и на вредности коефицијената пропулзије. О овоме се данас недовољно зна. Не постоји ни једна метода, а ни препорука, за процену утицаја дубине воде на вредности коефицијената пропулзије. Нека истраживања су показала да укупни коефицијент пропулзије при пловидби у плиткој води може опасти и за више од 20% [29]. Ако се овоме дода пораст отпора до кога долази приликом пловидбе ограниченим пловним путем, може се наслутити са каквим се изазовима суочавају пројектанти речних самохотки. Овде треба имати у виду да су услови за пловидбу који важе на унутрашњим пловним путевима променљиви и да у великој мери зависе од водостаја, а што је последица, између осталог и климатских утицаја.

Осим тога, да би се остварила већа економичност транспорта, данас самохотке врло често плове у саставу са једном или више баржи, с тим да им пропулзивни

комплекс, упркос довољно снаге погонских мотора, често није оптимизован за такве околности. Неретко су ти састави асиметрични, односно једна од баржи је за самохотку везана уз бок, што додатно отежава дострујавање воде пропелеру. Ова појава је утолико израженија уколико је дубина воде мања.

Према томе, проблем погона речних самохотки је знатно комплекснији у односу на морске бродове, те је ово вероватно један од кључних разлога што данас не постоји ни једна инжењерска прорачунска метода за решавање проблема пропулзије ових бродова. У том смислу, поставља се питање оправданости систематских испитивања отпора самохотки, када се о коефицијентима пропулзије тако мало зна. Без познатих вредности коефицијената пропулзије није могуће искористити податке о зависности отпора од брзине на адекватан начин приликом израде пројекта пропулзивног комплекса самохотке.

Због свега поменутог, данас се моделска испитивања отпора форми самоходних речних теретних бродова врло ретко спроводе. Далеко су чешћа испитивања модела самохотки у које су уграђени модели пропелера и који се у базенима покрећу симулирајући реалне околности.



Слика 3.5 – Моделско испитивање пропулзивних карактеристика у плиткој води у институту за бродску хидродинамику у Дуизбургу (*DST*)

На тај начин мери се снага која је на одређеном броју обртаја пропелера потребна да би се брод кретао жељеном брзином, узимајући у обзир спољашња ограничења и индиректно њихов утицај на интеракцију између трупа брода и пропулзивног комплекса.

Да би брод у реалним околностима могао да одржи захтевану брзину, упркос разним спољашњим утицајима, неопходно је да уграђени мотор/мотори располажу са довољно резерве снаге. За морске бродове постоје препоруке које се односе на резерву снаге у зависности од временских околности које су типичне за подручје пловидбе брода [30]. У случају речних самохотки таквих препорука за сада нема.

3.2 Значај разматрања енергетске ефикасности бродова

Проблем енергетске ефикасности бродова је нешто чему се већ доста дуго посвећује велика пажња, а са временом ово питање постаје све значајније. Резерве нафте, чији деривати данас покрећу бродове широм света и који су још увек без праве алтернативе, полако али сигурно се троше. Ово отвара низ питања у погледу одрживости, даљег развоја и унапређења ове значајне гране транспорта, без које је тешко замислити свет у будућности. Већ извесно време чине се велики напори у циљу проналажења алтернативног погонског горива, међутим сва досадашња решења или су недовољно истражена, или је развој пратеће инфраструктуре скуп и још увек нерентабилан. Ипак, на овом пољу је до сада остварен значајан напредак.

Паралелно са трагањем за алтернативним изворима енергије, интензивно се истражују могућности за смањење потрошње горива, не угрожавајући при томе прогресиван економски развој. У том смислу, данас постоји низ техничких решења чија је основна сврха смањење губитака, односно редукација потрошње горива, а тиме и повећање ефикасности погона бродова. Нека од ових решења су захтевинија и подразумевају другачију концепцију пропулзивног комплекса уз примену савремених ситета (као на пример могућности које се отварају увођењем комбинованог дизел-електричног погона), те се могу применити искључиво на бродовима који се тек граде. Са друге стране, нека од техничких решења су далеко једноставнија и могу се применити и на већ постојећим бродовима. Овде се пре свега мисли на разне „додатке“ који служе да побољшају дострујавање

воде пропелеру, или имају за циљ додатно искоришћење енергија која се губи у одлазној струји воде иза пропелера. И истраживања али и досадашња пракса, када је о морским бродовима реч, показали су да би уз релативно ниске трошкове уградње, применом неких од постојећих решења, дугорочно гледано, било могуће постићи добре резултате. Извесно је да се нека од достигнућа могу успешно применити и на речним бродовима.

Смањење потрошње горива се повољно одражава на више важних аспеката када је о транспорту робе бродовима реч, од којих су најважнији:

- Цена горива је значајна ставка у цени транспорта. Код морских бродова, који и тако немају алтернативу јер ни један други вид транспорта не може да их замени, смањење потрошње горива је веома важно јер се непосредно одражава на смањење трошкова транспорта. Међутим, питање смањење потрошње горива је још значајније за бродове за пловидбу унутрашњим пловним путевима. Речни бродови у железничком и друмском транспорту имају јаку конкуренцију, па би већом ефикасношћу били конкурентнији и лакше долазили до клијената.
- Количина штетних гасова, који се при сагоревању горива емитује у атмосферу, директно је пропорционална потрошњи горива. Према томе, у еколошком смислу, свакако да ће смањење потрошње горива повољно утицати на количину штетних гасова који се емитују у атмосферу. Ова тема је изузетно актуелна и из године у годину се утицају транспорта на екологију придаје све већа пажња. У том смислу, активно се ради на успостављању прописа који ограничавају прекомерно загађење, што би дугорочно гледано требало да има значајне резултате.

3.2.1 Еколошки аспект енергетске ефикасности транспорта робе пловним путевима

Према подацима који су доступни, а које је објавио *MEPC* [32], у 2007. години у атмосферу је ослобођено укупно 32 милијарде тона угљен-диоксида. Од тога око

3.3% долази са бродова широм света. Поређења ради, према истом извору, друмски транспорт је у атмосферу емитовао око 6.5 пута више CO_2 .



Слика 3.6 – Расподела емисије CO_2 по привредним гранама (лево) и процентуално учешће појединих видова транспорта (десно) према подацима из 2007. године [32]

Овде се не жели умањити штетан утицај осталих гасова из издувне емисије, од којих су неки, краткорочно гледано, знатно опаснији по здравље људи. Подаци који су дати се односе на CO_2 управо из разлога што је утицај CO_2 на глобалне климатске промене изузетно битан. Осим тога, концентрација осталих гасова, који се ослобађају сагоревањем горива, далеко је мања.

Уколико се ништа не би предузело и уколико би се наставио досадашњи тренд пораста количине транспортоване робе, процењује се да би до 2050. године количина CO_2 коју би емитовали бродови у свету порасла и до 250% у односу на податке из 2007. године [32].

Иако су бродови у суштини „мали“ загађивачи у поређењу са неким другим привредним активностима, у контексту општих настојања да се нарушавање екосистема издувним гасовима стави под контролу, ни бродови нису заобиђени.

Имајући у виду глобалне климатске промене, које су узроковане загађењем атмосфере, већ неко време се активно ради на томе да се пораст загађења ублажи

и да се сагледају све последице климатских промена како би се боље припремили за време које долази. У том смислу, у оквиру активности поткомитета *ИМО*-а који је задужен за заштиту животне средине (*МЕРС*), последњих година се ради на развоју тзв. индекса енергетске ефикасности, који би требало да омогуће квантитативно поређење енергетске ефикасности постојећих бродова и да успоставе смернице за пројектовање ефикаснијих бродова у енергетском смислу.

3.2.2 Индекс енергетске ефикасности при пројектовању – *EEDI*

На првом састанку радне групе која је формирана у оквиру *МЕРС*-а са циљем успостављања критеријума који се односе на емисију гасова који утичу на климатске промене, а који је одржан 2008. године, предложено је увођење индекса енергетске ефикасности при пројектовању – *EEDI* (*Energy Efficiency Design Index*). По својој суштини овај показатељ представља однос количине емитованог угљен-диоксида у атмосферу (цене која је плаћена у еколошком смислу) и количине терета која је при томе превезена, односно добити која је при томе остварена:

$$EEDI = \frac{P_B \cdot SCF \cdot CF}{K \cdot V_{ref}} \left[\frac{g \text{ CO}_2}{t \cdot km} \right]$$

где су :

- P_B – ангажована снага мотора,
- SCF – специфична потрошња горива,
- CF – специфични коефицијент емисије CO_2 ,
- K – капацитет брода,
- V_{ref} – референтна брзина брода.

Предложени образац пре свега је осмишљен као показатељ енергетске ефикасности новог брода у току израде пројекта. У том случају вредности величина које су неопходне за израчунавање *EEDI* није могуће непосредно мерити, него се одређују на основу пројектне документације. При томе, подразумева се да брод плови у неограниченој води и без спољашњих утицаја, који би на било који начин могли реметити кретање брода. Ово свакако не значи

да се на пробним вожњама не може директним мерењима проверити израчуната вредност. Међутим, у случају провере треба водити рачуна да се из измерених резултата елиминишу сви спољашњи утицаји који су уочени приликом мерења.

Према препоруци, ангажована снага која се користи за израчунавање индекса *EEDI* треба да износи 75% од номиналне снаге мотора на спојници која је умањена за снагу коју директно са мотора користе остали помоћни уређаји.

Специфична потрошња горива, за главне погонске моторе, читава се из *EIAPP* (*Engine International Air Pollution Prevention*) сертификата, при оптерећењу мотора које одговара ангажованој снази. Овај документ се издаје у складу са *IMO* прописима и представља сведочанство о емисији оксида азота при раду мотора. Количина ослобођених *NOx*, у складу са прописима, не би смела да пређе дозвољене границе.

Специфични коефицијент емисије подразумева масу CO_2 која се ослободи сагоревањем једне тоне горива. Према подацима који су дати у [33] вредност овог коефицијента се може усвојити, у зависности од горива које се користи за погон брода, из следеће табеле:

Табела 3.1 – Специфични коефицијент емисије CO_2

Врста горива	CF [t CO_2 /t горива]
Дизел гориво	3.206
Лако дизел гориво (<i>LDF</i>)	3.151
Тешко дизел гориво (<i>HDF</i>)	3.114
LPG	3.000 – пропан 3.030 – бутан
LNG	2.750

Под капацитетом брода подразумева се оптерећење брода за које се прорачун спроводи. Према препорукама, за капацитет брода у зависности од типа брода, треба усвојити:

- 65% дедвејта уколико се ради о бродовима за превоз контејнера,
- максималну дозвољену количину терета у тонама (остали теретни бродови),

- код путничких бродова се користи GT у складу са међународном конвенцијом о тонажи из 1969. године.

Референтна брзина је брзина коју брод може да развије при ангажованој снази мотора у пловидби без спољашњих утицаја (таласи, ветар, морске струје, плитка вода, итд.) и при захтеваном оптерећењу.

На овај начин је дефинисан поступак за одређивање индекса енергетске ефикасности при пројектовању брода у својој најједноставнијој форми. Како би при одређивању индекса *EEDI*, у фази пројектовања брода, било могуће узети у обзир:

- утицај помоћних мотора (генератора),
- иновативна решења у систему погона, која су примењена у циљу повећања ефикасности,
- поједине специфичности пројекта попут ојачања конструкције за пловидбу кроз лед итд.
- разна техничка ограничења у погледу носивости брода

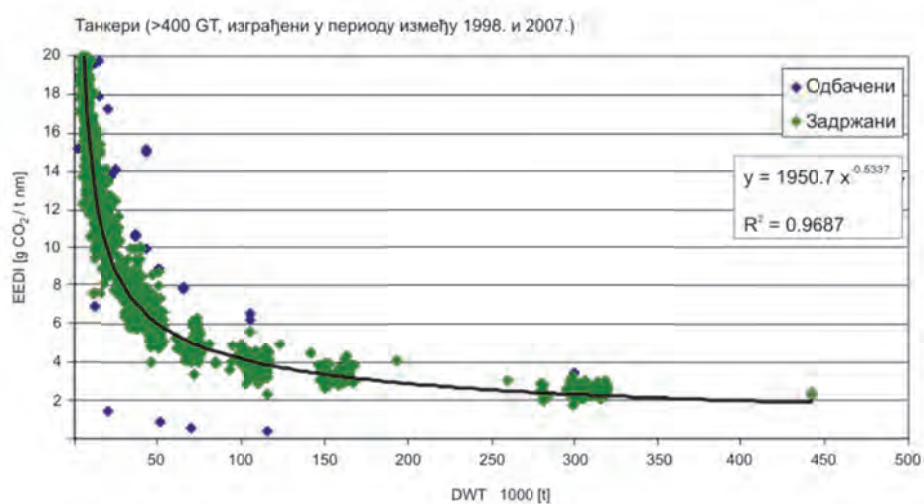
кроз низ допуна дошло се до коначног обрасца за одређивање индекса *EEDI*, који има следећи облик [34]:

$$\begin{aligned}
 EEDI = & \frac{(\prod_{j=1}^M f_j) (\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{MEi} \cdot C_{F_{MEi}} \cdot SFC_{MEi}) + (P_{AE} \cdot C_{F_{AE}} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot m_T \cdot V_{ref} \cdot f_W} + \\
 & + \frac{\left((\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} PTI_i - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff(i)}} \right) \cdot C_{F_{AE}} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot m_T \cdot V_{ref} \cdot f_W} - \\
 & - \frac{(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{F_{ME}} \cdot SCF_{ME})}{f_i \cdot m_T \cdot V_{ref} \cdot f_W}
 \end{aligned}$$

Више детаља о појединим члановима овог израза може се пронаћи у документу [33]. У овом раду неки чланови нису додатно објашњени из разлога што би за њихово узимање у обзир при израчунавању индекса *EEDI* требало располагати са много више информација о броду, а што је и иначе ретко доступно. Врло често,

при одређивању вредности овог индекса, али и при верификацији на пробној возњи, из практичних разлога користи се једноставнија форма.

До данас су за поједине типове морских бродова, на основу израчунатих вредности индекса *EEDI* за велики број бродова истог типа, успостављене тзв. референтне вредности које се могу користити за оцену енергетске ефикасности новог брода.

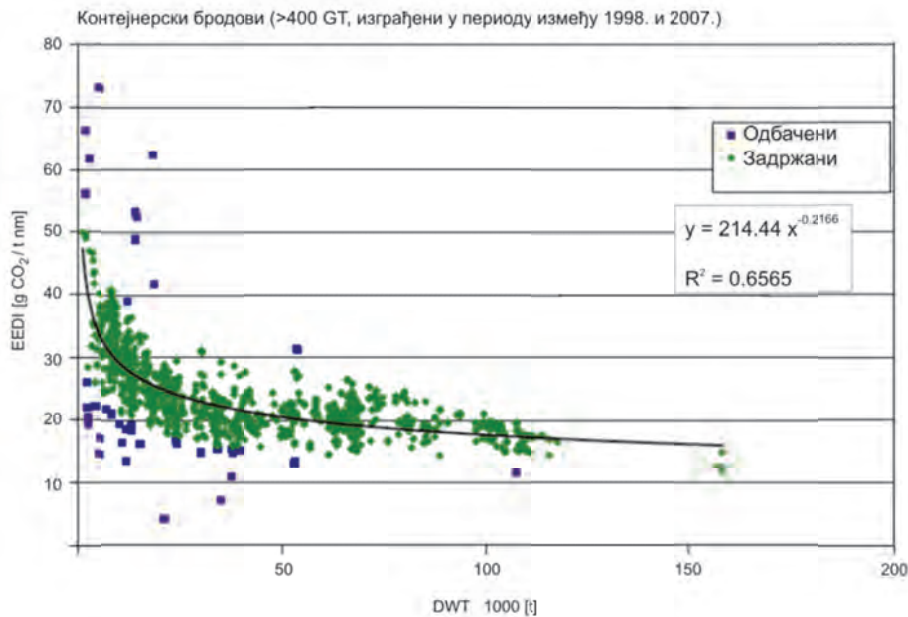


Слика 3.7 – Зависност индекса *EEDI* од величине танкера и предложена референтна крива [34]

Предложена референтна крива за танкере је добијена као средња вредност свих израчунатих вредности индекса *EEDI* за велики број морских танкера различитих димензија. Свака тачка у дијаграму представља један брод. При томе су вредности које су се значајније разликовале од осталих (плаве тачке) одбачене и нису узете у разматрање. Као што се могло и очекивати, показало се да су бродови у енергетском смислу утолико ефикаснији уколико им је носивост већа.

На основу датог предлога није тешко упоредити вредност израчунатог индекса енергетске ефикасности било ког брода који је танкер (било да је у фази пројекта или да је већ постојећи брод) са референтним вредностима, а у циљу провере пројектоване/остварене енергетске ефикасности.

На сличан начин успостављена је референтна крива и за морске контејнерске бродове која је приказана на следећем дијаграму.



Слика 3.8 – Зависност индекса *EEDI* од величине контејнерских бродова и предложена референтна крива [34]

Осим за танкере и контејнерске бродове овакве анализе постоје и за неке друге типове морских бродова.

Из формулације предложеног израза за одређивање индекса енергетске ефикасности је сасвим јасно да се већа енергетска ефикасност брода може остварити на следеће начине:

- 1) оптимизацијом форме брода и применом савремених премаза за оплату против обраштања – како би се смањио отпор брода,
- 2) оптимизацијом пропульзивног комплекса и применом техничких решења за побољшање дострујавања воде пропелерима, чиме би се смањили губици у пропулзији,
- 3) применом техничких решења која би имала за циљ боље искоришћене енергије и
- 4) употребом горива са мањим процентом угљеника.

3.2.3 Индикатор енергетске ефикасности у експлоатацији – *EEOI*

Поткомитет *IMO*-а задужен за заштиту животне средине (*MEPC*) је на свом 59. заседању 2009. године предложио увођење и индикатора енергетске ефикасности брода у експлоатацији. Сврха увођења овог показатеља је да се квантификује енергетска ефикасност бродова у експлоатацији. На тај начин је могуће поредити различите постојеће бродове истог типа у погледу енергетске ефикасности, али и пратити како се енергетска ефикасност једног брода мења у зависности од начина експлоатације (одабрана брзина, количина терета, изабрани пловни пут, итд.) и у зависности од динамике одржавања стања оплате и пропелера.

Према датој препоруци, индикатор *EEOI* (*Energy Efficiency Operational Indicator*) за једно путовање може се израчунати из следећег израза:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \cdot CF_j}{m_c \cdot D}$$

где су :

- FC – маса потрошеног горива,
- CF – специфични коефицијент емисије CO_2 ,
- m_c – маса терета, број контејнера или путника, односно *GT* у зависности од типа брода,
- D – пређени пут,
- j – врста горива.

Индикатор *EEOI* може се посматрати и у одређеном временском периоду у коме брод може обавити више (i) путовања:

$$EEOI = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ij} \cdot CF_j)}{\sum_i (m_{ci} \cdot D_i)}$$

Овај показатељ је развијен пре свега у циљу оптимизације процеса експлоатације брода.

4

База резултата мерења апсорпције снаге речних самоходних теретних бродова

4.1 Анализа главних димензија самохотки

У циљу шире анализе енергетске ефикасности речних самохотки, формирана је база са подацима са 102 испитивања речних самоходних теретних бродова до којих је било могуће доћи. За сваки од бродова на располагању су осим основних димензија и резултати мерења апсорпције снаге, било да је реч о моделским испитивањима или испитивањима у природној величини. Ово је посебно важно јер је циљ овог истраживања управо анализа енергетске ефикасности речних самохотки. Иако је прилично тешко организовати директно мерење апсорпције снаге на броду, понекад је теже доћи до резултата мерења која су обављена од стране других институција. Један од разлога за ово је што данас не постоји уређена база резултата испитивања, већ постојећи резултати сачувани у разним

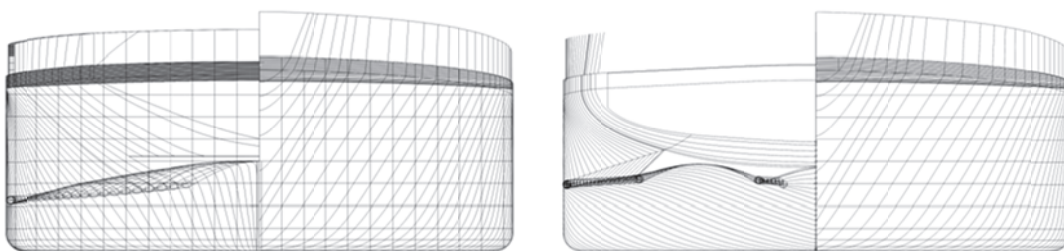
извештајима, који су се у протеклим деценијама „погубили“ по разним архивама. Други разлог је и сасвим комерцијалне природе. Институтима за бродску хидродинамику, које се иначе баве овим истраживањима, далеко се више исплати да продају своја искуства, него да их објављују у научним и стручним часописима. Према томе, база података која је формирана за потребе израде ове дисертације је вероватно једна од обимнијих које данас постоје у овој области. Табела са основним димензијама разматраних бродова дата је у прилогу 1.

Базу података чине три групе испитивања:

- **Прва група** се састоји од 53 испитивања бродова, који су за потребе различитих истраживања коришћени, а потом заједно са резултатима представљени у разним часописима или доступним извештајима. Неки од разматраних бродова су и концепти чији је циљ сагледавање могућих праваца у даљем развоју овог типа речних бродова. Оно што треба споменути је да у подацима из ове групе често није било наглашено да ли се ради о моделским испитивањима или о испитивањима у природној величини. Ова чињеница је нарочито важна, како се касније показало, за анализу резултата мерења апсорпције снаге, а што је детаљно разматрано у наредним поглављима.
- **Друга група** података се односи на доступне извештаје са 20 моделских испитивања, а која су углавном спроведена у институту за бродску хидродинамику у Дуизбургу и који су добијени кроз директну сарадњу са поменути институтом. Димензије ових бродова одговарају димензијама, раније описаних, постојећих класа речних самохотки.
- **Трећу групу** чини 29 испитивања бродова у природној величини, на пробном вожњама или у експлоатацији. Распоживи подаци су прикупљени из доступних извештаја, а међу овим бродовима су и они на којима су обављена директна мерења, у оквиру истраживања које је спроведено при изради дисертације.

Имајући у виду да је база формирана на основу информација које су биле доступне, а које потичу из различитих извора и различитих временских периода, приметна је недовољна систематичност у прикупљеним подацима. Примера ради, у неким извештајима је била дата дужина брода између перпендикулара, у другим дужина на водној линији, а у трећим дужина „преко свега“. Негде је био дат депласман брода, а негде носивост. За неке од разматраних бродова је наведена оквашена површина, а за неке није. Да би било могуће развити одговарајући математички модел и спровести анализу енергетске ефикасности бродова, који су обухваћени формираном базом података, било је неопходно проценити вредности података који су недостајали. У том циљу даља анализа се одвијала у два правца:

- На основу расположивих података за бродове за које су све потребне димензије биле познате, развијен је низ емпиријских израза којима је успостављена веза између појединих величина. Изведени изрази су коришћени за процену димензија оних бродова за које није било довољно података.
- На основу усвојених форми (са једним и са два пропелера) које су дате на слици 4.1, варијацијама дужине, ширине и газа, помоћу програмског пакета *AutoShip* одређена је промена дужине на водној линији, положаја тежишта истиснућа и оквашене површине. Овај, у извесној мери, приближан приступ коришћен је за процену оних величина за чије одређивање на основу расположивих података није било довољно информација. Извесно је да на овај начин процењене димензије нису сасвим тачне, али у тренутку писања овог рада није било поузданијег начина.



Слика 4.1 – Планови ребара бродова који су коришћени за процену L_{vl} , S и LCB

Основне димензије бродова, које су на описани начин процењене, у табели датој у прилогу 1 посебно су назначене (косим фонтом).

На описани начин изведени су следећи изрази:

4.1.1 Дужина брода на водној линији

Дужина водне линије брода, у зависности од дужине „преко свега“ и газа, приближно се може одредити помоћу следећег израза:

$$L_{wl} = 0.9776 \cdot L_{oa} + 1.429 \cdot T - 3.03,$$

где су: $T [m]$ - газ брода
 $L_{oa} [m]$ - дужина „преко свега“

Приликом извођења овог израза максимална дужина брода је варирана у интервалу између 63 и 135 метара, а газ је мењан у интервалу између 1.25 и 3 метра. Према томе, ове границе треба сматрати и границама за примену предложеног израза.

4.1.2 Положај тежишта истиснућа

Положај тежишта истиснућа, мерено од главног ребра, може се приближно одредити помоћу следећег израза:

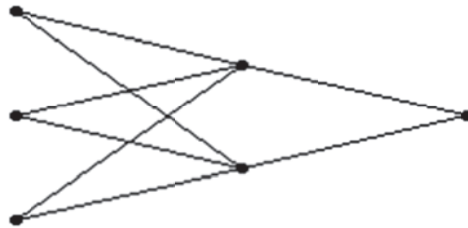
$$LCB [m] = (4.505 - 1.114 \cdot T) / (2.329 - 0.012 \cdot L_{oa})$$

У свим разматраним случајевима положај тежишта истиснућа је био испред главног ребра и имао је позитиван предзнак.

Границе за примену израза су исте као у случају израза за дужину водне линије брода.

4.1.3 Оквашена површина брода

При одређивању зависности оквашене површине брода од осталих димензија усвојене су три независне променљиве: дужина, ширина и газ брода на водној линији. Како сада имамо три независне променљиве, за разлику од претходна два израза, за извођење је било неопходно користити сложенији математички поступак, па је изабрана *ANN (Artificial Neural Network)* метода. У циљу добијања што једноставнијег модела усвојена је мрежа са 2 чвора у једном скривеном слоју (видети слику 4.2). Ова метода је детаљније објашњена у прилогу 4.



Слика 4.2 – Конфигурација усвојене неуронске мреже

На описани начин изведен је следећи израз:

$$S[m^2] = \left(\text{Tanh}(1.89057 - 0.41128 * \text{Tanh}(0.88283 - 0.81019 * (0.012074 * Lvl - 0.66973) - 1.04232 * (0.062937 * Bvl - 0.40315) - 0.27655 * (0.514286 * T - 0.59286))) + 1.57202 * \text{Tanh}(-4.32258 + 1.80883 * (0.012074 * Lvl - 0.66973) + 1.7995 * (0.062937 * Bvl - 0.40315) + 0.58573 * (0.514286 * T - 0.59286))) + 0.10999 \right) / 0.000314$$

где су: $T [m]$ - газ брода
 $Lvl [m]$ - дужина брода на водној линији
 $Bvl [m]$ - ширина брода на водној линији

Упркос примене најједноставније конфигурације неуронске мреже добијен је релативно компликован израз. Међутим, провером стабилности изведеног математичког модела, показало се да у следећим границама:

$$60 \text{ m} \leq Lvl \leq 135 \text{ m}$$

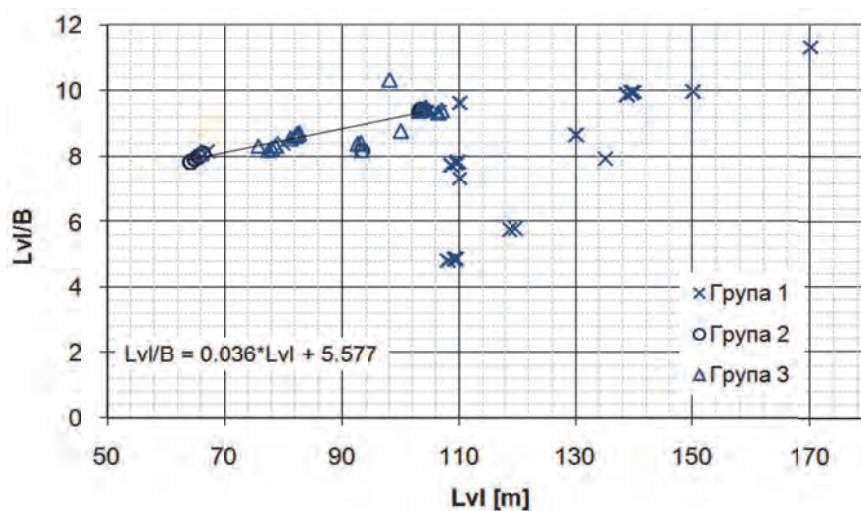
$$7 \text{ m} \leq Bvl \leq 20 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} \leq T \leq 3 \text{ m}$$

модел даје добре резултате без знакова нестабилности. Средње квадратно одступање усвојеног модела износи 1.74%. Применом изведеног израза може се проценити оквашена површина брода и у случају када је газ брода већи од 3 метра, али уз опрез јер ова област, при анализи стабилности математичког модела, није довољно проверена.

4.1.4 Област која је покривена прикупљеним подацима

На основу прикупљених података, који су допуњени променом предложених израза и који су дати у прилогу 1, одређени су неки од односа између основних карактеристика разматраних бродова и приказани су на дијаграмима датим на сликама 4.3 и 4.5.



Слика 4.3 – Зависност односа дужине и ширине брода од дужине брода на водној линији

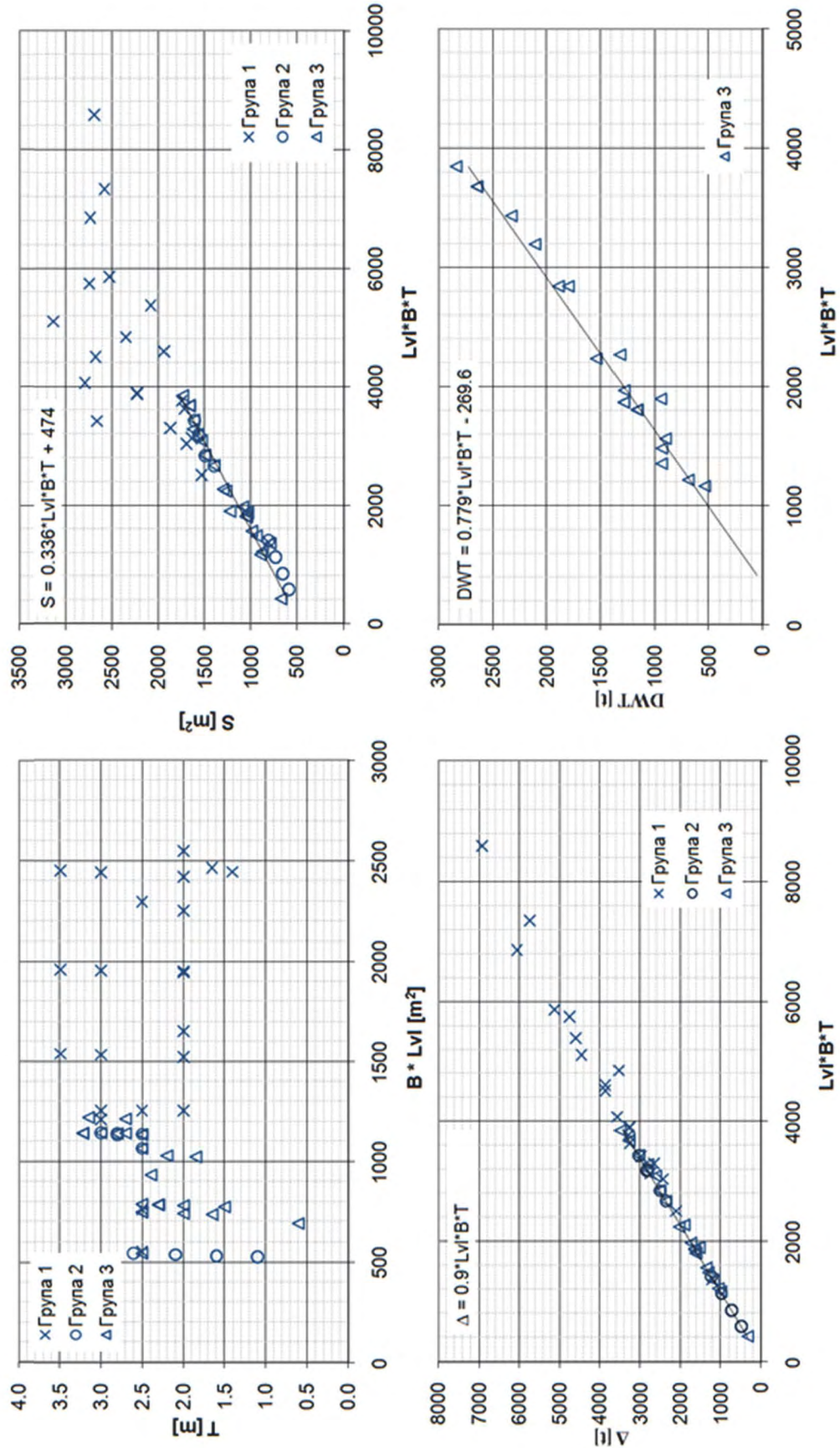
Из дијаграма (слике 4.3 и 4.5) може се сагледати област која је покривена прикупљеним подацима, односно могу се сагледати неке од релација које важе између појединих димензија речних самоходних бродова.

Вредности у дијаграмима дате су у складу са раније дефинисаним групама података.

Са претходног дијаграма (слика 4.3) може се уочити да су вредности које карактеришу бродове из група 2 и 3, а чије дужине не прелазе 110 метара, груписане, јасно указујући на карактер зависности. Према томе, пуном линијом, као и приложеном једначином, описана је зависност односа дужине и ширине од дужине брода на водној линији, за бродове краће од 110 метара . У случају бродова из групе 1 је приметно значајније расипање вредности, односно другачији карактер промене. Овакве резултате је лакше разумети уколико се има у виду да су у овој групи и нетипични бродови који су развијани за посебне намене (*Ro-Ro*, велики контејнерски, бродови попут брода који је приказан на слици 4.4, итд.), али и бродови који су испитивани у циљу сагледавања потенцијалних могућности даљег развоја речних самоходних теретних бродова (бродови шири од 11.45 метара и/или дужи од 110 метара).



Слика 4.4 – Самоходни теретни брод дужине 171 метар
(самохотка + припадајућа баржа)



Слика 4.5 – Неке од карактеристичних величина у зависности од дужине, ширине и газа брода

Из дијаграма на коме је дата зависност газа брода од производа дужине и ширине, а који је дат на слици 4.5, може се приметити да су испитивања некада рађена за исти брод на више различитих газова како би се стекао бољи увид у снагу коју је потребно ангажовати у циљу постизања жељене брзине. Иначе, у последње време све ређе се спроводе мерења на реалним бродовима на начин да је могуће унапред задати газ брода или га је у току мерења могуће прилагођавати специфичним захтевима истраживања. На ово данас углавном утичу економски фактори. У складу са тим, мерења се најчешће обављају у току комерцијалне пловидбе брода, на оном газу који зависи од количине уговорене робе која се превози.

На преосталим дијаграмима, који су дати на слици 4.5, може се уочити јасна корелација између оквашене површине, депласмана и дедвејта брода у зависности од тзв. кубног модула. У случају вредности оквашених површина, бродова из групе 1, уочљиво је нешто веће расипање, при чему су разлози за овакву расподелу раније наговештени.

На основу уочених корелација између појединих димензија постојећих самохотки и приложених израза који су изведени на основу прикупљених података у фази пројектовања је могуће проценити основне димензије брода. Овде треба водити рачуна о томе да су дати изрази базирани на подацима који се односе на бродове чије дужине не прелазе 110 метара. Према томе, изрази се не могу користити за процену карактеристика дужих бродова.

Табела 5.1 – Изведени емпиријски изрази којима је успостављена веза између основних геометријских карактеристика разматраних самохотки

Дужина у зависности од ширине брода:	$Lvl = (5.577 * B) / (1 - 0.036 * B)$
Оквашена површина:	$S = 0.336 * Lvl * B * T + 474$
Депласман брода:	$\Delta = 0.9 * Lvl * B * T$
Носивост брода:	$DWT = 0.779 * Lvl * B * T - 269.6$

Раније је констатовано да је ширина самохотке у великој мери ограничена карактеристикама пловног пута, те је израз за одређивање дужине брода који је дат на слици 4.3 модификован, и томе прилагођен.

Дате изразе никако не треба прихватити као обавезујуће, већ као смернице, које уз остала ограничења и пројектне захтеве треба да олакшају одабир главних димензија брода.

4.2 Прва група испитивања – Резултати мерења прикупљени из доступних извештаја

При истраживању које је спроведено за потребе израде дисертације није пронађена ни једна поуздана инжењерска метода за одређивање зависности отпора од брзине за ову групу бродова, као и за одређивање утицаја дубине и ширине пловног пута на коефицијенте пропулзије. Према томе, експериментална испитивања су једини довољно поуздан пут. Међутим, како је раније речено, до резултата испитивања хидродинамичких карактеристика речних самоходних теретних бродова није лако доћи.

Како би се умањили трошкови пројектовања често се самохотке пројектују у складу са позитивним бродограђевним искуством – по узору на друге бродове истог типа који су се добро показали у пракси. Међутим, на тај начин се осим добрих страна на нове пројекте преносе и потенцијалне грешке са постојећих бродова. Осим тога, без могућности аналитичког приступа проблемима бродске хидродинамике тешко је очекивати било какав искорак у погледу побољшања енергетске ефикасности бродова који ће бити грађени у будућности.

Како би се начинио искорак, у оквиру овога рада, систематично је прегледана комплетна документација која је на почетку истраживања била на располагању и оформљена је база свих до тада доступних резултата испитивања која су обављена у протеклих неколико деценија. Због утицаја дубине воде на коефицијенте

пропулзије који је значајан, а који раније није систематски испитиван из чега би проистекла метода за процену вредности, одлучено је да се у овом раду истраживање ограничи на доступне резултате мерења апсорбоване снаге. Према томе, сва расположива мерења отпора бродова овде су изостављена јер се из тих вредности не може поуздано одредити снага која је потребна за постизање захтеване брзине, односно за даљу анализу енергетске ефикасности брода.

Значајан извор података, који су коришћени у раду, су извештаји са мерења која су обављена у институту за бродску хидродинамику у Дуизбургу (некадашњи *VBD*, а данас *DST*), а која су доступна на интернет презентацији института. Осим тога, неки од коришћених извештаја су добијени кроз директну сарадњу између Катедре за бродоградњу и поменутог института.

Резултати испитивања који су овде дати спадају у испитивања бродова из групе 1 и приказани су у форми дијаграма у прилогу 2.

Ова група података садржи испитивања бродова чије се димензије крећу у следећим границама:

Табела 4.2 – Област обухваћена испитивањима бродова из групе 1

Димензије брода	Минимална вредност	Максимална вредност	Параметар брода	Минимална вредност	Максимална вредност
Loa	67	170	L/B	4.8	11.3
B	8.2	22.4	B/T	3.3	14.7
T	1.4	3.5	Ⓜ	5.7	10.3

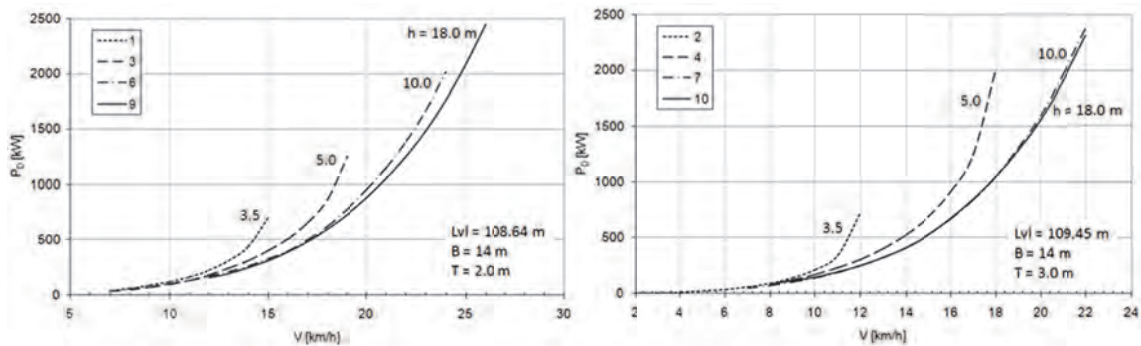
Сви резултати из ове групе испитивања су дати на сликама П2.1 – П2.3 у прилогу 2.

4.2.1 Прелиминарна анализа поузданости резултата прве групе испитивања

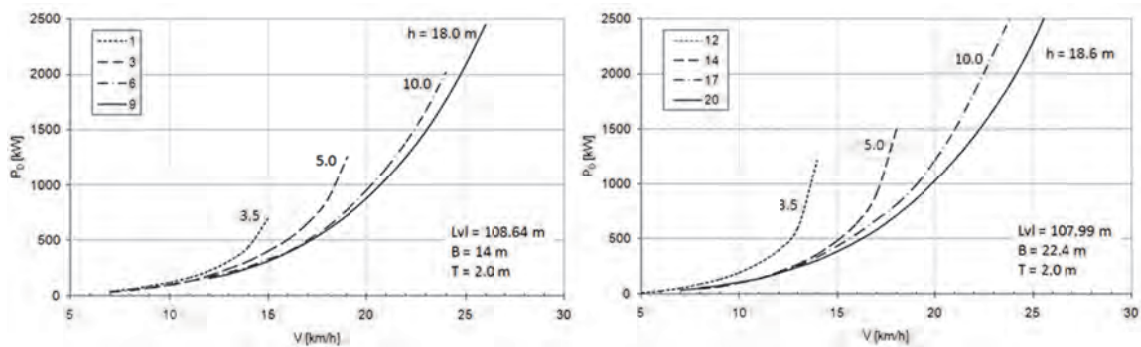
Већ је речено да неки од резултата који су овде дати нису добијени систематским испитивањима утицаја форме брода и дубине воде на потребну снагу

пропулзивног комплекса него су прикупљени из различитих извештаја у оквиру којих су предочени резултати различитих истраживања хидродинамичких карактеристика самохотки. У циљу провере поузданости прикупљених резултата спроведена је анализа из чега су изведени одређени закључци.

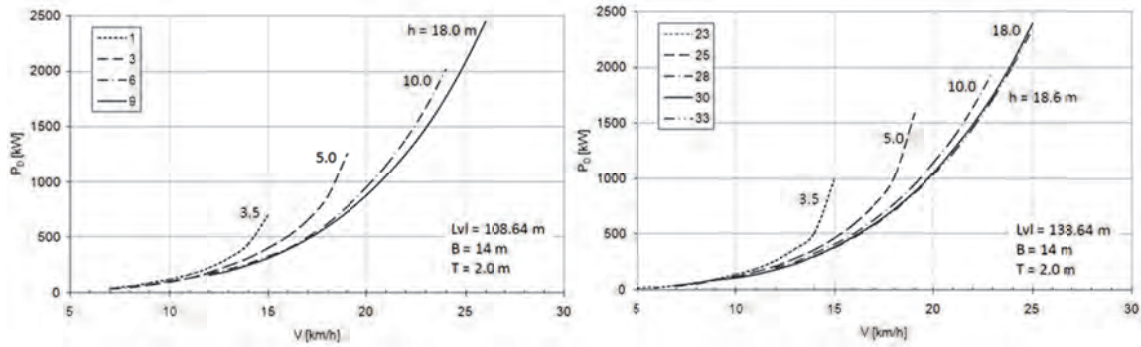
На слици 4.6, као пример, дати су резултати испитивања брода дужине 110 и ширине 14 метара при газовима од 2 и 3 метра у различитим дубинама воде. На сликама 4.7 и 4.8 су показани утицаји промене ширине, односно дужине брода на резултате мерења.



Слика 4.6 – Утицај газа брода и дубине воде на резултате испитивања брода $L = 110m$ и $B = 14m$



Слика 4.7 – Утицај ширине брода и дубине воде на резултате испитивања брода $L = 110m$ и $T = 2m$



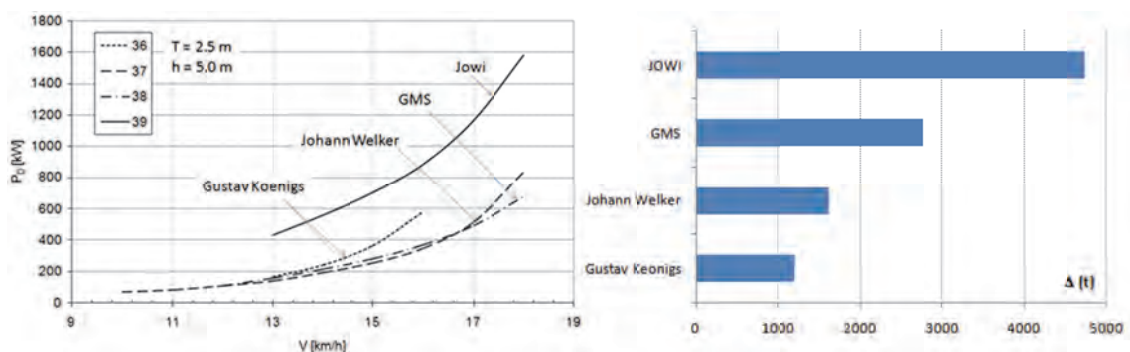
Слика 4.8 – Утицај дужине брода и дубине воде на резултате испитивања брода $B = 14m$ и $T = 2m$

Из добијених резултата се јасно уочава утицај промене основних димензија брода и дубине воде на снагу коју је потребно предати пропелеру (P_D) да би брод постигао одређену брзину:

- са смањењем дубине воде расте снага потребна за постизање исте брзине
- са повећањем димензија брода (дужине, ширине и газа) такође расте снага

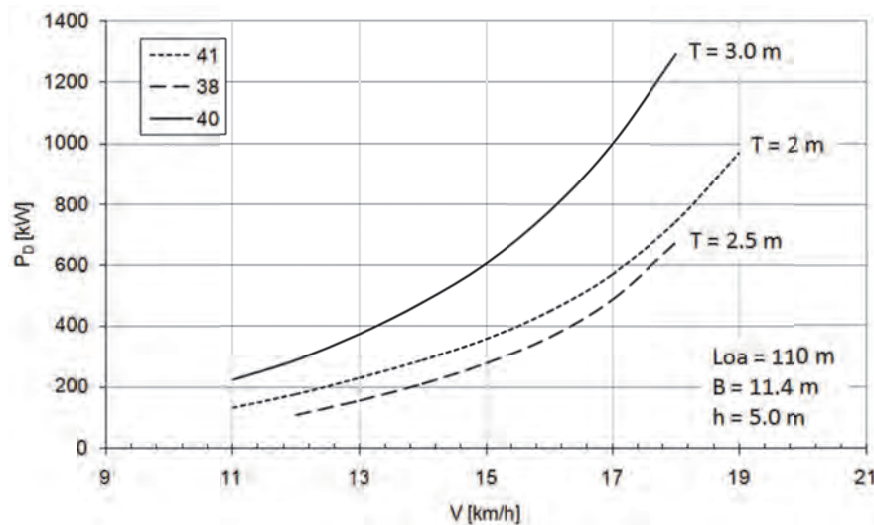
Једина нелогичност у датим резултатима мерења огледа се у томе што је израженији неповољан утицај дубине воде при мањем газу брода (видети криве за $h = 10m$ и $h = 18m$ на слици 4.6). Ово је још израженије у случају ширег брода, што се може видети на слици П2.2 која је дата у прилогу 2.

На слици 4.9 дати су упоредни резултати мерења апсорбоване снаге за четири карактеристична типа речних самохотки.



Слика 4.9 – Поредица измерених вредности предате снаге најчешћих типова самохотки [37]

Испитивања су обављена при газу бродова од 2.5 метара у води дубине 5 метара. Депласмани при којима су испитивања обављена су приказани на десном графику, на истој слици. Може се уочити, према датим резултатима, да је при брзинама већим од 17 km/h за погон брода *GMS* ($L = 110m$, $B = 11.4m$, $\Delta = 2752t$) потребна мања снага него у случају значајно мањег брода *Johann Welker* ($L = 80m$, $B = 9.5m$, $\Delta = 1620t$). Да би ови резултати били проверени једино поређење које је било могуће обавити на основу расположивих података је дато на слици 4.10.



Слика 4.10 – Поређење измерених вредности предате снаге за *GMS*

На слици 4.10 дати су резултати независних мерења на *GMS* бродовима у води дубине 5 метара на три различита газова, с тим да је мерење под редним бројем 38 заправо мерење које је обављено у оквиру испитивања чији су резултати представљени на слици 4.9. Ако се зна да је за погон брода са већим газом потребна већа снага овакав резултат се на први поглед може учинити нелогичним – крива за брод са газом од 2.5 метара је најнижа. Међутим, ако се погледају остале карактеристике ових бродова (табела П1.1 у прилогу 1) може се уочити да брод под редним бројем 38 има пропелере пречника 1.76 метара, док бродови 40 и 41 имају пропелере пречника 1.6 метара (вероватно је реч о истом броду). Како је познато да су пропелери већег пречника потенцијално ефикаснији, овакав резултат и није нелогичан.

Пречник пропелера испитаног брода *Johann Welker* (мерење под редним бројем 37 на слици 4.9) је износио 1.55 метара те је могуће да при већој брзини његова „неефикасност“ долази до изражаја.

Остале вредности које су дате у овој групи испитивања се чине логичним.

4.3 Друга група испитивања – Резултати моделских испитивања

У циљу проширења базе са резултатима испитивања прикупљен је изван број резултата моделских испитивања аутопропулзије и исти су дати у оквиру друге групе резултата у прилогу 2. Димензије бродова који су обухваћени овом групом испитивања се крећу у следећим границама:

Табела 4.3 – Област обухваћена испитивањима бродова из групе 2

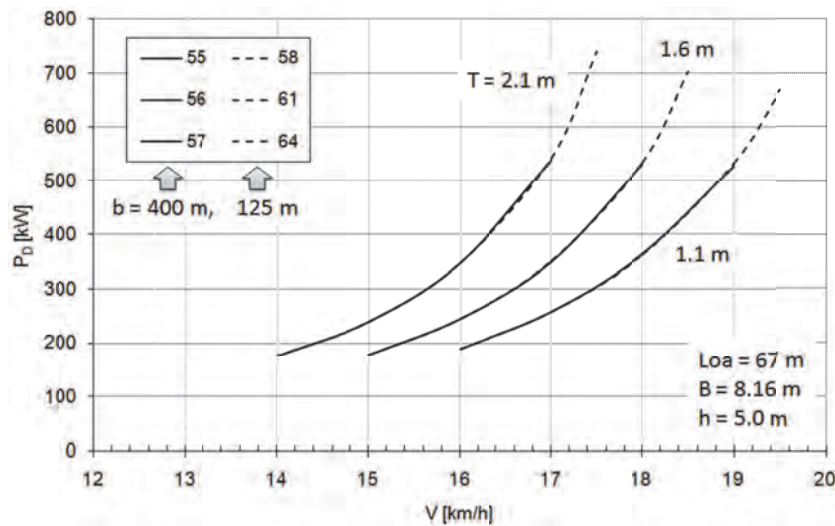
Димензије брода	Минимална вредност	Максимална вредност	Параметар брода	Минимална вредност	Максимална вредност
Loa	67	105	L/B	7.848	9.446
B	8.16	11.40	B/T	3.138	7.418
T	1.1	3.0	Ⓜ	6.152	8.123

Може се уочити да су границе знатно уже у односу на димензије бродова који су обухваћени првом групом испитивања.

4.3.1 Прелиминарна анализа поузданости резултата друге групе испитивања

Увођењем доступних резултата моделских испитивања у анализу омогућена су додатна поређења са раније датим резултатима мерења, а у циљу провере поузданости резултата мерења и сагледавања утицаја промене појединих параметара форме брода, као и ограничења пловног пута на потребну снагу.

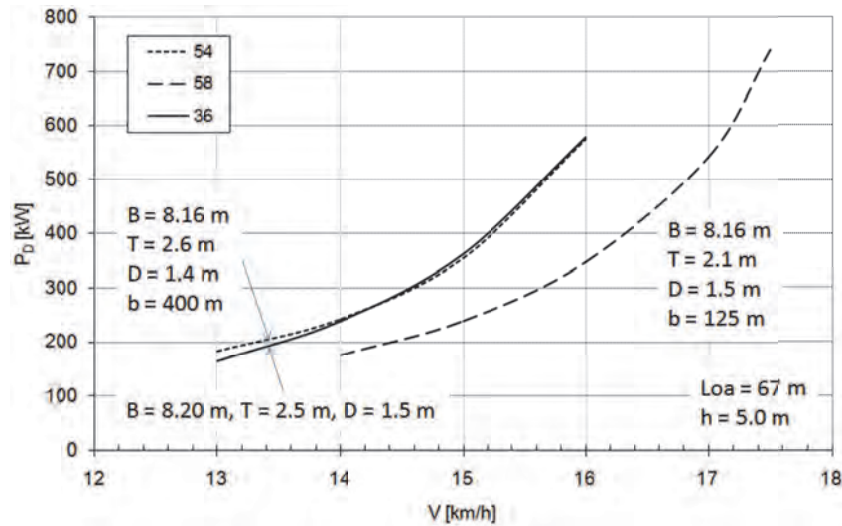
Моделска испитивања бродова под редним бројевима 58 – 66 спроведена су при условима који одговарају пловном путу ширине 125 m и при дубинама воде између 2.75 m и 5.00 m. На слици 4.11 дат је упоредни приказ резултата ових мерења (за $h = 5m$) са мерењима апсорпције снаге истог брода при ширини пловног пута од 400 m.



Слика 4.11 – Утицај ширине пловног пута на апсорбовану снагу

Из приказаних резултата би се могло закључити да разматрана разлика у ширини пловног пута не утиче на снагу потребну за постизање анализираних брзина. Међутим, ако се зна да пречници пропелера бродова 58-64 износе 1.5 m, док су на бродовима 55-57 уграђени нешто мањи пропелери ($D = 1.4\text{ m}$), намеће се закључак да анализирана ширина пловног пута ипак утиче на потребну снагу. Овде је као критеријум за оцену ефикасности пропелера коришћено опште правило да су пропелери већег пречника ефикаснији у раду. Међутим, ефикасност пропелера осим од пречника зависи и од осталих карактеристика (Ae/Ao , P/D , z , тип-серија, оптерећење). У подацима који су доступни за ова испитивања нису дати сви потребни подаци да би било могуће детаљније анализирати ефикасност пропелера.

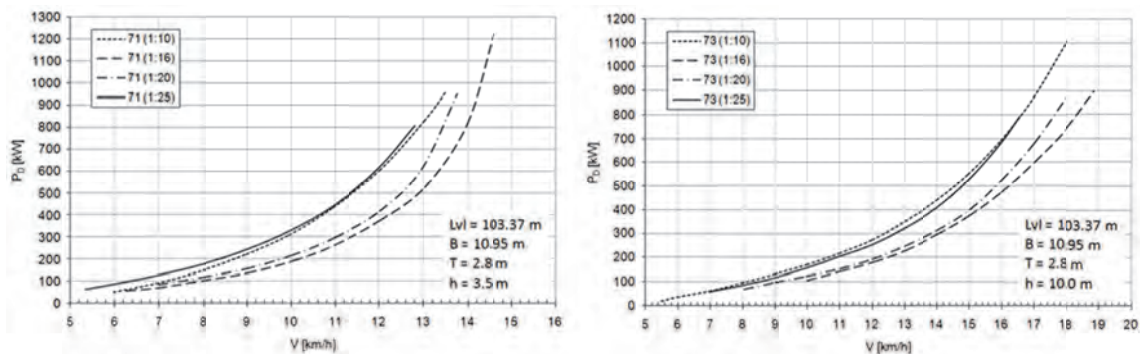
На следећем дијаграму дато је поређење резултата моделских испитивања брода класе *Gustav Koenigs* (54 и 58) са испитивањем брода истих димензија у природној величини (36).



Слика 4.12 – Поређење резултата моделских испитивања (54 и 58) са испитивањима из прве групе расположивих мерења (36)

Пошто је газ брода приликом мерења у природној величини износио 2.5 m, а гасови који су разматрани приликом моделских испитивања су били 2.1 m и 2.6 m могло би се очекивати да измерена крива снаге на броду буде између кривих измерених на моделима. Тим пре што је испитивање модела (54) обављено са пропелером чији је пречник мањи од пропелера при испитивању брода у пуној величини чини се нелогичним да се криве 54 и 36 практично поклапају.

Ипак, нејнелогичнијим се чине резултати моделских испитивања који су дати под редним бројевима 71, 72 и 73 (табела П1.2, прилог 1) [40]. У извештају [40] анализиран је утицај величине модела, односно коефицијента размере на резултате мерења апсорпције снаге истог брода.



Слика 4.13 – Утицај размере модела на резултате мерења апсорпције снаге

Осим коефицијента размере мењана је и дубина воде па су тако испитивања модела спроведена при дубинама које одговарају дубинама воде од 3.5, 5 и 10 метара за брод. Дужине модела који су разматрани су износиле између 4.2 и 10.5 метара. За погон ових модела су коришћени пропелери чије су карактеристике дате у следећој табели.

Табела 4.4 – Карактеристике пропелера који су коришћени при испитивањима (71-73)

Пропелер	БРОД	1:10	1:16	1:20	1:25
D [m]	1.6	0.1625	0.1	0.081	0.065
P [m]	1.42	0.174	0.105	0.087	0.07
P/D [-]	0.888	1.07	1.05	1.07	1.07
Ae/Ao [-]	0.7	0.55	0.6	0.55	0.55
z [-]	4	4	4	4	4

Приликом испитивања нису прављени модели пропелера који би геометријом у потпуности одговарали пропелеру који је уграђен на брод него су коришћени пропелери из постојеће колекције (*stock propellers*). Услед тога су постојале извесне разлике које су у табели 4.4 посебно назначене (коса слова). Модели пропелера који су коришћени имали су нешто већи корак (P/D), али и нешто мањи однос површина (Ae/Ao) те би, сасвим грубо гледано, и ефикасност у слободној вожњи могла бити приближно једнака ефикасности пропелера на броду. Осим тога, не треба заборавити да се при спровођењу тестова ауто-пропулзије не препоручује употреба пропелера чији су пречници мањи од 15cm.

Насупрот очекивањима показало се да се резултати мерења значајно разликују у зависности од величине модела и то без обзира на дубину воде. Услед непознавања свих околности под којима су мерења спроведена у овом тренутку, у појединим случајевима, тешко је објаснити заиста велика одступања. Ипак, провером критеријума за појаву тзв. блокаде у току моделских испитивања, констатовано је да постоји утицај на резултате мерења. Према [38] уколико је однос површине уроњеног дела главног ребра модела (A_M) и површине попречног пресека базена (A) већи од 0.005 може доћи до утицаја струјања воде која се одбија од зидова базена на резултате мерења што може довести до грешке у

мерењима. У случају моделских испитивања чији су резултати овде дати констатовано је следеће:

Табела 4.5 – Провера утицаја ефеката блокаде на резултате мерења

λ	[-]	1	10	16	20	25
A_m	[m ²]	30.3534	0.303534	0.118503	0.075953	0.048565
h	[m]	3	0.300	0.188	0.150	0.120
		5	0.500	0.313	0.250	0.200
		10	1.000	0.625	0.500	0.400
A	[m ²]	-	2.94	1.8375	1.47	1.176
		-	4.9	3.0625	2.45	1.96
		-	9.8	6.125	4.9	3.92
A_m/A	[-]	-	0.103	0.064	0.052	0.041
		-	0.062	0.039	0.031	0.025
		-	0.031	0.019	0.016	0.012

Испитивања су спроведена у великом базену у *DST*-у чија ширина износи 9.8 метара.

Из добијених резултата може се уочити да је у свим испитаним случајевима гранични однос површина прекорачен (видети последњу врсту табеле 4.5). Није познато да ли је спроведена корекција измерених вредности апсорбоване снаге у циљу отклањања грешке услед ефеката блокаде.



Слика 4.14 – Брод чија су моделска испитивања овде показана

Коначно, приликом моделских испитивања која се спроводе у базенима, иако нема спољашњих утицаја какви се јављају приликом пловидбе брода у реалним околностима, може доћи до грешака у мерењима услед великог броја разлога, што у овом раду неће бити детаљније објашњено.

4.4 Трећа група испитивања – Допуна базе директним мерењима на постојећим бродовима у реалним околностима

Упркос повећаном интересовању стручне јавности широм света и бројним међународним пројектима који се, између осталог, баве истраживањима могућности за унапређење ефикасности транспорта робе унутрашњим пловним путевима, мерења апсорпције снаге на самоходним речним теретним бродовима у нашој земљи се на жалост последњих година веома ретко спроводе. У ранијем периоду, у више прилика, ова мерења су обављана у оквиру истраживања која су спровођена на *Модулу за Водни саобраћај и транспорт* на *Саобраћајном факултету у Београду*. Нека од ових испитивања су и објављена и могу се пронаћи у монографији [39].

У том смислу, у оквиру истраживања које је обављено за потребе израде ове дисертације, спроведено је више непосредних мерења на самоходкама које плове Дунавом.

На жалост, околности у којима се у последње време налазе домаћа бродарства у великој мери су утицале на могућности истраживања. Наиме, од укупно седам мерења која су у протекле две године реализована на три самоходке, део резултата се не може директно применити за ову анализу јер није било могуће утицати на околности под којима су мерења спроведена. Највећи проблем се огледа у томе што су услед финансијских разлога најчешће приликом мерења уз самоходке биле придодате од једне до четири барже, а што значајно утиче на измерене вредности апсорбоване снаге.



Слика 4.15 – Самохотке Југословенског Речног Бродарства „Земун“ и „Делиград“ на којима су обављена мерења

Иако обављеним мерењима база испитаних бродова, из поменутих разлога, није значајно унапређена, мерења која су обављена су вишеструко корисна. Значај директних мерења апсорпције снаге на бродовима у реалним околностима се огледа не само у проширењу базе са резултатима испитивања него и у сагледавању тешкоћа које мерења носе, што је такође важно. Одавде проистиче и боље разумевање могућих грешака при мерењима, али и значаја спољашњих утицаја, као и околности под којима се мерења спроводе за анализу резултата мерења.

Према томе, поред резултата који су добијени директним мерењима у протекле две године на дунавским самохоткама, у резултатима који су дати у оквиру треће групе (прилог 2) су се нашли и остали резултати мерења на бродовима који су били доступни, а која су реализовале друге институције.

Димензије бродова који су обухваћени овом групом испитивања се крећу у следећим границама:

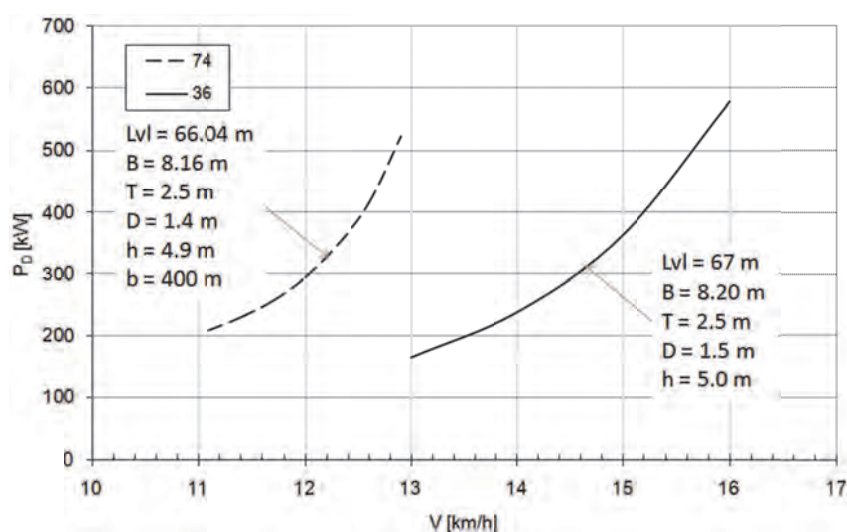
Табела 4.6 – Област обухваћена испитивањима бродова из групе 3

Димензије брода	Минимална вредност	Максимална вредност	Параметар брода	Минимална вредност	Максимална вредност
Loa	67	110	L/B	4.504	10.331
B	8.16	22.8	B/T	3.264	13.818
T	0.6	3.22	Ⓜ	6.253	8.137

4.3.1 Прелиминарна анализа поузданости резултата треће групе испитивања

Коначно, када је база испитаних бродова комплетирана (све три групе испитивања), могуће је спровести додатна поређења вредности које су добијене мерењима, а са циљем провере поузданости резултата.

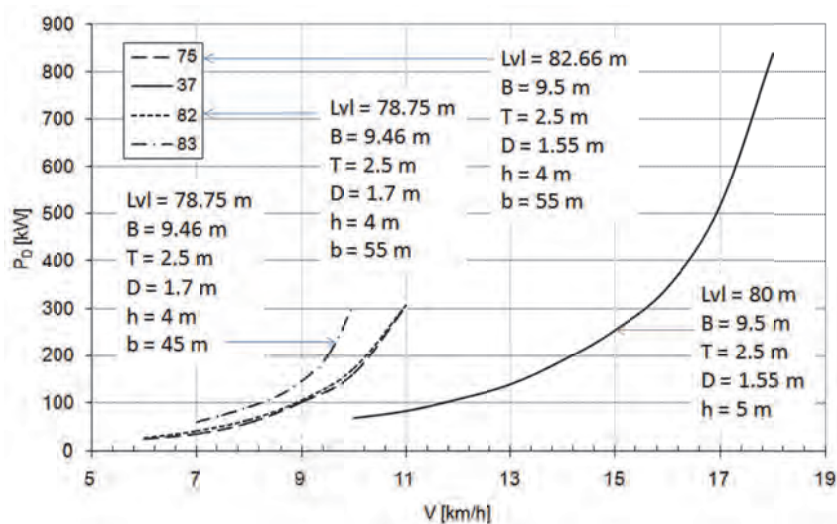
Тако, на пример, са слике 4.16 на којој су дати упоредни резултати испитивања бродова класе *Gustav Koenigs* при дубинама воде од 4.9, односно 5 метара, може се уочити велико одступање. Уз резултате мерења брода 36 била је наглашена ширина пловног пута од 400 метара, док овога податка није било у опису мерења брода 74. Иако је пречник пропелера брода 74 за 10 центиметара већи од пропелера који је уграђен на броду 36, овим се тешко може објаснити измерена разлика у потребној снази. Ипак, треба напоменути да су тако велика одступања могућа и да су највероватније последица околности под којима су мерења обављена. Стање храпавости оплате брода, квалитет површине пропелера, евентуални утицај отклона кормила и заношења брода, утицај таласа и ветра, итд. у току мерења могу за последицу имати овако велике разлике у резултатима. У конкретном случају на основу расположивих података није могуће утврдити прави разлог за показане разлике јер нема додатних информација о мерењима.



Слика 4.16 – Поређење резултата мерења апсорбоване снаге два брода класе *Gustav Koenigs*

На слици 4.17 дата су поређења измерених вредности апсорбоване снаге у случају три различита брода класе *Johann Welker* у води дубине 4 и 5 метара. Из датих резултата може се извести више закључака, од којих су најзначајнији:

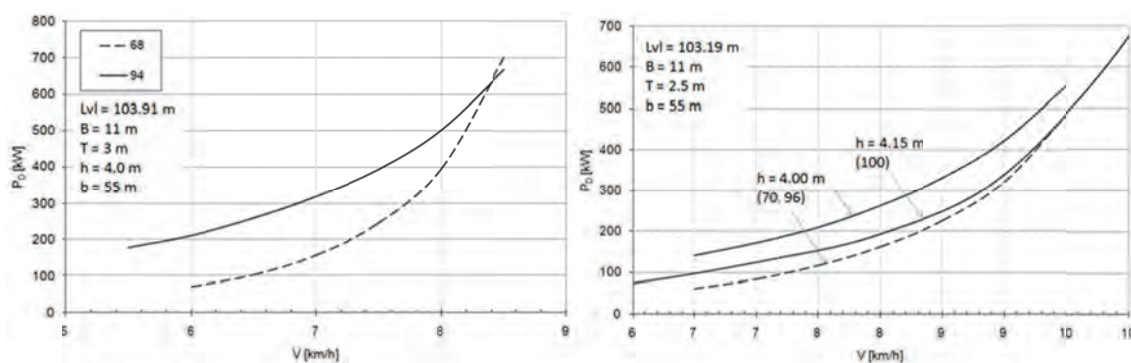
- Мерењима 82 и 83 (исти брод) показан је утицај ширине пловног пута на потребну снагу. Јасно се уочава да је при пловидби ужим пловним путем потребно уложити више снаге за постизање исте брзине.
- Иако су пречници пропелера бродова 75 и 82 различити, а мерења су спроведена уз иста ограничења пловног пута, резултати мерења апсорпције снаге у овим случајевима се поклапају. На брод под редним бројем 75, који је изграђен 1965. године, уграђен је пропелер *B4-85*, а на брод 82 (из 1957. године) уграђен је пропелер *B3-70*.
- Велика разлика између измерене апсорбоване снаге брода 37 и осталих резултата у највећој мери је последица ограничења ширине пловног пута. Приликом мерења која су обављена на броду 37 ширина пловног пута је била довољно велика да није било неповољних хидродинамичких утицаја.



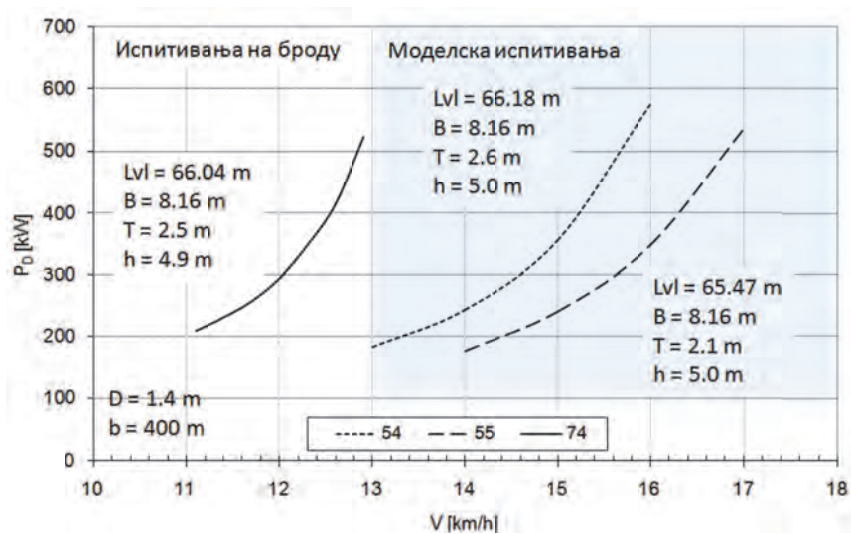
Слика 4.17 – Поређење резултата мерења апсорбоване снаге три брода класе *Johann Welker*

Упркос великим одступањима која се јављају приликом поређења до сада показаних резултата испитивања, а која се могу донекле разумети,

најнелогичнијим се чине резултати дати на следећим дијаграмима, на којима су приказани резултати моделских испитивања упоредо са испитивањима истих бродова у природној величини.



Слика 4.18 – Поређење резултата моделских испитивања (испрекидана линија) са испитивањима истог брода у природној величини (пуна линија)



Слика 4.19 – Поређење резултата моделских испитивања са испитивањима брода у пуној величини

Не само значајне разлике у вредностима, које се могу уочити на сликама 4.18 и 4.19, него и другачији карактер промене снаге у зависности од брзине код модела и код брода, што се нарочито уочава на слици 4.18 (лево), указују на дубљи проблем.

Према свему изнетом, може се закључити да се у појединим случајевима јавља значајно одступање између резултата моделских испитивања и испитивања истих бродова у природној величини. Међутим, било какав покушај да се разлочи који су довели до оваквих резултата објасне подразумевао би познавање свих околности под којима су мерења спроведена.

Значај спроведене анализе расположивих резултата мерења, а која је обављена кроз поређења измерених вредности за бродове сличних карактеристика и уз слична ограничења се огледа у:

- прелиминарној оцени поузданости резултата мерења, у циљу одбацивања из даљих разматрања резултата који се не могу објаснити,
- сагледавању најзначајнијих фактора који утичу на потребну снагу погонских мотора, а на којима треба базирати даље истраживање енергетске ефикасности речних самоходки.

Један од основних закључака који се намеће из свега што је изнето у овом поглављу се може сажети следећом реченицом: да би се стекла јасна слика о хидродинамичким карактеристикама брода потребно је у току мерења апсорпције снаге пратити све релевантне факторе који утичу на његово кретање.

5

Експериментално одређивање апсорпције снаге на бродовима у реалним условима

Кретање брода на слободној површини – граници између две, у физичком смислу, значајно различите средине (вода и ваздух), праћено је низом веома комплексних хидродинамичких и аеродинамичких ефеката. Раније је речено да се неки од ових ефеката не могу до краја аналитички решити, те да се са довољном тачношћу могу одредити једино експериментима. Најдиректнији начин подразумева мерења на реалним бродовима у реалним околностима. Сазнања до којих се на овај начин долази драгоцен су извор информација које треба да:

- пруже јаснију слику о карактеристикама брода на коме се мерења обављају, али и
- пруже информације које су драгоцене за даље унапређење ове комплексне научне дисциплине из области бродоградње.

У том циљу, у оквиру истраживања које је реализовано при изради ове дисертације, обављено је више непосредних мерења на речним самоходним теретним бродовима. Кроз та мерења, не само да су прикупљене корисне

информације за даље истраживање енергетске ефикасности ове групе бродова, него су, што је можда и важније, јасније сагледане потешкоће које прате покушаје да се успоставе теоријско/емпиријски модели којима би проблем погона ових бродова био решен.

Приликом реализације овог задатка, већ на самом почетку, решен је низ конкретних техничких проблема:

- у сарадњи са домаћом фирмом „*Electronic Design*“, која је превасходно оријентисана на развој индустријског хардвера, развијен је оригинални уређај за безконтактну аквизицију сигнала са мерног сензора,
- развијен је софтвер за праћење, снимање и анализу измереног сигнала у реалном времену са изузетно једноставним корисничким интерфејсом у *LabView* окружењу,
- овладано је методологијом калибрације мерне опреме,
- спроведен је низ тестова у лабораторијским условима чиме су, у оквиру припреме за реална мерења, отклоњене недоумице везане за непосредну примену развијене опреме.

Према томе, за потребе истраживања енергетске ефикасности речних бродова развијена је и у примену уведена сасвим нова генерација опреме за мерење апсорпције снаге. Може се констатовати да је на тај начин учињен мали али изузетно важан искорак који ће бити окосница многих будућих истраживања у овој области.

5.1 Мерења апсорпције снаге

Снага мотора коју пропелер апсорбује при кретању брода мери се индиректно. Сасвим упрошћено, на једном крају вратила је мотор који је у суштини генератор обртног момента, а на другом крају је пропелер који овај момент преводи у силу

чија аксијална компонента савладава отпор при кретању брода одређеном брзином. Снага која се мери (P_S), снага на вратилу, одређена је изразом:

$$P_S = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot Q$$

Према томе, истовременим мерењем обртног момента на пропелерском вратилу (Q) и брзине обртања вратила (n), применом датог израза може се израчунати снага на вратилу. Ако су познати губици у лежајевима (η_S) може се одредити и снага која се у разматраном режиму рада мотора предаје пропелеру:

$$P_D = P_S \cdot \eta_S$$

Снага на спојници мотора (кочиона снага) може се одредити ако су познати губици у редуктору (η_{RED}):

$$P_B = P_S / \eta_{RED}$$

Приликом мерења зависности потребне снаге мотора од постигнуте брзине брода неопходно је спровести низ мерења при различитим бројевима обртаја – од минималног броја обртаја при коме мотор може безбедно да ради до номиналног броја обртаја мотора. На тај начин се долази до пропелерске криве – криве која дефинише колико снаге пропелер апсорбује од мотора у зависности од броја обртаја и како се ово одражава на брзину којом се брод креће. У резултатима мерења који су описани у претходном поглављу дата је зависност $P_D = f(V)$, док број обртаја често није био на располагању.

5.1.1 Мерење броја обртаја пропелерског вратила

Приликом мерења апсорпције снаге на броду, у свим испитаним случајевима, број обртаја пропелерског вратила при различитим режимима рада мотора је истовремено праћен на два уређаја. Један од уређаја је бродски индикатор који је у склопу опреме за праћење рада мотора најчешће смештен у кормиларници. Податак који се одавде добија односи се на број обртаја мотора (n_M). Да би се одредио број обртаја пропелерског вратила (n_S) потребно је знати преносни однос редуктора (i).

$$n_s = n_M/i$$

Као други уређај за мерење броја обртаја, који је служио и као контрола претходног, коришћен је ручни дигитални безконтактни ласерски тахометар типа *Velleman DTO6234N*.



Слика 5.1 – Мерење броја обртаја пропелерског вратила

Принцип рада овог уређаја се огледа у мерењу учестаности прекидања ласерског снопа који емитује тахометар белом рефлектујућом тракицом (при обртању вратила) која је залепљена за пропелерско вратило.

Приликом мерења која су обављена на самохотки *Југословенског Речног Бродарства „Земун”* уочено је извесно одступање које је било последица неисправности бродског уређаја. При осталим мерењима је констатовано слагање измерених вредности броја обртаја из оба извора.

5.1.2 Мерење обртног момента на пропелерском вратилу

У току пловидбе брода снага која се развија у мотору до пропелера се преноси преко пропелерског вратила. Услед обртног момента, којим је при томе оптерећено вратило, долази до извесног увијања вратила. Ово има за последицу угаону деформацију, у еластичној области, која је најизраженија на површини вратила. Услед правца деловања максималних напона смицања поменута деформација је најинтензивнија у правцима који су под углом од 45° у односу на осу вратила. Јединична деформација површине вратила у правцу деловања највећих напона је одређена следећом релацијом:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{D_v \cdot Q}{4 \cdot G \cdot I_p}$$

где су:

ε	[m/m]	јединична деформација
D_v	[m]	пречник вратила
Q	[kNm]	обртни момент
G	[GPa]	модул еластичности на смицање (модул клизања)
I_p	[m ⁴]	поларни момент инерције

Модул клизања зависи од материјала од кога је пропелерско вратило направљено и може се одредити из следећег израза:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}$$

У претходном изразу са E је обележен модул еластичности, а са μ Поасонов коефицијент. Вредности ових величина које важе за челик су:

$$E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ GPa}, \quad \mu = 0.33, \quad G = 78.947 \text{ GPa}$$

Како је пропелерско вратило кружног попречног пресека поларни момент инерције се може одредити из израза:

$$I_p = \frac{\pi \cdot D_v^4}{32}$$

Заменом последњег израза у израз за јединичну деформацију долази се до:

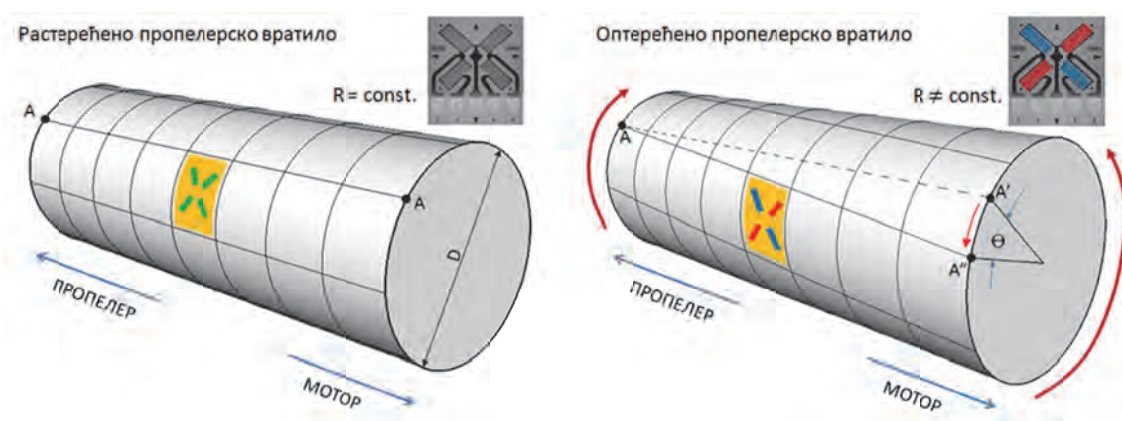
$$\varepsilon = \frac{8 \cdot Q}{\pi \cdot G \cdot D_v^3}$$

Уколико је позната јединична деформација вратила одавде се може одредити обртни момент којим је оптерећено пропелерско вратило:

$$Q = \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot G \cdot D_v^3 \cdot \varepsilon$$

Према томе, да би се измерио момент на вратилу, а одатле израчунала снага коју пропелер апсорбује од мотора на задатом броју обртаја, потребно је измерити јединичну деформацију вратила.

Уобичајене деформације које се на пропелерским вратилима јављају при пловидби речних самоходки су реда величине 100 μm . За мерење тако малих померања су се показале најпогодније мерне траке, чија тачност досеже и до 1.5 nm (10^{-9}m). Мерна трака (пун мост) је пасиван елемент који се састоји од четири отпорника који су међусобно повезани у Витстонов мост.



Слика 5.2 – Примена мерне траке за мерење момента на пропелерском вратилу

Основна карактеристика мерних трака је да им је резултујући електрични отпор пропорционалан деформацији [41]:

$$\Delta R = \varepsilon \cdot R \cdot k$$

где су:

ΔR [Ω] - промена електричног отпора мерне траке услед деформације

R [Ω] - декларисани отпор мерне траке (прописује произвођач)

k [-] - фактор мерне траке (прописује произвођач)

Према томе, уколико се мерна трака залепи на неоптерећено вратило, свака деформација на површини вратила, приликом рада мотора, иницираће деформацију мерне траке (слика 5.2) што ће довести до промене њеног електричног отпора. На основу измерене промене излазног напона мерне траке

прорачунским путем се може одредити степен увијања вратила, а одатле и момент који је до деформације довео.

У прилогу 3 је дато детаљно извођење зависности јединичне деформације мерне траке од измерене вредности напона, која је последица увијања вратила. Овде је закључено да је јединична деформација (ε) директно пропорционална излазном напону (U_M), а обрнуто пропорционална напону напајања (U_E) мерног моста.

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{U_M}{U_E}$$

Заменом овог израза у једначину за одређивање обртног момента долази се до:

$$Q = \frac{1}{8 \cdot k} \cdot \pi \cdot G \cdot D_v^3 \cdot \frac{U_M}{U_E}$$

где је успостављена директна веза између измереног излазног напона на мерној траки и обртног момента на пропелерском вратилу.

5.1.3 Опрема која је коришћена при мерењима

За прикупљање напонског сигнала са мерне траке, приликом мерења апсорбоване снаге у зависности од режима кретања брода, коришћена је опрема *WSGS* (*Wireless Strain Gauge Sensor*) која је за ту намену развијена 2008. године. Реч је о уређају базираном на *ZigBee* технологији, која омогућава висок ниво бежичне комуникације применом *IEEE 802.15.4* протокола уз минималан утросак енергије. Уређај се састоји од две јединице:

- мобилна јединица се монтира на пропелерско вратило заједно са мерном траком и може да читава сигнал са мерне траке, конвертује га у дигитални облик и користећи фреквенцију од 2.4 GHz у домету од око 100 метара (на отвореном простору) га шаље до стационарне јединице,
- стационарна јединица прима сигнал са мобилне јединице и прослеђује га до рачунара преко *USB* порта.



Слика 5.3 – Мерење апсорпције снаге на самохотки „Transferium”

На рачунару се у програму, који је развијен у *LabView* окружењу, директно прати промена оптерећења пропелерског вратила у реалном времену. Осим тога, измерени сигнал се може снимити за даљу обраду и анализу која се врши у засебном модулу у оквиру истог програма. Рачунарски програм који је коришћен за мерења и анализу сигнала је развијен за потребе овог истраживања као *OSS* (*Open Source Software*) чији је програмски код доступан за модификације и даље унапређење.

Табела 5.1 – Техничке карактеристике коришћене опреме

Параметар	Стационарна јединица	Мобилна јединица
Напон напајања	4 – 5.5 V USB	7.2 – 10 V батерија
Потрошња	42 mA	104 mA
Брзина узорковања	-	2 ksps
Радио фреквенција	2.4 GHz	2.4 GHz
Напон ексцитације	-	± 7 V
Улазни опсег	-	± 14 V
Захтевана мерна трака	-	± 2 mV/V
Врста комуникације	USB, 802.15.4	802.15.4
Домет	100 m (без препрека)	100 m (без препрека)
Температурни опсег	0 – 70 C°	0 – 70 C°

Технологија која је коришћена приликом развоја опреме, као и сама опрема за мерења, спада у сам врх савремених достигнућа у овој области. Тренутно на тржишту постоји неколико реномираних произвођача овакве опреме међу којима су *National Instruments* (www.ni.com), *Bensfeld Engineering* (www.binsfeld.com), *MicroStrain* (www.microstrain.com), итд. Треба напоменути да је 2007. године, када

је започет рад на развоју опреме у сарадњи са домаћом фирмом *Electronic Design* (www.ed.rs), само *National Instruments* имао у понуди сличан уређај. Са временом све више компанија које се баве производњом мерне опреме у своју понуду уводи опрему базирану на овој технологији.

5.1.4 Калибрација мерне опреме

Излаз са мерне траке је напонски аналогни сигнал. Конверзија овог сигнала у дигитални подразумева извесне модификације сигнала. У том смислу, сигнал са мерне траке се конвертује и у дигиталној форми представља у опсегу бројева између 0 и 4095. Да би овакав сигнал био употребљив неопходно је да се изврши калибрација. Калибрацијом се низу бројева враћа физички смисао и успоставља одговарајућа размера у зависности од карактеристика пропульзивног комплекса брода.

Уобичајени начин калибрације мерне опреме, у општем смислу, подразумева подешавање излазног сигнала мерног уређаја који се калибрише према еталону који се сматра тачним. Многе мерне уређаје је довољно калибрисати повремено у циљу отклањања могућих грешака мерења. Међутим, поступак мерења обртног момента на пропелерском вратилу је утолико специфичан што подразумева потребу за калибрацијом приликом сваког мерења. Сваком монтажом мерне траке на вратило уноси се извештан поремећај који је последица савијања траке ради бољег налегања на површину вратила. Осим тога, електрични отпор каблова који се користе за пренос сигнала између мерне траке и мобилне јединице такође може утицати на измерени сигнал.

Калибрација мерне траке подразумева познавање две карактеристичне вредности измереног сигнала:

- сигнал који одговара растерећеном вратилу – без обзира на одзив мерне траке ову вредност треба прогласити нулом,

- сигнал који одговара максималном очекиваном оптерећењу вратила – одзив мерне траке при оваквом оптерећењу вратила треба кориговати у складу са тачном вредношћу.

Максимално очекивано оптерећење вратила се може одредити на основу познате максималне расположиве снаге на мерном месту и одговарајућег броја обртаја:

$$Q = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

Нулти сигнал се може кориговати већ након монтаже мерне опреме, док је вратило растерећено, док би за подешавање горње границе сигнала требало оптеретити вратило до очекиване максималне вредности момента. Ово је у пракси немогуће остварити јер на броду нема услова за механичку симулацију оваквог оптерећења. Због тога се калибрација мерне траке на броду обавља нешто другачије – без натезања вратила познатим моментом.

Познато је да је мерна трака изузетно осетљива на промену електричног отпорна. Уколико би се увођењем спољашњег отпорника (R_C) у коло Витстоновог моста симулирала промена отпора мерне траке која би одговарала максималном оптерећењу вратила тада би се овакво симулирано оптерећење могло искористити за прецизирање горње границе оптерећења приликом баждарења. Овакав поступак баждарења се назива *шантовање*.

Како је то показано у детаљном извођењу које је дато у прилогу 3, вредност електричног отпора потребног отпорника за калибрацију мерне опреме зависи од пречника пропелерског вратила на коме се поставља мерна трака, модула клизања (G) материјала од кога је направљено вратило, карактеристике мерне траке која се калибрише и оптерећења вратила – момента која се симулира:

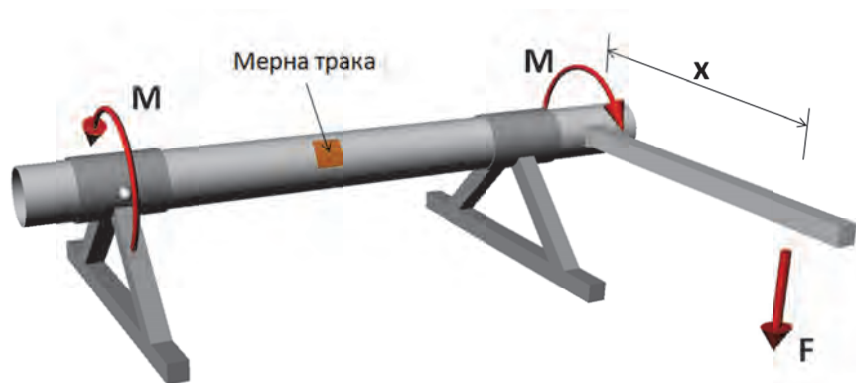
$$R_C = \frac{R}{4} \cdot \left(\frac{\pi \cdot G \cdot D_v^3}{8 \cdot Q \cdot k} - 3 \right)$$

У прилогу 3 описан је начин на који се у коло мерне траке додаје калибрациони отпорник, чији је отпор одређен датим изразом, а у циљу симулирања оптерећења вратила за потребе калибрације.

Приликом калибрације није неопходно да се симулира максимално очекивано оптерећење вратила. Може се за калибрацију усвојити било која вредност момента, али је погодно да се доња и горња граница при калибрацији што више разликују, како би резултати мерења били у калибрисаним границама.

5.1.5 Припрема за мерења на броду - тестирање опреме

Раније је речено да је у оквиру припрема за реална мерења на бродовима, у лабораторијским условима спроведен низ тестова. Ово је било неопходно јер је за мерења коришћена сасвим нова опрема, базирана на новој технологији. За потребе испитивања је направљена инсталација која је шематски приказана на следећој скици:



Слика 5.4 – Скица инсталације која је коришћена за тестирања мерне опреме

Уместо пропелерског вратила коришћена је шупља челична цев спољашњег пречника 88.9 mm и дебљине зида од 3.2 mm ($I_p = 158.4117 \text{ cm}^4$). Левом крају цеви спречена је ротација док се цев несметано могла ротирати око уздужне осе у левају на десном крају. Сензор за мерење момента – мерна трака је постављена на средини распона између носача цеви. Приликом испитивања је коришћена мерна трака *HBM 1-VY41-6/350* (пун мост) код које су сва четири отпорника активни,

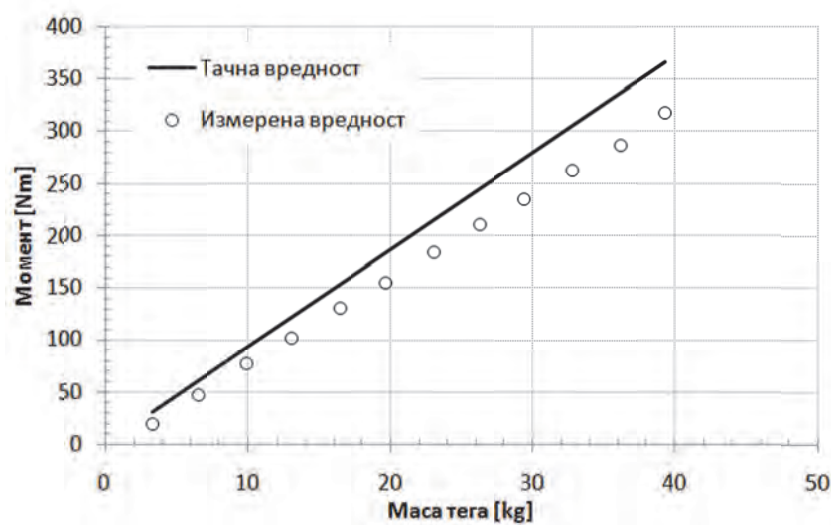
односно деформишу се приликом оптерећења цеви. Сва каснија мерења на бродовима у реалним околностима обављена су помоћу мерних трака истог типа.

Мењајући крак (x) на полуги, која је монтирана на десном крају цеви, као и интензитет силе (F), додавањем тегова познатих маса, мењан је интензитет момента којим је цев била оптерећена. На тај начин цев је оптерећивана познатим моментом, док је истовремено на одзиву мерне траке праћена промена сигнала. На описани начин је реализовано више од 300 мерења, при чему су се задата оптерећења цеви кретала у интервалу између 30 и 365 Nm.

У теоријском смислу, овакав начин мерења момента делује прилично једноставно. Међутим, у практичном смислу, читав низ околности може довести до грешака при мерењу. Приликом тестирања опреме симулиране су разне ситуације до којих може доћи при реалним мерењима и анализиран је њихов утицај на резултате мерења.

Утицај грешке у напајању мобилне јединице опреме за мерење

Један од могућих разлога за грешке при мерењима је неадекватан напон напајања мобилне јединице за аквизицију сигнала, која се напаја помоћу батерије. На самом уређају не постоји индикатор истрошености батерије, тако да на основу измерених вредности није лако препознати да ли су резултати мерења добри или нису. Пример оваквог сигнала је показан на слици 5.5. Пошто је приликом мерења уочено одступање измерених од тачних вредности момента, након провере, констатовано је да је опао напон напајања мобилне јединице. Из добијених резултата може се уочити да је карактер промене остао исти, с тим да су измерене вредности момента ниже од тачних.



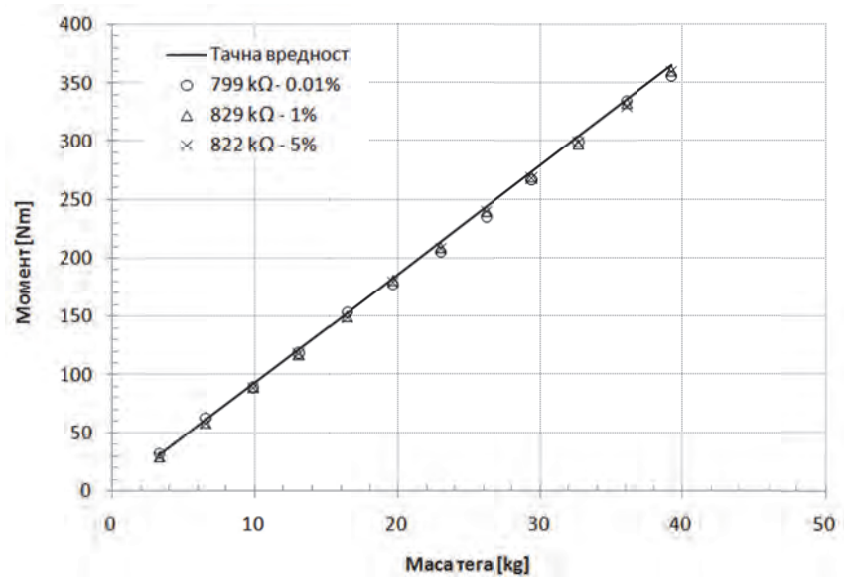
Слика 5.5 – Утицај истрошености батерије

Закључено је да се ова појава може препознати уколико би се по завршетку мерења поновио поступак калибрације. Накнадним додавањем калибрационог отпорника у коло мерног моста мора се добити исти сигнал (одзив мерне траке) какав је добијен на почетку мерења. Уколико се добије мања вредност извесно је да је батерија ослабила и да се измерене вредности сигнала морају кориговати у складу са разликом у напону која је очитана при калибрацији на почетку и на крају мерења. У случају да је ова разлика велика треба размислити о понављању мерења.

Утицај избора отпорника за калибрацију на резултате мерења

Посебна пажња у оквиру испитивања посвећена је избору отпорника за калибрацију опреме. У литератури се нарочито наглашава неопходност коришћења отпорника високе тачности (до $\pm 0.02\%$) за калибрацију мерне опреме. Овакви отпорници су доста скупи и до њих се теже долази, док су отпорници мање тачности доступни и веома јефтини. У оквиру припрема за мерења набављена су четири отпорника (200 k Ω , 400 k Ω , 600 k Ω и 800 k Ω) чија се тачност креће у границама $\pm 0.01\%$. Процењено је да су ова четири отпорника довољна за баждарења приликом мерења на бродовима који су предмет овог истраживања. Осим ових, набављен је и већи број отпорника мање тачности и урађено је

поређење резултата мерења у зависности од декларисане тачности отпорника који се користи при калибрацији. Део добијених резултата је показан на слици 5.6.



Слика 5.6 – Утицај тачности отпора за калибрацију

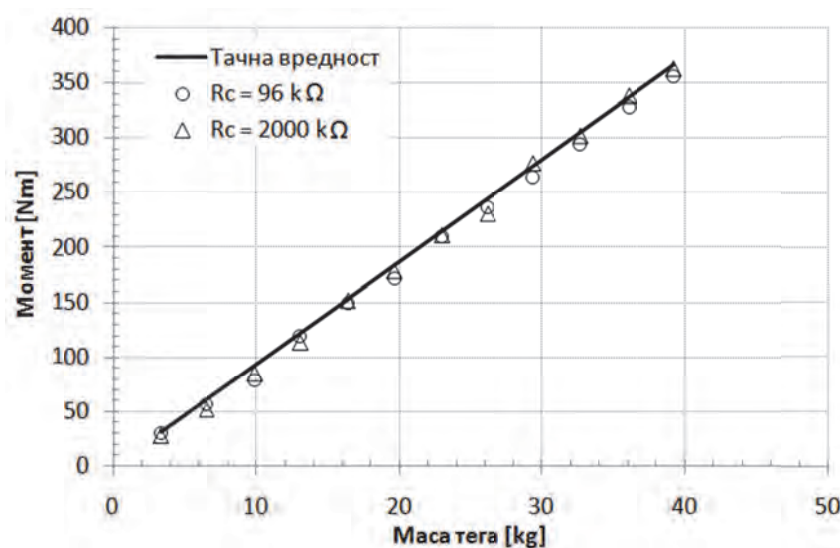
Овде су за калибрацију при мерењима коришћена три отпорника исте декларисане отпорности од 800 kΩ, а различите декларисане тачности (0.01%, 1% и 5%). Како се показало тачности калибрационог отпорника заправо није утицала на резултате мерења. Ово се може објаснити тиме што калибрација при мерењима није спроведена са декларисаним отпором од 800 kΩ него је при свакој калибрацији коришћена тачна вредност отпора која је добијена мерењем карактеристика сваког отпорника помоћу унимера (*Voltcraft VC-820*). Према томе, за калибрацију опреме за мерење момента на пропелерском вратилу могу се користити и отпорници мање декларисане тачности, уколико се у поступак улази са тачном (измереном) вредношћу отпора.

У даљем испитивању извршена је провера утицаја величине симулиране деформације, односно величине калибрационог отпора, на резултате мерења. На слици 5.7 дата су два екстремна испитана случаја:

1. калибрација је обављена помоћу отпорника од $R_c = 96 \text{ k}\Omega$, чиме је симулирана јединична деформација од $\varepsilon = 439.92 \cdot 10^{-6}$, што одговара моменту од $Q = 2475.4 \text{ Nm}$,

2. калибрација је обављена помоћу отпорника од $R_c = 2000 \text{ k}\Omega$, чиме је симулирана јединична деформација од $\varepsilon = 21.13 \cdot 10^{-6}$, што одговара моменту од $Q = 118.9 \text{ Nm}$,

У првом случају калибрациони отпорник је добијен паралелном везом расположивих отпорника високе тачности, а у другом случају су исти отпорници били редно везани.



Слика 5.7 – Утицај величине отпора за калибрацију

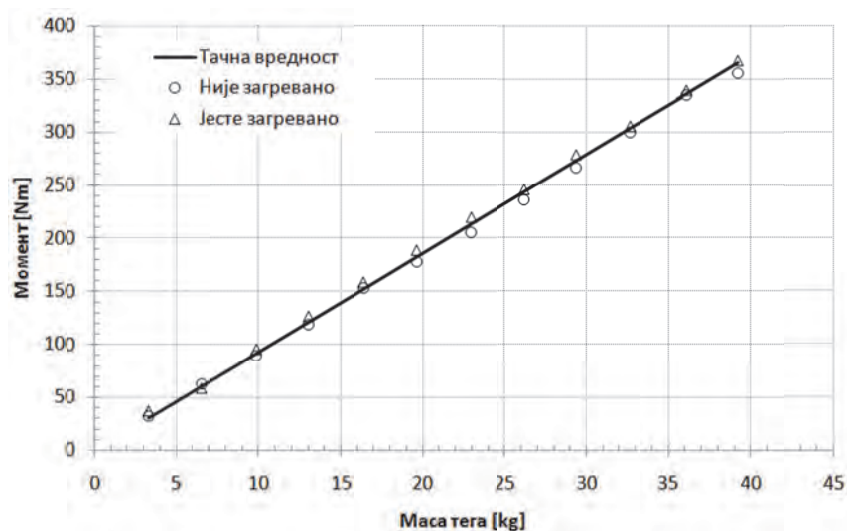
Иако је у првом разматраном случају за калибрацију коришћен отпорник којим је симулирано оптерећење далеко изван реалних вредности које је било могуће физички проверити, мерењем момента су добијене добре вредности. Осим тога, други испитани случај је показао да се при мерењу добијају добре вредности и уколико се при калибрацији симулира мање оптерећење од реалног.

Утицај температуре на калибрацију и мерење

Приликом калибрације опреме за мерење момента помоћу додатног отпорника мора се водити рачуна да се отпорник не загрева значајније у односу на прописане границе. Познато је да електрична отпорност отпорника расте са порастом температуре што може довести до грешке при калибрацији, а тиме и при мерењу. Међутим, поступак калибрације траје довољно кратко тако шанса да се отпорник прегреје није велика уколико се о овоме поведе рачуна.

Међутим, мерна трака која је монтирана на пропелерско вратило, услед чињенице да је у машинском простору на броду често и преко 50 °С, може бити изложена нешто вишој температури. Материјал од кога је направљена мерна трака такође може реаговати на утицај температуре и тиме унети грешку у мерење. Уколико се за мерења користе мерне траке код којих су сва четири отпорника, који чине мерни мост, активни (као што је био случај приликом тестирања) тада је утицај температуре на мерења сведен на најмању могућу меру. У том случају су све мерне компоненте изложене истој температури па су и промене које се на њима јављају идентичне, чиме се поништава утицај температуре на промену отпора мерне траке.

У циљу провере утицаја повишене температуре мерне траке на резултате мерења приликом тестирања је загревана зона инсталације у околини мерног места и добијени су резултати који су показани на слици 5.8.



Слика 5.8 – Утицај повишене температуре на резултате мерења

У току испитивања мерно место је загревано до температуре од око 40 °С. Како је и очекивано, показало се да повишена температура мерне траке није значајније утицала на резултате мерења.

Остали могући узроци грешака у мерењу

Уколико се при монтажи мерне траке на пропелерско вратило погрешно у углу и тиме се активне мерне компоненте траке не поставе на правце деловања главних напона смицања извесно је да ће доћи до грешке при мерењима. Приликом монтаже мерне траке на цев приликом тестирања опреме трака је била постављена под коректним углом. Испитивање утицаја грешке при монтажи мерне траке на резултате мерења није спроведено јер би то подразумевало употребу више мерних трака.

До грешке при мерењу може доћи и услед **утицаја влаге**. Влага неповољно утиче, не само на квалитет споја између мерне траке и пропелерског вратила, него и на саму карактеристику мерне траке, као и на контакте преко којих се сигнал са мерне траке преноси до опреме за аквизицију. Овај проблем се превазилази тако што се мерно место са мерном траком након монтаже и лемљења свих контаката заштити лаком или специјалном пастом. Уколико се мерно место не заштити мерења се могу обављати, али не у дужем временском периоду. Приликом тестирања мерне опреме инсталација није била изложена утицају влаге тако да није било неопходно да се мерно место посебно штити.

Један од могућих узрока грешке при мерењима може бити и евентуална **неизбалансираност мерног моста**. Под неизбалансираним мерним мостом се подразумева мост са отпорницима различите електричне отпорности у истом колу. Ово се превазилази додавањем спољашњег отпорника колу моста у циљу успостављања равнотеже. Употребом пуног моста, какав је коришћен при испитивањима, а који се састоји од четири идентична отпорника, грешка услед неизбалансираности моста је искључена.

Макар и краткотрајно **механичко преоптерећење мерне траке** може имати за последицу „померање“ свих резултате мерења реалних оптерећења. Интензитет померања свих резултата зависи од степена преоптерећења мерне траке. Иако овакво механичко „оштећење“ мерне траке није честа појава извесно може довести до грешака при мерењима.

5.3 Мерење брзине брода

За анализу енергетске ефикасности брода изузетно је важно знати колику брзину брод постиже при одређеном броју обртаја пропелера, односно при одређеној ангажованој снази. Према томе, у току спроведених мерења, при сваком од разматраних режима кретања, мерена је и постигнута брзина. Код речних бродова разликујемо две карактеристичне брзине брода:

- апсолутна брзина брода – мери се у односу на дно реке (обалу) и
- релативна брзина брода – мери се у односу на воду.

За мерење апсолутне брзине данас се најчешће користи опрема базирана на *GPS* (*Global Positioning System*), или нешто модернијој *DGPS* (*Differential Global Positioning System*) технологији која се у последње време као стандардна уграђује на бродове. Обе споменуте технологије се заснивају на одређивању положаја брода на основу удаљености транспондера који се налази на броду од најмање три различита сателита (од укупно 24 који чине овај систем). *DGPS* подразумева допунску корекцију позиције брода на основу стационарних станица које се налазе на земљи и чије позиције су познате. Осим споменутих уређаја, данас постоје и други који се могу користити за мерење апсолутне брзине брода. На морским бродовима се често уграђују стационарни уређаји који на бази Доплеровог ефекта мере брзину кретања брода. Ови уређаји емитују одређени сигнал у одређеном правцу, а потом на основу модификације фреквенције рефлектованог сигнала, од дна или других препрека, одређују брзину брода.

За анализу хидродинамичких карактеристика брода далеко је значајнија релативна брзина брода, односно брзина коју брод постиже у односу на воду. У зависности од карактеристика пловног пута (дубине, ширине, као и од водостаја) брзина тока реке може значајно утицати на релативну брзину брода. Висок водостај на рекама некада може условити и обуставу пловидбе, јер брзина тока реке може обесмислити узводну пловидбу, а низводну учинити недовољно безбедном.

Данас постоји више различитих уређаја који се могу користити за мерење брзине брода у односу на воду, од којих су неки овде наведени:

- **Питометар** – основни принцип рада заснива се на мерењу динамичког притиска узрокованог кретањем брода, одакле се директно долази до тражене брзине брода у односу на воду. Уређај се састоји од једне “U” цеви која се налази у броду и која је монтирана у близини кобилице. Отвори на цеви су изведени ван брода и то тако да је један окренут ка прамцу (мери укупни притисак p_T), а други је под углом од 90° у односу на правац кретања брода (мери статички притисак p_S). Из разлике између укупног и статичког притиска, а на основу Бернулијевог закона, може се одредити брзина брода у односу на воду:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_T - p_S)}{\rho}}$$

- **Електромагнетна сонда** – уређај ради на принципу електромагнетне индукције. Струја која протиче кроз калем уређаја, који се налази у броду, генерише магнетно поље које се простира кроз воду ван брода. Вода која струји око брода и која се понаша као проводник, доводи до поремећаја овог магнетног поља, што има за последицу појаву електромагнетне силе. Индуковани напон, који се мери на сензору уређаја, пропорционалан је брзини струјања воде око оплате брода.
- **Хидрометријско крило** – састоји се од малог импелера и струјно обликованог носача који се монтирају испод водне линије, испред прамца брода. Основни принцип рада заснован је на директној вези између брзине обртања импелера и брзине којом се брод креће у односу на воду. Битно је да импелер буде окренут у смеру кретања брода. Овај уређај је једноставан и лаган и често се користи као преносни уређај за мерење брзине струјања око брода, односно брзине кретања брода у односу на воду.

За мерење брзине брода, приликом испитивања која су спроведена за потребе овог истраживања, коришћена је опрема на бази GPS технологије. У време испитивања није било могуће прибавити одговарајући уређај којим би било могуће мерити

брзину брода у односу на воду. Према томе, да би се ово превазишло, мерења су обављана при истим режимима рада мотора у узводној и у низводној вожњи на истој деоници (кад год је то било могуће), те је на основу разлика у постигнутим брзинама процењена брзина брода у односу на воду. На овај начин није могуће одредити потпуно тачну зависност брзине брода од броја обртаја пропелера, али се може сматрати да грешка није велика.

5.4 Остали утицаји

Спољашњи утицаји и околности под којима се мерење спроводи у великој мери могу утицати на снагу коју је неопходно ангажовати у циљу постизања жељене брзине брода. Бројна ограничења пловних путева за унутрашњу пловидбу, која се у зависности од водостаја често мењају, у великој мери компликују успостављање јединствених критеријума када је реч о енергетској ефикасности речних самоходних теретних бродова. Према томе, потребно је приликом мерења апсорпције снаге повести рачина и о осталим факторима који утичу на измерену снагу, а који се могу поделити у две групе:

1. Стање брода приликом спровођења мерења
 - Оптерећење брода – на ком газу се спроводи мерење
 - Трим
 - Храпавост оплате
 - Храпавост пропелера
 - Утицај кормила и заносења брода
 - Угао курса и позиција брода у односу на ток реке

2. Спољашњи утицаји под којима се мерења спроводе
 - Дубина и ширина пловног пута
 - Ветар
 - Таласи
 - Температура воде
 - Брзина тока реке

- Утицај других бродова на истом пловном путу
- Гравитациони отпор
- Структура дна

Што се тиче анализе резултата мерења апсорбоване снаге морских бродова, када је о енергетској ефикасности реч, препоручује се од стране *MEPC*-а да се мерења обављају под околностима при којима је утицај набројаних ефеката сведен на најмању могућу меру. Како често није могуће у потпуности искључити све неповољне спољашње утицаје препоручено је да се утицаји на резултате мерења, који су уочени у току мерења, одстране накнадним прорачунима. У том смислу, могу се користити препоруке међународног стандарда *ISO-15016* [56] који је у примени од 2002. године. Овим документом су дате смернице за спровођење анализе резултата мерења на бродовима приликом пробних вожњи, а у циљу одређивања перформанси брода под прописаним околностима, које се најчешће прецизирају у уговорима о градњи бродова. Поступци за спровођење прорачуна који су овде описани могу се применити и на речне бродове, у домену у коме је реч о спољашњим утицајима који су документом обрађени. Остале утицаје, који споменути резолуцијом нису посебно разматрани, а који у случају морских бродова нису посебно интересантни, треба накнадно анализирати. Да би овакву анализу било могуће спровести неопходно је познавати све околности под којима су мерења обављана. У истраживању које је спроведено приликом израде овог рада углавном није било довољно података што је анализу чинило комплекснијом. О поступцима и препорукама за спровођење поменутих корекција детаљније ће бити речи у поглављу 7.

Из свега што је наведено у овом поглављу може се закључити да је поступак коректног мерења апсорбоване снаге изузетно комплексан и да велики број фактора може значајно утицати на измерене резултате. Према томе, при анализи разлика у резултатима мерења које су споменуте у претходном поглављу не треба искључити и могућност да су неки од набројаних утицаја приликом мерења занемарени што је могло довести до извесних грешака при мерењима, а чиме се донекле могу објаснити неки од резултата који се чине нелогичним.

6

Математички модел

6.1 Вештачке неуронске мреже – *ANN* метода

Метода базирана на тзв. вештачким неуронским мрежама (*ANN – Artificial Neural Network*) проистекла је из више деценија дугог истраживања у области развоја интелигентних технолошких система, односно вештачке интелигенције у производним технологијама. Основни циљ ових истраживања је био и остао исти: развити машину – алат - индустријског робота који „разуме“ производни задатак и који је способан да у току процеса рада, на основу сензорских система препознавања и интегрисаних алгоритама учења, оствари изванредан ниво аутономности у раду. Данас се ова математичка метода може срести осим у индустрији и у многим научним истраживањима, у разним областима, као поуздан алат за идентификацију, анализу, контролу, прогнозу и обраду података.

Иако могућности *ANN* методе далеко премашују проблем који је овде решаван, при развоју математичких модела у оквиру истраживања енергетске ефикасности речних самоходних теретних бродова, одабрана је управо ова метода. Један од разлога за овакву одлуку је тај што се у последње време све чешће појављују

математички модели – инжењерски алати за решавање различитих инжењерских проблема из области бродоградње, а који су развијани управо применом методе вештачких неуронских мрежа. У том смислу, осим потребе да се дође до поузданог математичког модела који ће бити коришћен за даља истраживања пропульзије речних самохотки, намера је била и да се истраже могућности ове методе.

Детаљније о овој методи дато је у прилогу 4.

6.2 Разматране концепције математичких модела

У поглављу 4.4 показано је да између прикупљених резултата моделских испитивања и испитивања истих бродова у природној величини постоје некада и велике разлике. Моделска испитивања се најчешће спроводе без утицаја разних спољашњих фактора који могу утицати на резултате мерења (видети поглавље 5.4), изузев утицаја дубине и ширине пловног пута. Овакве околности могу се сматрати „идеалним“ околностима. Уколико се искључи могућност грешака при мерењима добијени резултати могу се сматрати релевантним за анализу утицаја форме брода, односно пропульзивног комплекса на енергетску ефикасност самохотки.

Са друге стране, мерења апсорпције снаге на бродовима који плове у реалним околностима и који су изложени деловању многобројних утицаја, иако се чине релевантнијим за оцену енергетске ефикасности бродова, управо због ових утицаја не могу бити коришћена за споменуту анализу у изворном облику. Ове резултате би било могуће употребити за оцену ефикасности уколико би било могуће одстранити спољашње утицаје. Један од начина за добијање употребљивих резултата би могао подразумевати контролисано мерење апсорпције снаге, под следећим околностима:

- пловни пут без препрека (кривине, други бродови, мостови, промене конфигурације пловног пута, ...)
- познат пресек пловног пута са профилем брзина тока реке

- мирно време (нема таласа ни ветра)
- познато стање пропелера и оплате брода (храпавост и евентуална оштећења)
- брод утоварен тако да плови на равној кобилици (без трима)
- употреба кормила сведена на минимум

Други начин би подразумевао мерење свих значајних спољашњих утицаја у току спровођења мерења апсорпције снаге са циљем да се накнадном анализом резултата спољашњи утицаји елиминишу, нпр. према препорукама које су дате у [56].

Пошто у подацима који чине трећу групу испитивања (видети поглавље 4.4), а који се односе на испитивања бродова у природној величини, нису биле констатоване околности при којима су мерења обављана, одлучено је да даља истраживања буду базирана на математичком моделу који ће бити развијен на основу расположивих моделских испитивања. У том смислу, од свих расположивих резултата мерења, формиране су две групе података:

- **Моделска испитивања** - друга група мерења, која садржи моделска испитивања, допуњена је испитивањима из прве групе резултата (видети прилог 1) за које је процењено да су добијени моделским испитивањима. Критеријум за процену извора резултата је била систематичност мерења. Уколико су дати резултати испитивања истог брода при више различитих газова, или при више различитих дубина воде, а да су при томе вариране вредности дате са одређеним кораком, процењено је да се ради о моделским испитивањима.
- **Мерења на бродовима** – трећа група испитивања (прилог 1) допуњена је испитивањима из прве групе за које је процењено да не потичу од моделских испитивања.

На тај начин су разврстани сви расположиви резултати мерења у две групе и формиране су базе које су послужиле за даљу анализу.

Табела 6.1 – Класификација свих расположивих резултата мерења апспције снаге

База	Испитивања (прилог 1)	Број испитивања	Број мерења
Моделска испитивања	1÷35, 42÷49, 54÷73	63	631
Испитивња на бродовима	36÷41, 50÷53, 74÷102	39	261
Укупно		102	892

6.3 Математички модел базиран на моделским испитивањима

Базу за формирање математичког модела заснованог на моделским испитивањима апсорпције снаге речних самоходних теретних бродова чине 63 испитивања са укупно 631 мерењем. Треба напоменути да су у највећем броју случајева резултати били представљени у форми дијаграма код којих је на ординати била предата снага, а на апсциси постигнута брзина. Према томе, први корак је подразумевао дигитализацију резултата мерења - читавање вредности из дијаграма и формирање нумеричке базе података. За потребе читавања вредности сви расположиви дијаграми су скенирани и потом софтверски обрађени у циљу отклањања грешака приликом каснијег читавања вредности. Применом програма *TechDig* извршено је читавање вредности и формиране су табеле са резултатима мерења, које су погодне за даљу припрему за формирање математичког модела. Ради припреме улазне матрице за програм *aNETka V2.0*, којим је обављено „тренирање“ вештачке неуронске мреже приликом развоја математичког модела, развијен је програмски код у *Visual Basic*-у у оквиру *Excel*-а. Овај програм, у каснијим фазама анализе, проширен је допунским модулима који су служили за проверу математичке стабилности и анализу поузданости добијеног математичког модела.

6.3.1 Разматрања независних променљивих

За разлику од регресионе анализе која се већ деценијама користи за развој математичких модела у бродоградњи (у даљем тексту *ММ*) и којом су скоро сви

ММ који данас постоје и развијени, када је реч о *ANN* методи избору независних променљивих приликом развоја *ММ* је потребно посветити нешто више пажње.

Приликом развоја *ММ* применом регресионе анализе независне променљиве (улазне вредности које се приликом мерења задају) се састоје од две групе података:

- основне независне променљиве које чине подаци који су варирани приликом реализације испитивања (дужина брода, ширина, депласман, ...) и
- изведене независне променљиве које су добијене комбинацијама основних независних променљивих уз примену основних математичких операција или елементарних функција.

На тај начин се приликом формирања *ММ* долази до групе од више стотина „независних“ променљивих. Уколико је неки од значајних параметара и промакао приликом формулисања базе основних независних величина, велика је вероватноћа да ће се исти у неком облику појавити при дефинисању изведених независних величина. Статистичком обрадом свих расположивих података долази се до тзв. „најбољег математичког модела“ који најчешће чини свега пар десетина најутицајнијих „независних“ променљивих, док остале као мање значајне бивају одбачене.

При развоју математичког модела *ANN* методом потребно је на почетку дефинисати мали број независних величина и коначан модел ће бити базиран управо на овим улазним параметрима. Дакле, уколико је избор независних променљивих погрешан није могуће доћи до доброг математичког модела. Са друге стране, уколико се у старту претпостави већи број независних променљивих, *ММ* ће бити компликованији за примену, а провера математичке стабилности добијеног *ММ* је значајно комплекснија.

Приликом развоја *ММ* за процену апсорпције снаге речних самоходних теретних бродова, а на бази расположивих резултата моделских испитивања, разматрано је неколико случајева. Последњи покушај је дао прихватљив модел који је и

најдеталније тестиран, док су из осталих покушаја, који су одбачени, изведени одговарајући закључци који се пре свега односе на пут којим треба (или не треба) ићи приликом примене ове методе.

Имајући у виду да је циљ *ММ* даља анализа енергетске ефикасности ове групе бродова при пловидби у реалним околностима, било је неопходно да се међу изабраним независним променљивим нађу и димензије брода, али и карактеристике пловног пута. Према томе, у једном од многих покушаја су за основу базе усвојене следеће независне променљиве:

$$C_D = f\left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}, \frac{B \cdot D}{T^2}, \frac{B \cdot T}{b \cdot h}, \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}\right)$$

где је са C_D означен коефицијент предате снаге који се може одредити из следећег израза:

$$P_D = \rho \cdot \nabla^{2/3} \cdot V^3 \cdot C_D$$

За први члан је усвојен тзв. коефицијент виткости јер је добро познато да овај параметар брода значајно утиче на отпор брода, нарочито при већим брзинама.

Други члан је „компонован“ од два параметра. Први представља однос ширине и газа брода којим се уз коефицијент виткости описује форма брода, док други члан представља однос пречника пропелера (D) и газа брода. Приликом формирања базе бродова у поглављу 3 на неколико примера је показано да пречник пропелера утиче на ефикасност пропулзивног комплекса па је према томе сасвим оправдано размотрити могућност увођења ове величине међу независне променљиве.

Трећим чланом се настојало да се у анализу уврсте и карактеристике пловног пута – ширина (b) и дубина воде (h). Да би независна променљива била у бездимензионој форми овај члан је развијен као производ следећих односа:

- однос ширине брода и ширине пловног пута и
- однос газа брода и дубине воде.

За последњи члан, који зависи од брзине брода је усвојен Фрудов број на бази дубине воде.

Међутим, упркос на први поглед сасвим логичном избору независних променљивих, као и избору коефицијента предате снаге у форми која се појављује у многим стручним радовима, који се баве проблемима пропулзије речних бродова, након више десетина покушаја де се дође до математичког модела који би био прихватљив, од оваквог приступа се одустало.

Један од разлога за одбацивање ове конфигурације донекле се може приписати и самој методи која је коришћена. Наиме, добијено је више *ММ* који су могли бити прихваћени уколико би једини критеријум за њихово прихватање била тачност са којом *ММ* прате резултате мерења који су коришћени приликом њиховог развоја. Међутим, приликом провера поузданости добијених *ММ* ни један од разматраних случајева на промене:

- пречника пропелера,
- дубине води и
- ширине пловног пута

није реаговао у складу са очекивањима. На основу анализе коефицијената добијених *ММ*, који представљају тежинске односе између појединих неурона усвојених истренираних вештачких неуронских мрежа, уочено је да су добијеним моделима ове промене заправо биле пригушене. Ово се огледало у негативном предзнаку кључних тежинских односа, који су имали за последицу да имениоци утицајних чланова којима се множе друга и трећа независна променљива имају велике вредности.

У даљим покушајима да се добије добар математички модел мењане су тзв. независне променљиве, али и сама једначина којом је описан коефицијент предате снаге.

6.3.2 Разматрања конфигурације вештачке неуронске мреже

Приликом избора конфигурације вештачке неуронске мреже која ће бити „тренирана“, у складу са базом података која је формирана на основу мерења, на располагању су била три типа активационих функција и могућност проширења мреже до максимално осам слојева. Ово су ограничења програма који је коришћен.

Приликом избора активационе функције којом се подаци обрађују унутар неурона, на располагању су три типа функција:

- **линеарна функција** – описана је једначином

$$y = a \cdot x + b$$

Имајући у виду карактер промене овог типа функције, помоћу кога је могуће описати искључиво линеарне промене и да се ово не може променити повећавањем броја скривених слојева, овај тип функције је одбачен.

- **Сигмоидна функција** – описана је једначином

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

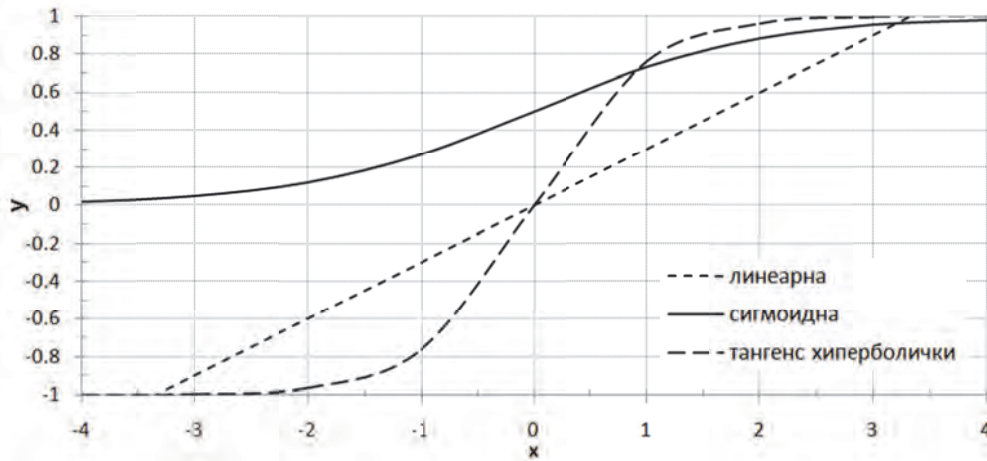
Сигмоидни тип активационе функције се, имајући у виду карактер промене, може применити при развоју траженог математичког модела. У том смислу је испитан већи број случајева.

- **Тангенс хиперболички** – описан је једначином

$$y = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

И овај тип активационе функције се може применити при развоју траженог математичког модела. Сви анализирани случајеви су тестирани и при овом типу активационе функције.

Карактеристике ових функција су показане на следећем дијаграму.



Слика 6.1 – Расположиви типови активационих функција

Што се тиче избора броја слојева (са неуронима) као и броја неурона у сваком од слојева, на основу великог броја испитаних случајева, утврђено је да се са усложњавањем мреже значајно повећава број чланова математичког модела. Истовремено *ММ* се више „натеже“ како би „погодио“ сваку тачку из базе за тренирање, али расте вероватноћа математичке нестабилности модела. Број чланова модела може се одредити на основу усвојене конфигурације мреже из следећег израза:

$$bc = \sum_i^{N-1} [(a_i + 1) \cdot a_{i+1}] + (a_1 + a_N) \cdot 2$$

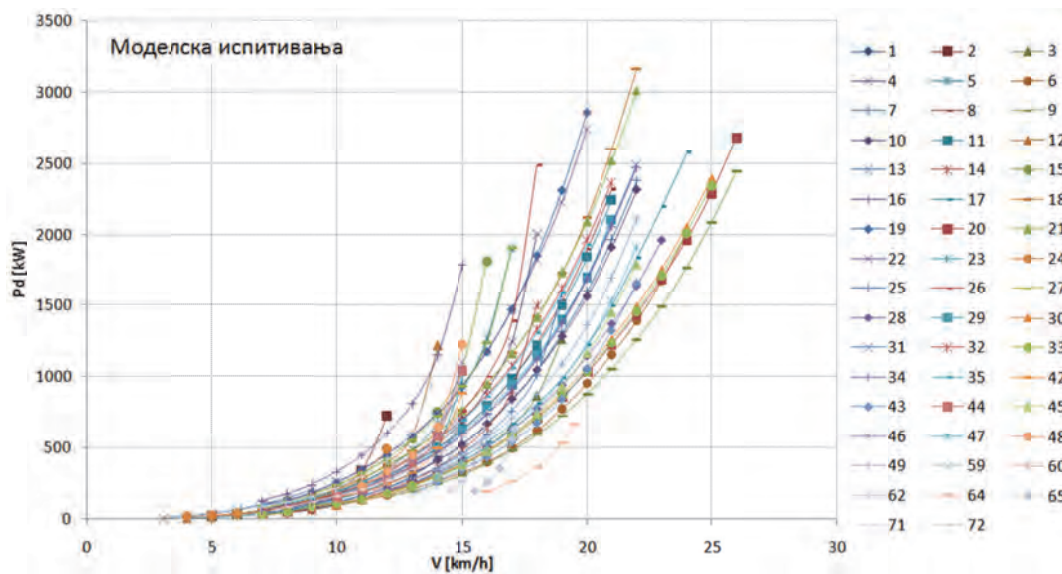
У претходном изразу је са N обележен број слојева у мрежи, а са a_i је означен број неурона у сваком слоју.

Према томе, број слојева и број неурона у сваком слоју је остављен аутору математичког модела да сам изабере у циљу проналажења довољно доброг решења и са аспекта поузданости, као и применљивости модела у пракси.

6.3.3 Изведени математички модел

Приликом развоја *ММ*, којим су обухваћени резултати моделских испитивања речних самоходних теретних бродова, коришћене су различите технике које су имале за циљ да се добије што бољи модел. У неколико случајева, где је то имало

смисла, додаване су вредности којима је повећаван значај појединих резултата мерења, а чији је циљ био тзв. „навлачење“ *ММ* како би што боље била покривена база са резултатима мерења. У случајевима када су се резултати мерења у већој мери разликовали од очекиваних (имајући у виду димензије бродова и околности под којима су мерења обављена) и тиме значајно кварили математички модел, „повлачећи“ резултате на погрешну страну, мерења су одбацивана. На тај начин добијена је коначна база у основном облику (предата снага у функцији брзине), а задржана мерења су приказана на следећем дијаграму:



Слика 6.2 – Резултати моделских испитивања – база за развој математичког модела

У претходном дијаграму резултати мерења су обележени у складу са редним бројевима испитаних случајева како су дати у прилогу 1. Осим тога, иако су ова мерења обављана на моделима, резултати који су били доступни из разних извора већ су били екстраполирани на бродове реалних димензија.

Након више десетина покушаја са различитим конфигурацијама вештачких неуронских мрежа, различитим активационим функцијама, као и различитим улазним – независним, односно излазним – зависним променљивим, усвојена је најпогоднија вештачка неуронска мрежа. Основне карактеристике изведене вештачке неуронске мреже су:

- Усвојена је следећа конфигурација мреже: $5 + 11 + 5 + 1$. Ово значи да мрежа има један улазни слој са пет неурона – независних променљивих, да има два скривена слоја са по једанаест у првом и пет неурона у другом и један излазни слој са једном излазном променљивом – коефицијентом предате снаге.
- Усвојене су следеће независне променљиве:

$$X_1 = \frac{L}{\sqrt[3]{1/3}} , \quad X_2 = \frac{B}{T} , \quad X_3 = b , \quad X_4 = h , \quad X_5 = \frac{V}{\sqrt{g \cdot R_h}}$$

Са R_h је означен тзв. хидраулички радијус који је одређен следећом зависношћу:

$$R_h = \frac{b \cdot h - B \cdot T}{2 \cdot (h + T) + b + B}$$

Хидраулички радијус, како га је још Ландвебер (*Landweber*) [60] дефинисао, представља однос површине попречног пресека канала умањен за површину попречног пресека брода и оквашеног обима канала и брода. У овом изразу је оквашени обим главног ребра дат приближно, као сума ширине брода и двоструког газа, што је блиско реалном стању имајући у виду форме ових бродова.

Треба уочити да је уместо Фрудовог броја на бази дужине, који се уобичајено користи када се разматра отпор депласманских бродова, или Фрудовог броја на бази дубине воде, који се користи када је реч о пловидби у плиткој води, уведен модификован Фрудов број – на бази хидрауличког радијуса. Ова измена је уведена са намером да се утицају ширине пловног пута, а који је при пловидби на рекама често ограничавајући фактор, у *ММ* да већи значај. Уколико је ширина пловног пута далеко већа од дубине воде ($b \gg h$), односно када ширина тежи бесконачности, израз за хидраулички радијус се своди на дубину воде:

$$\lim_{b \rightarrow \infty} \frac{b \cdot h - B \cdot T}{2 \cdot (h + T) + b + B} = h$$

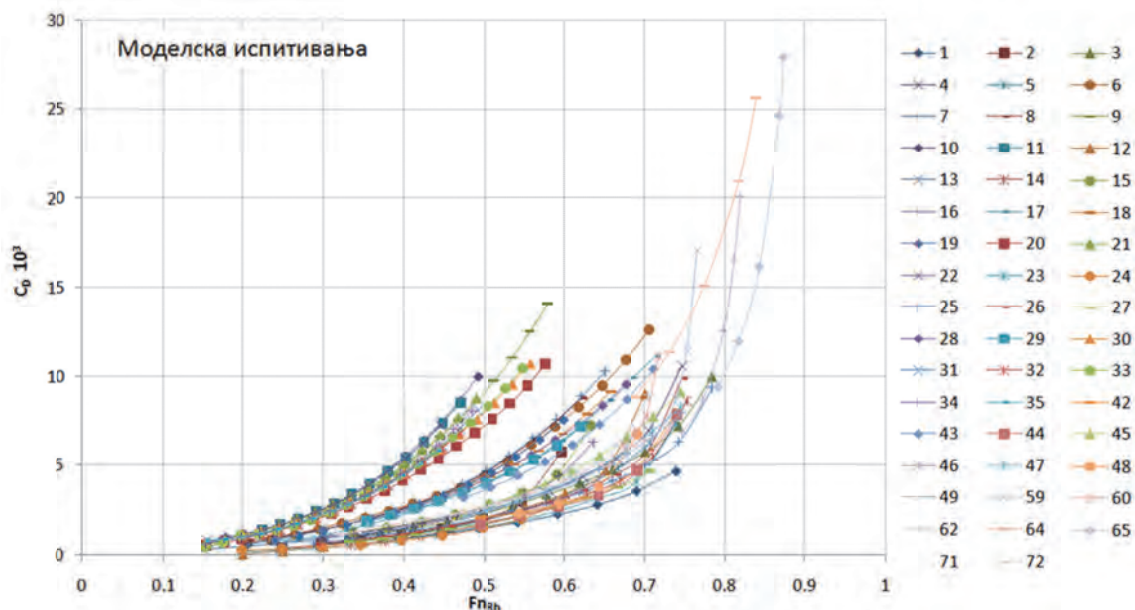
Сви покушаји да се усвојене независне променљиве представе у бездимензионом облику нису дали добре резултате и на крају се од овога одустало. То је разлог што су променљиве које садрже ширину пловног пута и дубину воде (X_3 и X_4) остављене у димензионом облику. Сасвим сигурно је могуће пронаћи начин којим би ово могло бити превазиђено али је процењено да ово заправо и није нарочито важно те се од даљих покушаја одустало.

- За зависну променљиву усвојен је коефицијент предате снаге који је дефинисан следећим изразом:

$$C_D = \frac{P_D}{\nabla \cdot \rho \cdot g \cdot V}$$

- Усвојена је сигмоидна активациона функција јер су применом овог типа активационе функције добијени бољи резултати.

Након прерачунавања свих расположивих резултата добијена је база модификованих резултата мерења на основу којих је формиран улазни фајл за тренирање вештачке неуронске мреже.



Слика 6.3 – Резултати моделских испитивања – модификована база за развој *ММ*

Након „тренирања“ усвојене вештачке неуронске мреже, у складу са описаном базом података коју чине расположиви резултати моделских испитивања речних самохотки, усвојен је најбољи математички модел који је било могуће добити. Математичка формулација, којом се може представити усвојени математички модел, је дата следећим изразом:

$$Y = \frac{f \left\{ c + \sum_{i=1}^5 \left\{ C_i \cdot f \left[b_i + \sum_{j=1}^{11} \left[B_{ij} \cdot f \left(a_j + \sum_{k=1}^5 \left(A_{kj} \cdot (P_k \cdot X_k + R_k) \right) \right) \right] \right\} \right\} - G}{L}$$

У претходном изразу са $f(x)$ је представљена усвојена сигмоидна активациона функција:

$$f(x) = sig(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Са X_k су означене усвојене независне променљиве, а Y представља тражену зависну променљиву – коефицијент предате снаге: $Y = 10^3 \cdot C_D$.

Коефицијенти математичког модела, којих има 144, дати су у табели 6.2.

Табела 6.2 – Коефицијенти математичког модела

A_{1j}	A_{2j}	A_{3j}	A_{4j}	A_{5j}	a_j	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	c
-2.62973	1.03914	0.54515	-5.22671	0.54363	0.83240	-4.85348	0.74726	-4.54208	-3.74272	-6.29805	13.10090
-2.45093	0.02407	1.29390	-0.82279	1.99099	-2.12594						
0.34665	1.10963	-1.53864	-10.63455	6.50289	-4.54323						
3.07244	-1.76541	-0.19061	-1.25267	1.60924	1.20133						
4.38140	3.56541	0.95153	-0.78922	2.46340	2.86918	P_k	R_k	G	L		
-2.47526	-0.00234	1.22394	-5.83226	-0.86820	0.14227	0.19603	-1.07549	0.04841	0.03232		
-1.50350	0.78361	-2.33393	-0.89590	2.91578	2.17729	0.12305	-0.42813				
3.30634	2.21796	2.03846	5.48810	-1.39568	-2.34102	0.00327	-0.35909				
0.80852	0.32919	-4.21854	6.72520	14.27642	-15.68451	0.05678	-0.10615				
0.57896	-5.87356	0.64051	-9.73264	8.95593	-6.73497	1.24647	-0.13955				
-0.41949	1.62357	0.51128	5.05424	2.56605	-4.88347						
B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}	b_i
1.85458	-1.60346	-1.39233	-0.78252	3.80301	0.99054	-1.53327	-3.80687	-10.45898	-6.49082	-1.31314	5.06873
1.52137	-0.20169	-0.13242	-1.16487	2.29852	0.50053	-0.41515	-3.10789	-4.87319	-3.18205	-1.42125	3.84613
2.17873	-1.42456	1.97323	-1.15006	1.31352	-2.00239	-2.37647	-2.83132	-2.35419	1.10889	-0.36411	2.79079
3.21958	-2.71332	-6.61645	-4.34655	0.89775	-3.86923	-2.40985	3.89709	-0.87180	0.45096	-3.47135	4.27677
1.00840	-1.17829	-1.29786	-0.89079	3.88267	-0.25514	-1.01372	-1.92177	-8.20337	-12.13766	-0.51855	4.56944

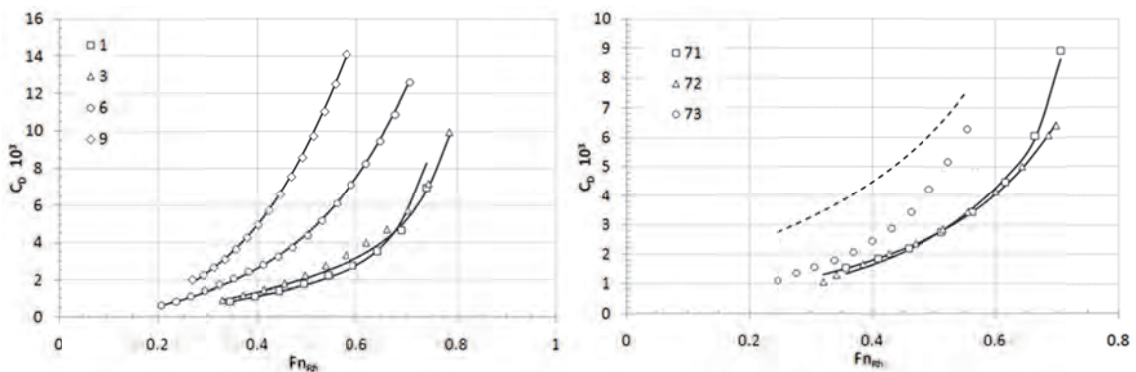
Средње квадратно одступање развијеног математичког модела у односу на све резултате мерења који су коришћени при развоју модела износи 3.75%.

6.3.4 Анализа стабилности модела и граница за примену

Под стабилношћу математичког модела се подразумева да унутар граница за примену не сме бити промена које нису у складу са природом физичке појаве која се моделом описује. У том смислу, провера је спроведена у два правца. Први правац је подразумевао проверу вредности које се добијају применом развијеног математичког модела за улазне променљиве које су коришћене приликом развоја модела. У другом кораку су независне променљиве вариране између минималних и максималних вредности са малим кораком и праћено је како се математички модел „понаша“.

Провера модела поређењем са резултатима мерења – 2D провера

Поређења израчунатих вредности са полазним резултатима мерења дата су на дијаграмима у прилогу 5. Из датих дијаграма може се уочити да резултати добијени применом модела (прорачуном) веома добро прате резултате мерења у свим случајевима који су коришћени при развоју модела. У случају моделских испитивања која су при развоју модела одбачена, моделом се добијају некада и изузетно велика одступања. Пример добијених резултата је показан на слици 6.4. Тачкама су представљене измерене вредности, пуне линије су добијене применом математичког модела на испитивања која су коришћена при његовом развоју, а испрекиданом линијом су приказани резултати примене модела на случај испитивања која нису коришћена при развоју модела.



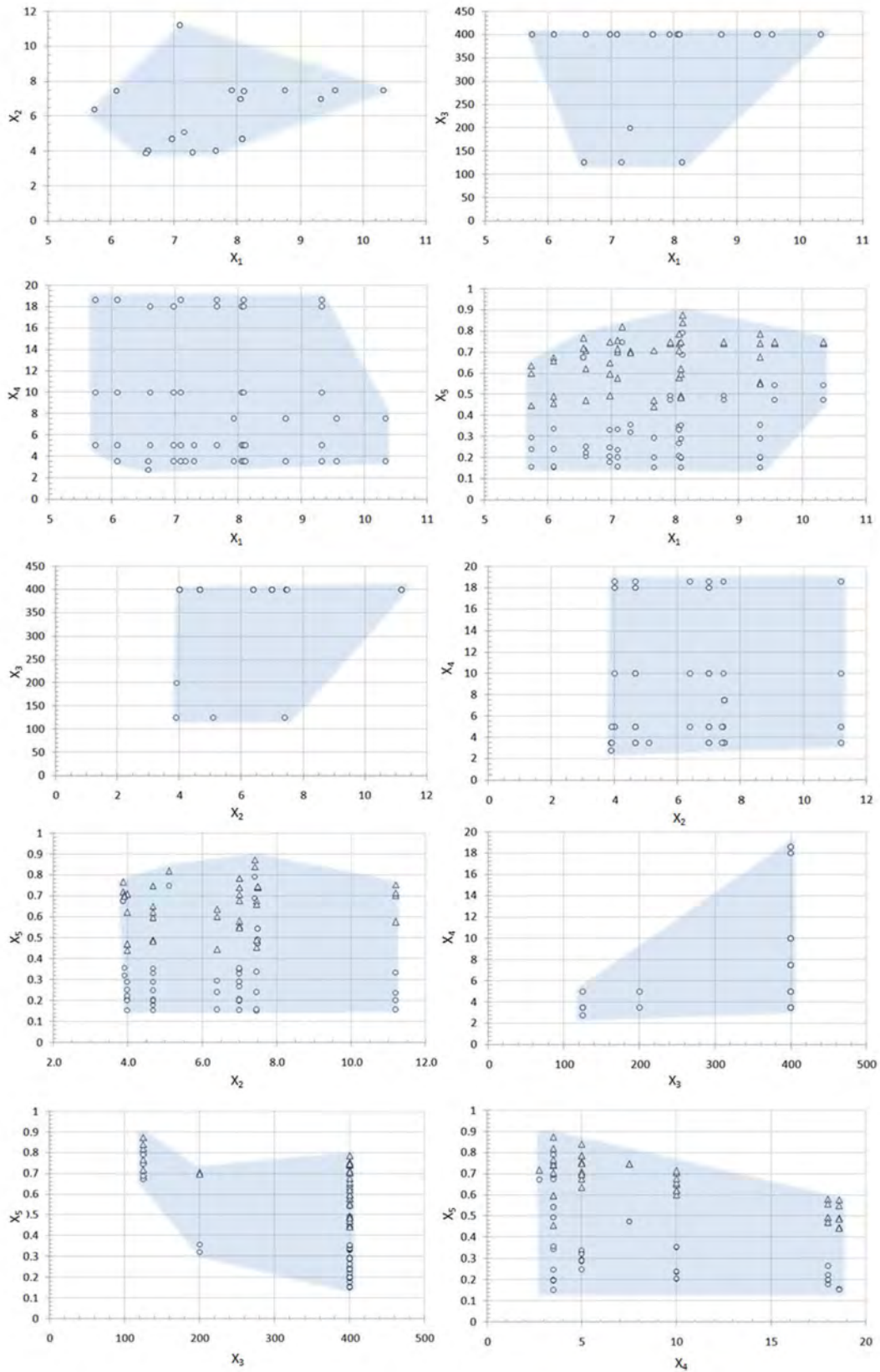
Слика 6.4 – Поређење израчунатих вредности са резултатима мерења

На сликама П5.4 и П5.5, које су дате у прилогу 5, могу се уочити велика одступања у случају малог броја испитивања (9%) која су приликом развоја модела одбачена, јер су у већој мери кварила модел. На основу расположивих података ову разлику није могуће објаснити.

Провера просторне стабилности модела – 3D провера

Иако програм *aNETka V2.0* пружа могућност да се одређени проценат података из базе, који се бира методом случајног узорка, не користи директно при развоју модела, него да се користи за његову проверу, приликом „тренирања“ вештачке неуронске мреже, као база за развој модела, коришћени су сви расположиви подаци. На овај начин је остварен виши степен контроле коришћене методе, док је провера математичке стабилности спроведена накнадно варијацијама независних променљивих унутар читаве области са малим кораком, што проверу чини знатно детаљнијом.

Овакав начин провере подразумева дефинисање граница у оквиру којих се независне променљиве могу мењати. На слици 6.5 дате се области у којима се крећу независне променљиве које су коришћене приликом развоја математичког модела. Тачке на дијаграмима представљају тачке у којима су мерења обављена. Може се уочити значајно расипање појединих величина, док су неке променљиве мењане кроз више или мање вредности које се понављају. Осим тога, могу се уочити и зоне унутар осенчених области које нису покривене мерењима, те се према томе не може са сигурношћу тврдити какви се резултати у тим зонама могу очекивати. Ово је последица недовољне систематичности мерења која чине базу података. Према томе, у будућим истраживањима било би оправдано, у циљу провере, поновити мерења за случајеве који су одбачени приликом развоја математичког модел због значајнијих одступања, као и усредсредити се на испитивања бродова која би допринела равномернијем покривању наведених подручја.



Слика 6.5 – Области у којима се крећу независне променљиве

На основу дијаграма датих на слици 6.5 математички су формулисане границе којима су обухваћене области у којима се крећу разматране независне променљиве. Ове границе су приказане у следећој табели:

Табела 6.3 – Границе за примену математичког модела

$5.6 \leq X1 \leq 10.4$		$X4 < 0.05 \cdot X3 - 1.18$	
$X2 > -2.8 \cdot X1 + 22.18$	$X1 < 6.6$	$X4 < 18.6$	
$X2 > 3.7$	$6.6 \leq X1 < 7.6$	$X5 > 0.29 \cdot X1 - 2.55$	$X1 \geq 9.2$
$X2 > 1.34 \cdot X1 - 6.52$	$X1 \geq 7.6$	$X5 < 0.13 \cdot X1 - 0.1$	$X1 < 6.6$
$X2 < 3.27 \cdot X1 - 11.79$	$X1 < 7.1$	$X5 < 0.065 \cdot X1 + 0.35$	$6.6 \leq X1 < 8.15$
$X2 < -1.12 \cdot X1 + 19.35$	$X1 \geq 7.1$	$X5 < -0.053 \cdot X1 + 1.31$	$X1 \geq 8.15$
$X3 > -343.75 \cdot X1 + 2359.375$	$X1 < 6.5$	$X5 < 0.032 \cdot X2 + 0.66$	$X2 < 7.5$
$X3 > 125 \cdot X1 - 900$	$X1 \geq 8.2$	$X5 < -0.038 \cdot X2 + 1.18$	$X2 \geq 7.5$
$X3 > 72.37 \cdot X2 - 410.53$	$X2 \geq 7.4$	$X5 > -0.0047 \cdot X3 + 1.23$	$X3 < 200$
$125 \leq X3 \leq 400$		$X5 > -0.00075 \cdot X3 + 0.45$	$X3 \geq 200$
$X4 > -3.67 \cdot X1 + 25.6$	$X1 < 6.3$	$X5 < -0.0023 \cdot X3 + 1.15$	$X3 < 200$
$X4 > 0.24 \cdot X1 + 0.96$	$X1 \geq 6.3$	$X5 > 0.0005 \cdot X3 + 0.6$	$X3 \geq 200$
$X4 < -11.1 \cdot X1 + 122.94$	$X1 \geq 9.4$	$X5 < -0.019 \cdot X4 + 0.95$	
$X4 > 0.135 \cdot X2 + 1.98$		$X5 > 0.13$	
$X4 > 0.0036 \cdot X3 + 2.045$			

На слици 6.5, осим области унутар осенчених зона које нису довољно покривене мерењима, може се уочити и постојање међусобне зависности између граница разматраних независних променљивих. Ово може представљати проблем при анализи утицаја промена појединих величина на предату снагу, тим пре што се модел састоји од пет независних променљивих које су изведене на основу седам величина које се односе на димензије и депласман брода, постигнуту брзину и карактеристике пловног пута (дубину и ширину). То практично значи да се варијације једне или више променљивих приликом провере математичке стабилности модела одражавају на границе осталих, што значајно сужава границе, а тиме и могућности примене математичког модела при анализи утицаја појединих промена.

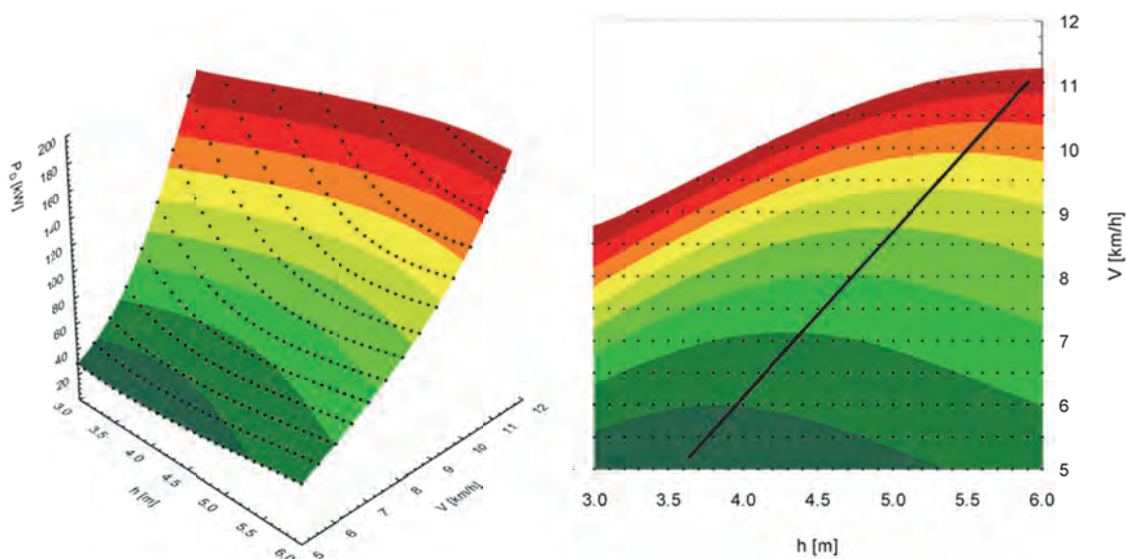
Према томе, са циљем провере просторне стабилности усвојеног математичког модела, као и начина на који математички модел „реагује“ на промене појединих параметара, имајући у виду физички карактер појаве која је разматрана,

испитивање је спроведено у значајно ширим – габаритним границама, некада и изван граница које су одређене расположивом базом података.

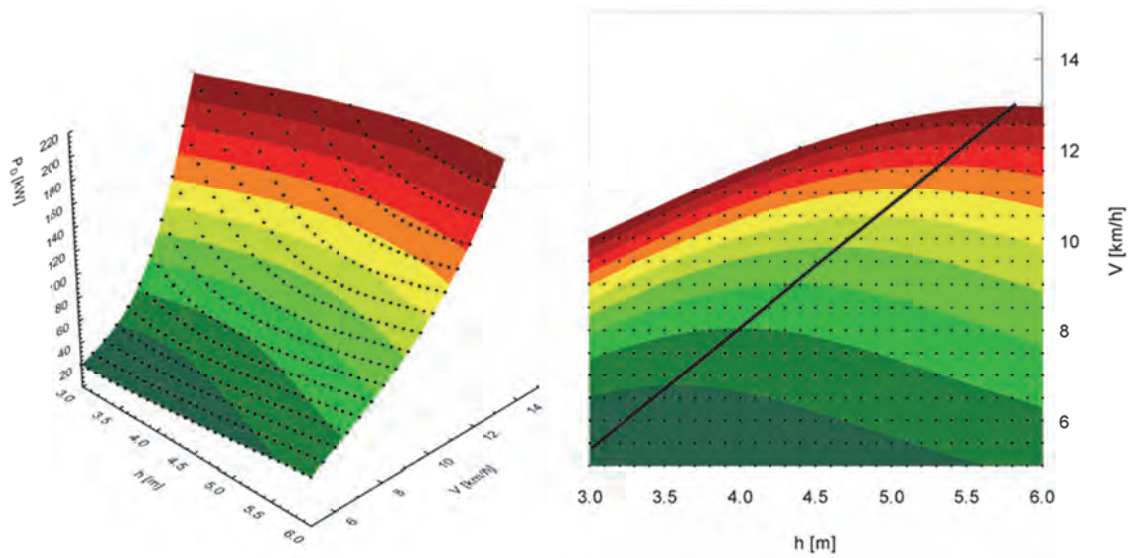
Приликом провере просторне стабилности усвојеног математичког модела разматран је велики број случајева где су вариране поједине независне променљиве од минималних до максималних вредности, а некада и шире, и праћено је како се ове промене одражавају на резултате које даје модел. Овде је, пре свега, био циљ да се провери у којој мери промене независних променљивих имају за последицу резултате који су у складу са очекиваним физичким карактером промене зависне променљиве. Сам поступак је обиман јер је потребно размотрити велики број случајева управо из разлога што је модел базиран на пет независних променљивих.

Детаљном провером је уочен проблем који је до изражаја дошао приликом анализе утицаја промене дубине воде при пловидби брода пловним путем константне ширине.

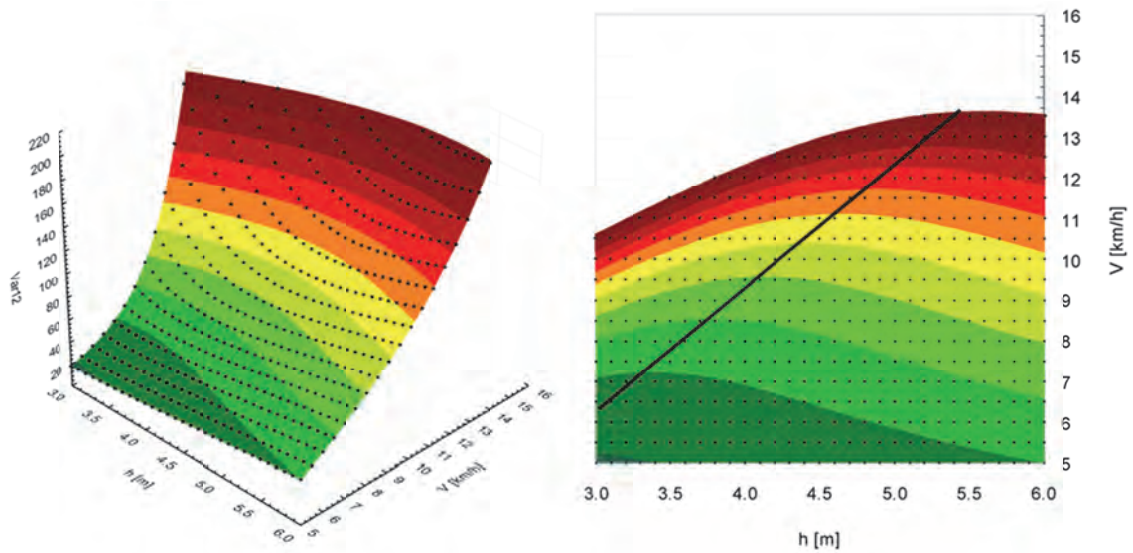
На сликама 6.6 до 6.8 показани су резултати који су добијени применом *ММ* за случај брода 97 (прилог 1) при пловидби каналима различитих ширина. Овде треба имати у виду да испитивање брода ових димензија није коришћено при развоју модела.



Слика 6.6 – Утицај промене дубине воде на потребну снагу ($b = 50m$)



Слика 6.7 – Утицај промене дубине воде на потребну снагу ($b = 100m$)

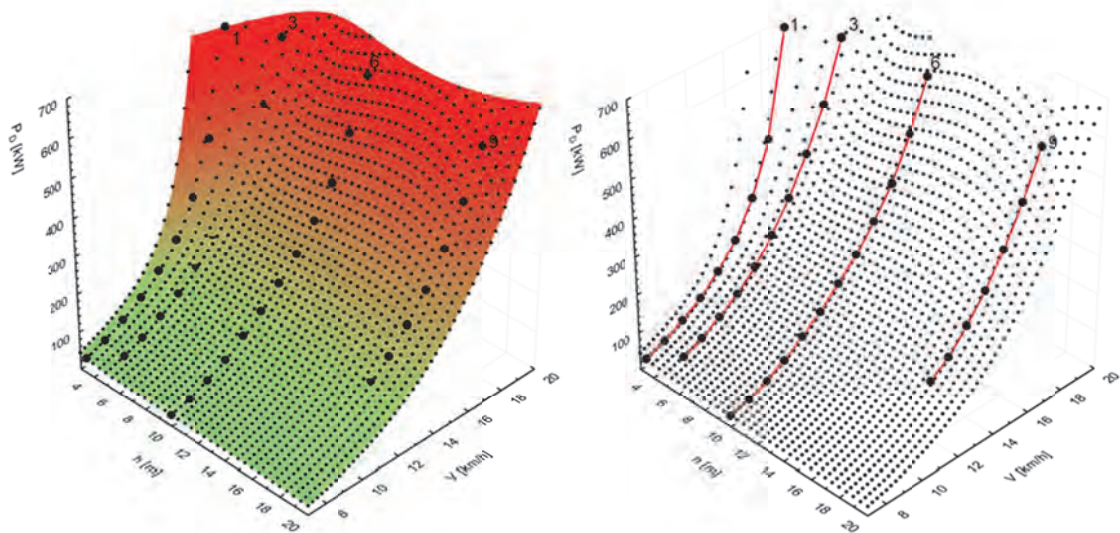


Слика 6.8 – Утицај промене дубине воде на потребну снагу ($b = 150m$)

Према резултатима, који се добијају применом изведеног математичког модела, на свим датим дијаграмима јасно се може уочити да са повећањем дубине воде потребна снага за постизање исте брзине у почетку опада, што је израженије при већим брзинама, да би након што достигне минималну вредност потребна снага почела да расте. Ова појава се боље може уочити на дијаграмима који су дати са десне стране где је дат приказ добијених резултата у погледу одозго са учртаном границом од које резултати нису у складу са очекиваном променом разматране

појаве. Из датих дијаграма се може уочити да се са повећањем ширине пловног пута ова граница помера ка нижим дубинама.

Поређење резултата који се добијају рачунским путем (површ) са резултатима моделских испитивања бродова 1, 3, 6 и 9 (тачке), чије су димензије дате у прилогу 1, а који су коришћени при развоју модела, приказано је на слици 6.9.



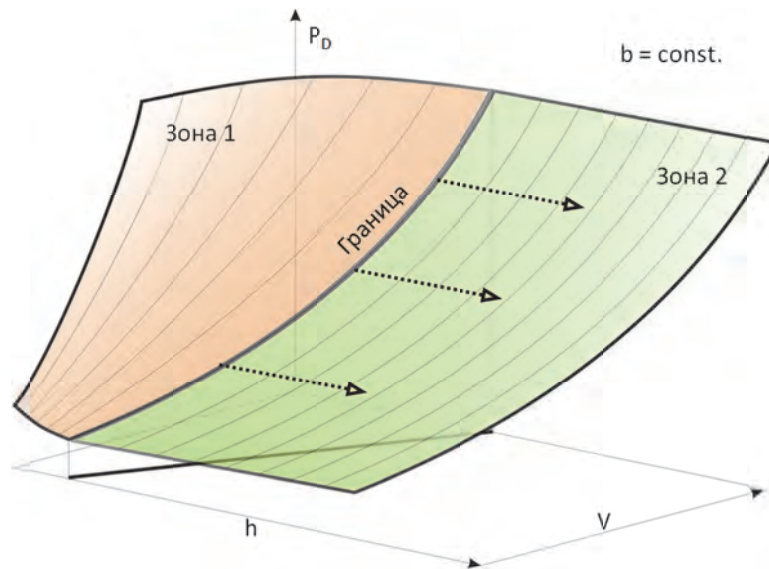
Слика 6.9 – Поређење израчунатих са измереним вредностима ($b = 400m$)

Иако све четири криве „леже“ на добијеној површи приметно је „таласање“ површи између кривих у области већих дубина воде што је последица „натезања“ површи како би што боље била покривена критична зона са плитком водом.

Већ из резултата који су овде показани намеће се закључак да постоји проблем који се огледа у нелогичном карактеру промене потребне снаге, који долази до изражаја у води веће дубине. Ово је последица недовољног броја расположивих испитивања, која су несистематична и не покривају довољно добро област која је значајна за истраживање енергетске ефикасности речних самохотки. Најбољи начин да се ово превазиђе је да се база са резултатима моделских испитивања, која је коришћена при развоју математичког модела, допуни новим мерењима, чиме би ова област била равномерније покривена. Међутим, у недостатку нових мерења, а у духу настојања да се расположиви подаци што боље искористе наметнула се потреба за делимичном модификацијом развијеног математичког модела.

Модификација усвојеног математичког модела

На основу великог броја резултата добијених применом *ММ* за различите димензије бродова, различите ширине и дубине воде закључено је да би имало смисла увести границу којом би математички модел био подељен на две области. Једна област би покривала зону где је изражен неповољан утицај ограничења пловног пута (зона 1 на слици 6.10), док би друга област, где је утицај дубине воде мање изражен (зона 2), била изведена из граничне криве. На сликама 6.6 до 6.8 приказане су граничне криве (дате на десним дијаграмима) у складу са описаним поступком.



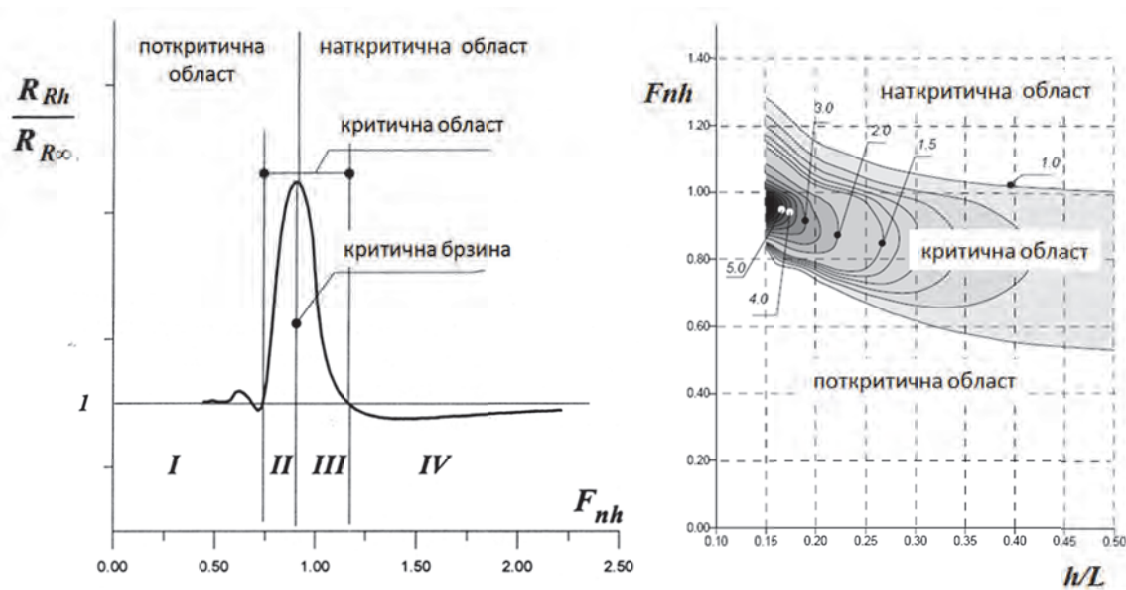
Слика 6.10 – Принцип модификације математичког модела

На овај начин био би одстрањен утицај критичне области на подручје у коме нема израженог утицаја дубине воде. Вероватно да би се сличан ефекат могао постићи и уколико би база података на основу којих је развијан математички модел била проширена додавањем већег броја „вештачких мерења“ (енг. *dummy data*) изведених применом описане логике. Међутим, услед широких граница, у којима се крећу димензије разматраних бродова, требало би додати сувише велики број допунских „корекционих“ података.

Друго значајно питање би могло да се односи на оправданост узимања у обзир утицаја мањих ширина пловних путева при развоју модела. Тим пре, што се

највећи број расположивих мерења односи на услове у којима се ширина пловног пута може сматрати великом. Међутим, како речне самохотке неретко плове и у условима ограничених пловних путева по ширини, процењено је да при анализи енергетске ефикасности овај утицај не треба да буде занемарен.

Познато је да дубина воде почиње да има утицаја на отпор брода при Фрудовом броју на бази дубине од око 0.7, а некада и мање. У [61] теоријски је показано како однос дубине воде и дужине брода утиче на хидродинамичке појаве до којих долази при пловидби брода у плиткој води.



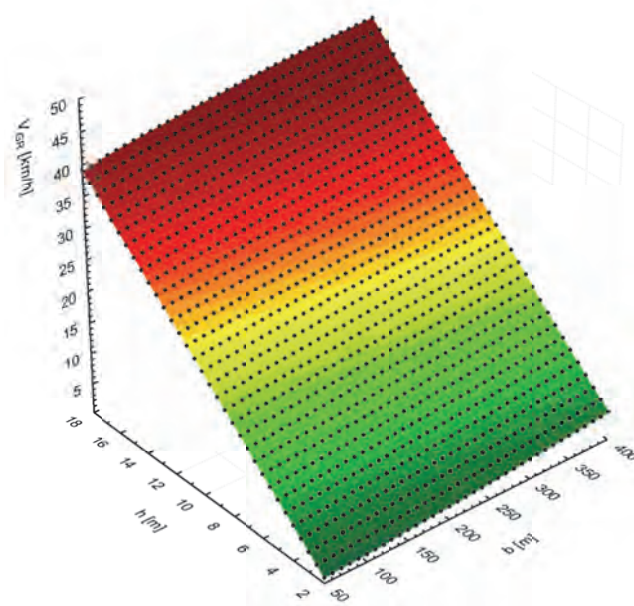
Слика 6.11 – Области пловидбе у плиткој води [60], [61]

У случају речних самохотки однос h/L је најчешће значајно испод 0.15.

Да би се математички формулисала граница између зона 1 и 2 (слика 6.10), осим утицаја ограничења пловног пута на отпор брода, треба знати и како се мењају коефицијенти пропулзије, нарочито при мањим дубинама воде. Ово је још увек недовољно истражено подручје бродске хидродинамике и не постоје препоруке, као што је то случај са утицајем дубине воде на отпор брода. Осим тога, ни један од поменутих критеријума не узима у обзир утицај газа брода, односно растојања између дна брода и дна реке. Према томе, преостало је да се тражена граница дефинише на основу резултата који се добијају усвојеним математичким моделом.

Раније је констатовано да тражена граница зависи и од дубине воде, али и од ширине пловног пута. На основу расположивих података добијена је следећа емпиријска једначина:

$$V_{GR} = (-0.0000023 \cdot b^2 + 0.0013493 \cdot b + 2.3236268) \cdot h + 0.000009 \cdot b^2 + 0.004332 \cdot b - 3.600712$$



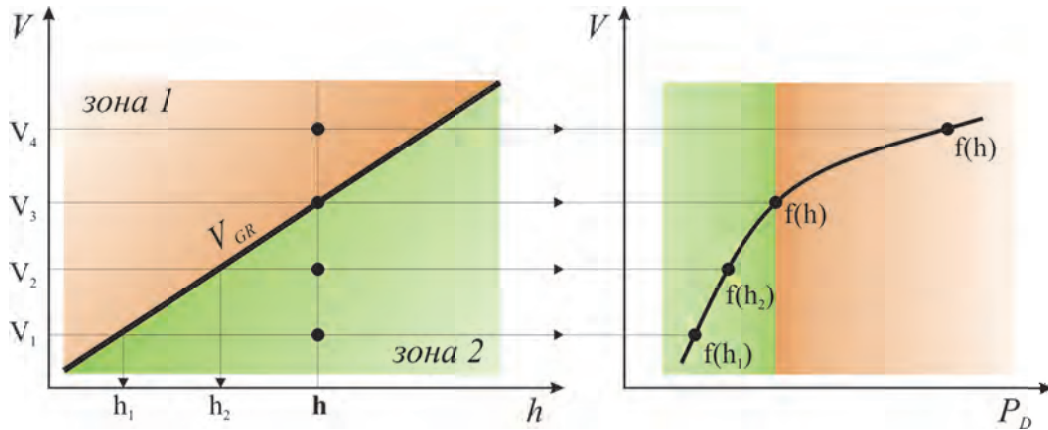
Слика 6.12 – Зависност граничне брзине од дубине воде и од ширине пловног пута

Са дијаграма датог на слици 6.12, где је приказана површ која је добијена на основу превоја који су се јавили у резултатима добијеним усвојеним математичким моделом, може се уочити извесна законитост. Може се приметити да на граничну брзину при којој се превој јавља утичу и дубина и ширина пловног пута, с тим да је утицај дубине знатно више изражен.

Поступак за примену модификованог математичког модела

Увођењем описане границе, поступак примене усвојеног математичког модела донекле се мења. Сада за одређивање коефицијента предате снаге није довољно применити једначину која описује математички модел за жељене вредности независних (улазних) променљивих. Поступак је нешто сложенији и подразумева претходну проверу зоне у којој се задати услови налазе. Уколико је брзина за коју

се тражи предата снага већа од граничне вредности (за познато b и h) тада се предата снага одређује простом заменом независних вредности у једначину којом је описан математички модел. Ако је брзина мања од граничне вредности (нема утицаја ограничења пловног пута на снагу) тада се предата снага одређује на основу оне дубине за коју је жељена брзина (при $b = const.$) једнака граничној брзини. Описани поступак шематски је показан на слици 6.13.



Слика 6.13 – Поступак примене модификованог математичког модела ($b = const.$)

Финална провера стабилности модификованог математичког модела

У оквиру финалне провере просторне стабилности модификованог математичког модела испитан је велики број случајева, што је уједно искоришћено и за анализу утицаја карактеристика пловног пута и појединих параметара форме на потребну снагу. Параметри који су мењани приликом поменуте анализе, као и шема испитивања, дати су у табели 6.4.

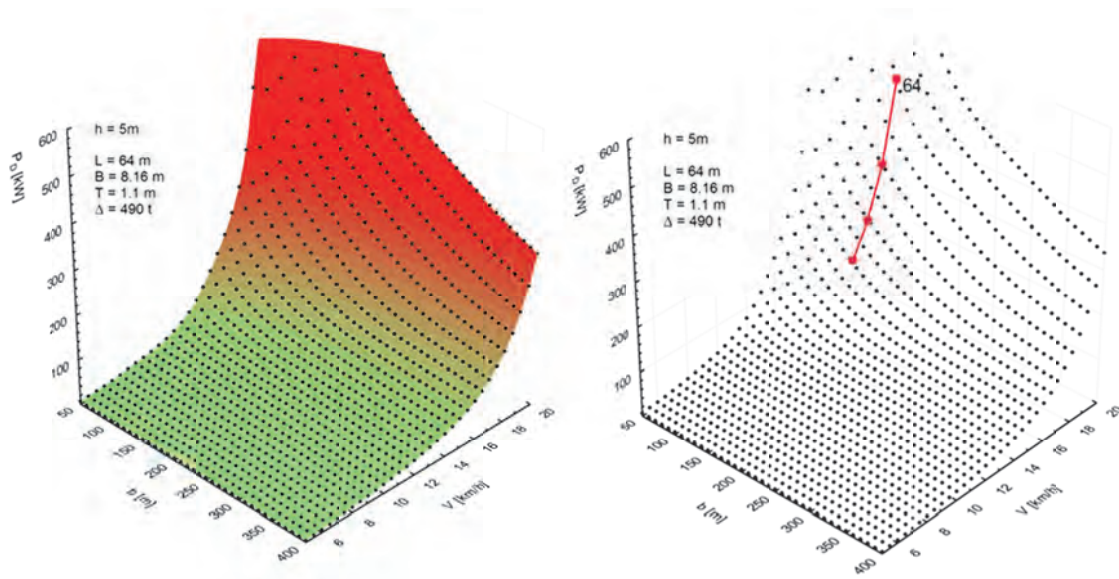
Табела 6.4 – Испитани случајеви

Испитани случајеви	∇	L	B	T	$\chi_1 = L/\nabla^{1/3}$	$\chi_2 = B/T$	$\chi_3 = b$	$\chi_4 = h$
	1.	const.	const.	const.	const.	const.	const.	$\leftarrow \rightarrow$
2.	const.	const.	const.	const.	const.	const.	const.	$\leftarrow \rightarrow$
3.	const.	-	-	-	$\leftarrow \rightarrow$	const.	const.	const.
4.	const.	const.	-	-	const.	$\leftarrow \rightarrow$	const.	const.
5.	const.	-	-	const.	$\leftarrow \rightarrow$	$\leftarrow \rightarrow$	const.	const.
6.	const.	-	const.	-	$\leftarrow \rightarrow$	$\leftarrow \rightarrow$	const.	const.

У табели 6.4 посебно су назначене независне променљиве које су вариране (десни део табеле) приликом провере стабилности математичког модела, као и карактеристике бродова које су биле фиксирани (леви део табеле) у различитим испитаним случајевима.

- Утицај ширине пловног пута на потребну снагу (случај 1)

У првом испитаном случају анализиран је утицај ширине пловног пута на снагу која је потребна за постизање одређене брзине. У том смислу, разматран је већи број бродова из базе моделских испитивања, као и других бродова чије димензије се крећу унутар прописаних граница, а нису непосредно коришћени при развоју математичког модела. Ширина пловног пута мењана је у интервалу између 50 и 400 метара. Неки од добијених резултата дати су на сликама 6.14 до 6.16.



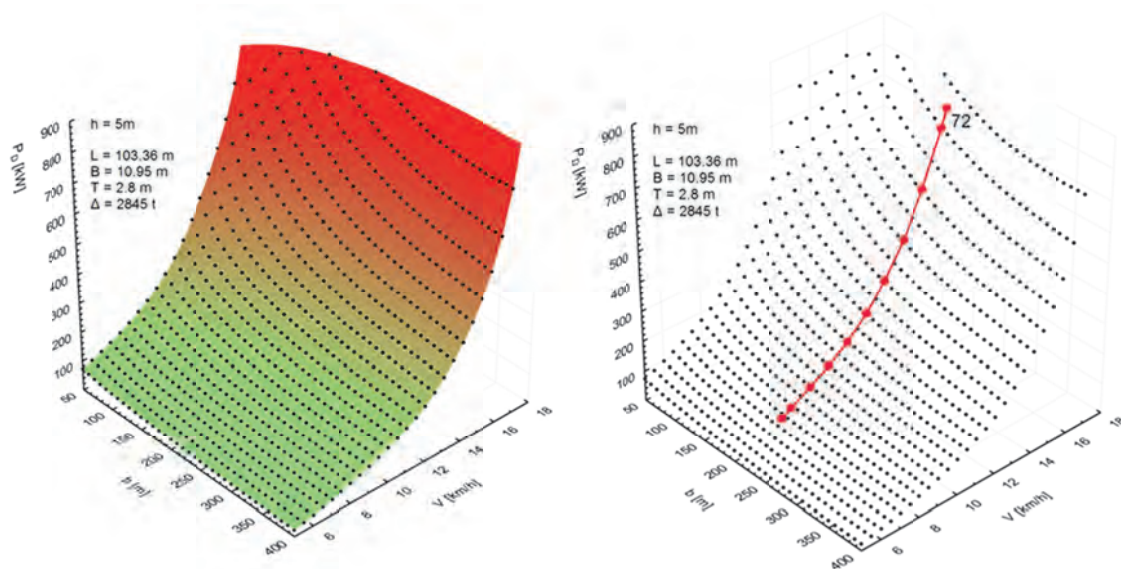
Слика 6.14 – Утицај промене ширине пловног пута на потребну снагу при односу $h/T = 4.55$

На дијаграму датом на слици 6.14 показани су резултати који су добијени применом модификованог математичког модела за случај самохотке чије су димензије назначене на слици. Дубина воде у овом случају износила је 5 метара. На десном дијаграму добијена површ је преклопљена са јединим расположивим резултатима моделских испитивања брода истих димензија при ширини пловног

пута од 125 метара (испитивање 64), а у циљу провере поузданости добијених вредности. Из добијеног резултата може се уочити:

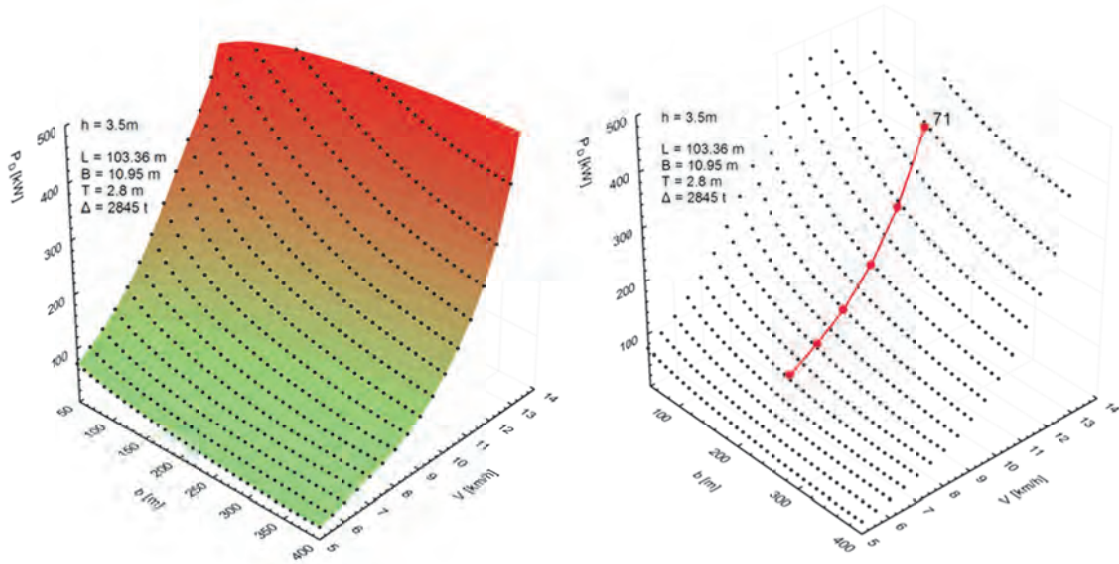
- добијена површ, иако је њен највећи део ван граница датих на слици 6.5, нема неочекиваних дисконтинуитета што указује на стабилност модела у разматраном опсегу,
- смањење ширине пловног пута има за последицу бржи пораст потребне снаге,
- утицај смањења ширине пловног пута на потребну снагу до изражаја долази са повећањем брзине брода.

Сличан карактер промене потребне снаге добијен је и у случају већег брода (испитивање 72) у води исте дубине што је показано на слици 6.15. Како је и у овом случају дубина воде 5 метара, док је газ брода повећан на 2.8 метара, однос h/T је смањен на 1.79. Може се уочити да утицај ширине пловног пута почиње да се „осећа“ и при мањим брзинама брода. При мањим ширинама пловног пута долази до суперпозиције неповољних утицаја дубине воде и ширине пловног пута што за последицу има бржи пораст снаге потребне за постизање исте брзине.



Слика 6.15 – Утицај промене ширине пловног пута на потребну снагу при односу $h/T = 1.79$

На слици 6.16 дати су резултати који су добијени за случај истог брода али при пловидби у води дубине 3.5 m. Овим је однос дубине воде и газа брода додатно смањен ($h/T = 1.25$) што је имало за последицу да је утицај плитке воде изражен и при практично неограниченој ширини пловног пута (400 m), с' тим да је ефекат утолико израженији уколико је ширина пловног пута мања.

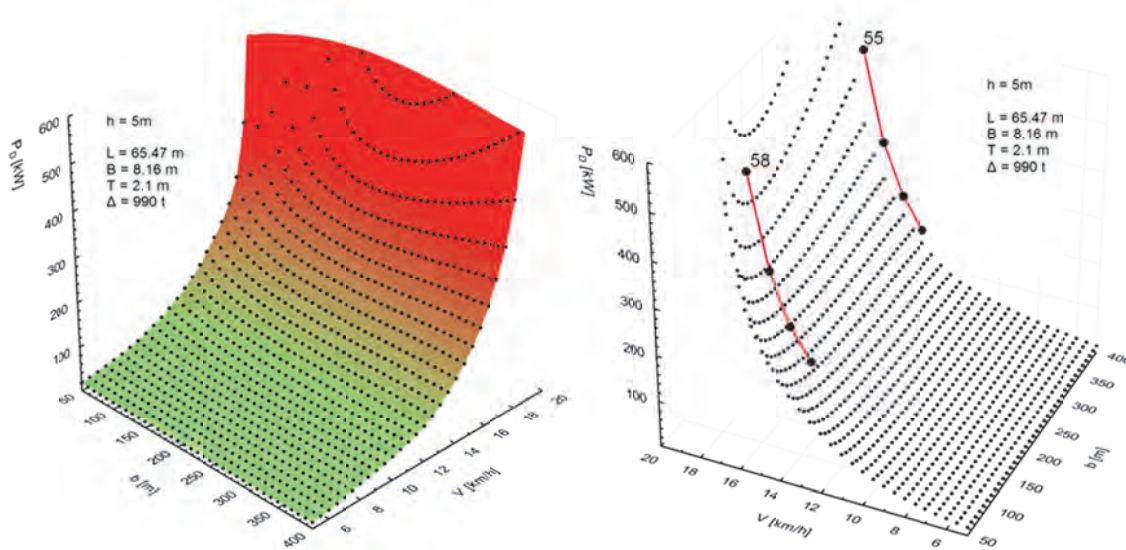


Слика 6.16 – Утицај промене ширине пловног пута на потребну снагу при односу $h/T = 1.25$

На приложеним дијаграмима максимална брзина је смањивана, како је смањиван однос h/T , јер би се са повећањем брзине ушло у горњу поткритичну област што није покривено резултатима мерења, а нема ни практичан значај када је о разматраним бродовима реч.

Известан степен нестабилности модификованог математичког модела уочен је приликом примене у зони која је била покривена моделским испитивањима, која су приликом развоја модела одбачена. Најизраженији пример уочене нестабилности показан је на слици 6.17. На десном дијаграму датом на овој слици приказано је поређење резултата моделских испитивања (случајеви 55 и 58) при ширинама пловног пута од 125 m и 400 m са резултатима који су добијени применом модификованог математичког модела. Из добијених резултата би се могло закључити да при ширинама пловног пута већим од 250 метара снага

потребна за постизање исте брзине, у зони већих брзина, благо расте са порастом ширине пловног пута, што није логично.

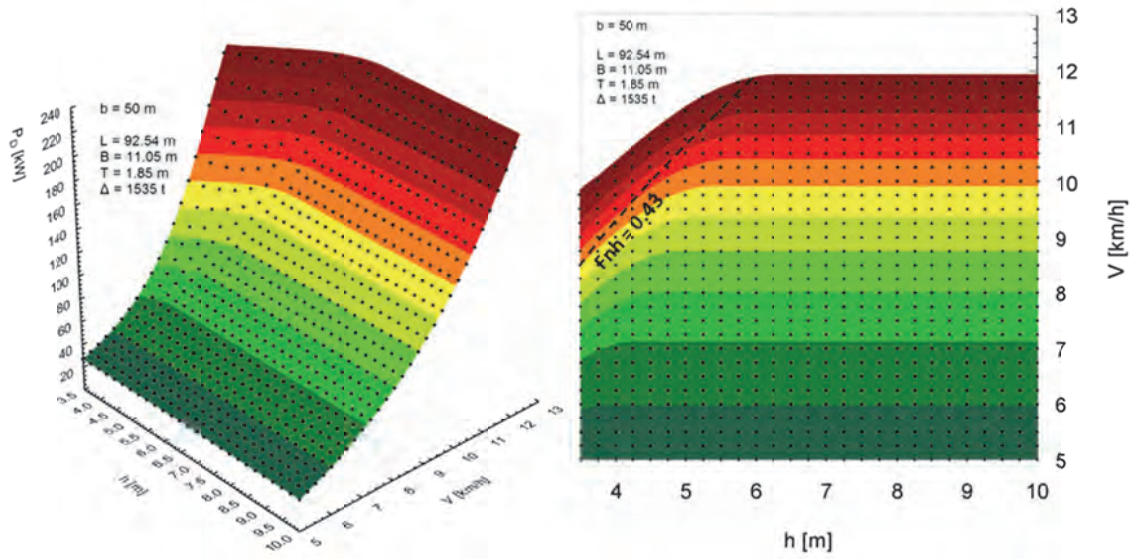


Слика 6.17 – Утицај промене ширине пловног пута на потребну снагу и поређење са испитивањима која нису коришћена при развоју модела

Овакви резултати отварају питање поузданости резултата добијених моделским испитивањима јер математички модел може бити онолико добар и поуздан колико су добри и поуздани резултати испитивања на основу којих је развијен. Ипак, у циљу обезбеђивања највеће могуће поузданости математичког модела овакви резултати намећу потребу за сужавањем граница за примену модела. Према томе, на основу већег броја испитаних случајева констатовано је да се применом *ММ* на бродове код којих је коефицијент виткости већи од седам добијају добри резултати без знакова нестабилности. Увођењем ове границе за примену модела случај који је дат на слици 6.17 остаје ван граница за примену.

- **Утицај дубине пловног пута на потребну снагу (случај 2)**

На слици 6.18 дати су резултати који су добијени применом модификованог математичког модела за случај испитивања под редним бројем 97 (прилог 1) при ширини пловног пута од 50 метара, који је, као пример нестабилности изведеног математичког модела са проширеним границама за примену, приказан на слици 6.6.



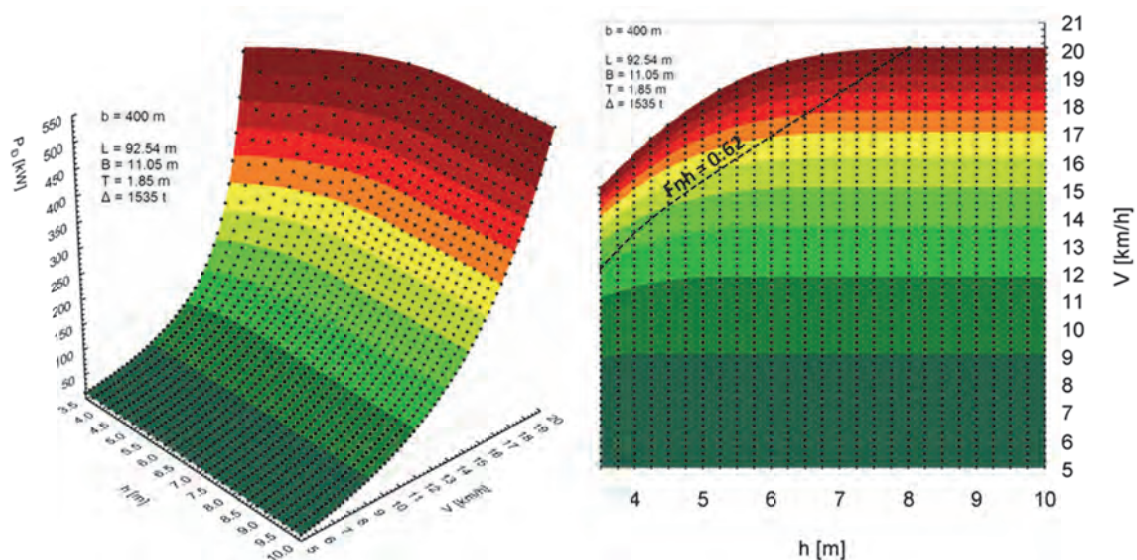
Слика 6.18 – Утицај промене дубине пловног пута ($b = 50 \text{ m}$)

Сада више нема пораста потребне снаге са порастом дубине за исту брзину. На дијаграмима се могу уочити јасно раздвојене две зоне:

- са израженим утицајем ограничења пловног пута и
- без утицаја дубине пловног пута на потребну снагу.

У десни дијаграм уцртана је крива која је одређена Фрудовим броја базираним на дубини воде која одговара вредности 0.43.

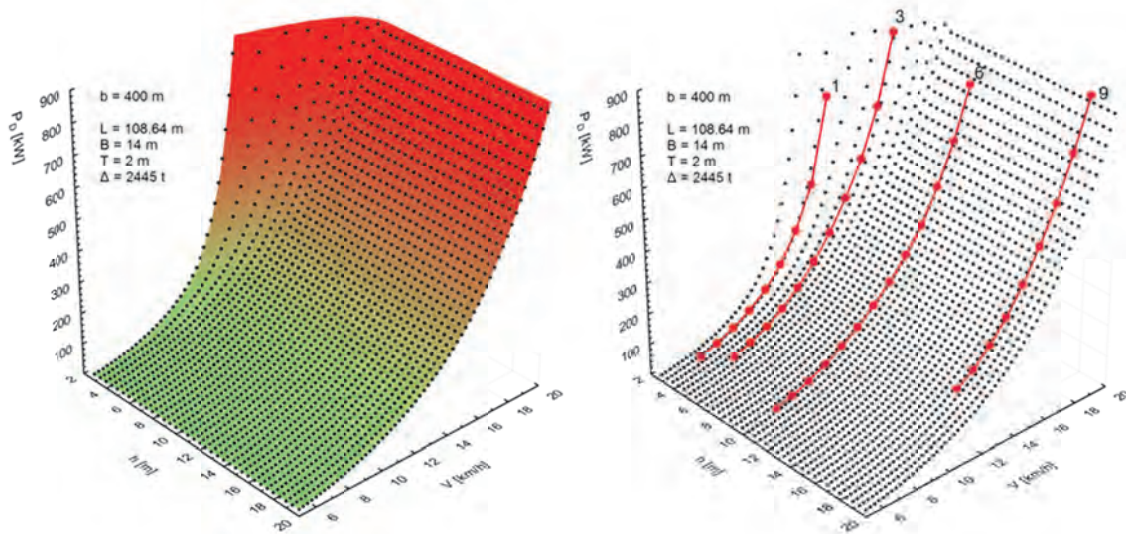
На следећем дијаграму дати су резултати који су добијени за исти брод али за пловни пут ширине 400 метара.



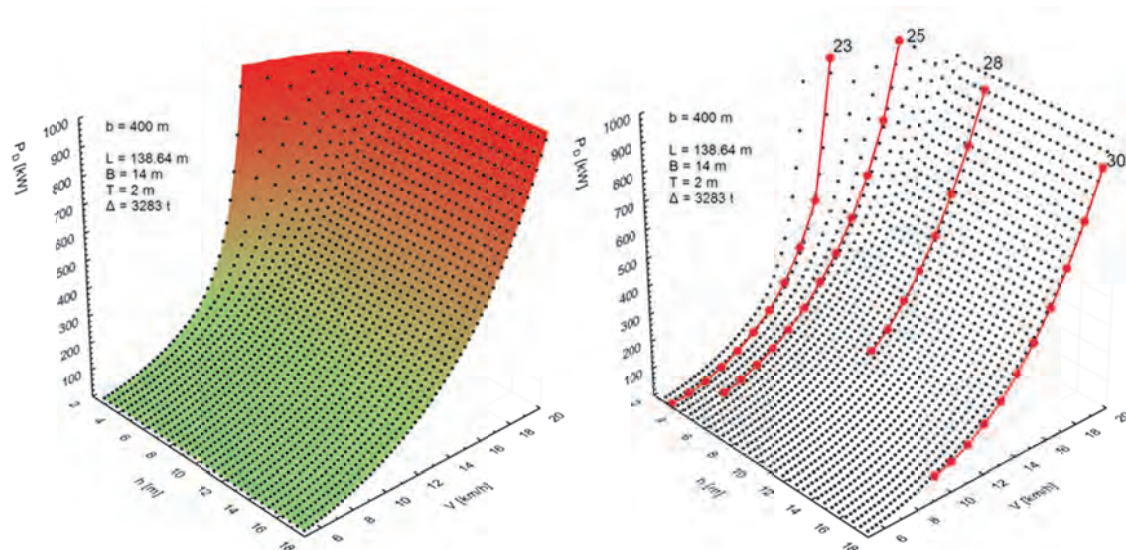
Слика 6.19 – Утицај промене дубине пловног пута ($b = 400 \text{ m}$)

Из добијених резултата може је закључити да са смањењем ширине пловног пута, до неповољних хидродинамичких утицаја на снагу (P_D) долази при мањим вредностима Фрдовога броја на бази дубине воде.

На наредне две слике дато је поређење резултата који су добијени применом модификованог математичког модела са резултатима неких од моделских испитивања која јесу узета у обзир приликом развоја модела.



Слика 6.20 – Поређење резултата моделских испитивања са резултатима добијеним применом модификованог математичког модела (случајеви 1, 3, 6 и 9)

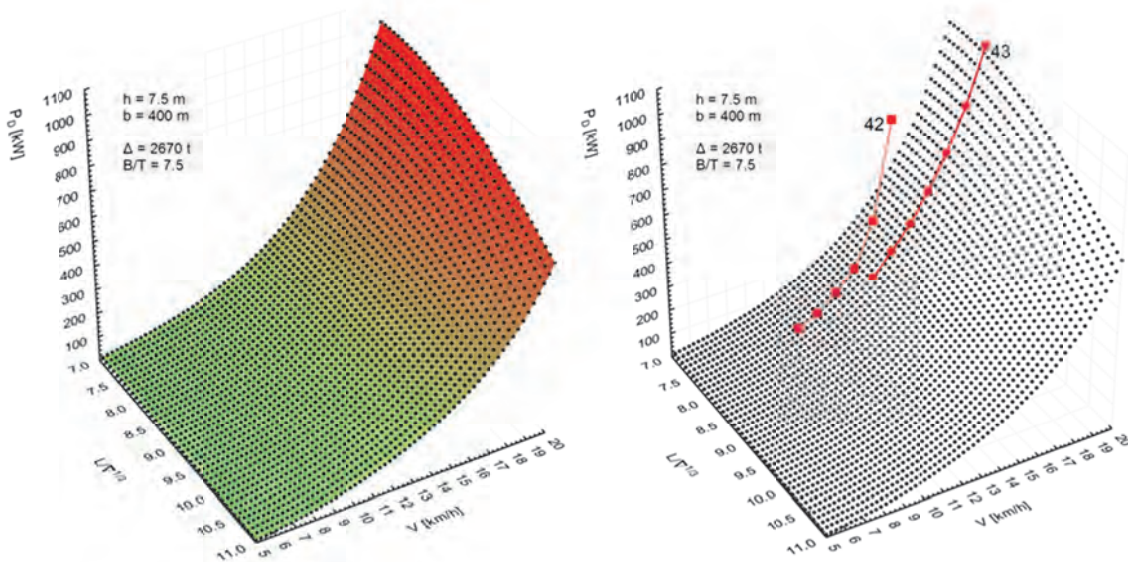


Слика 6.21 – Поређење резултата моделских испитивања са резултатима добијеним применом модификованог математичког модела (случајеви 23, 25, 28 и 30)

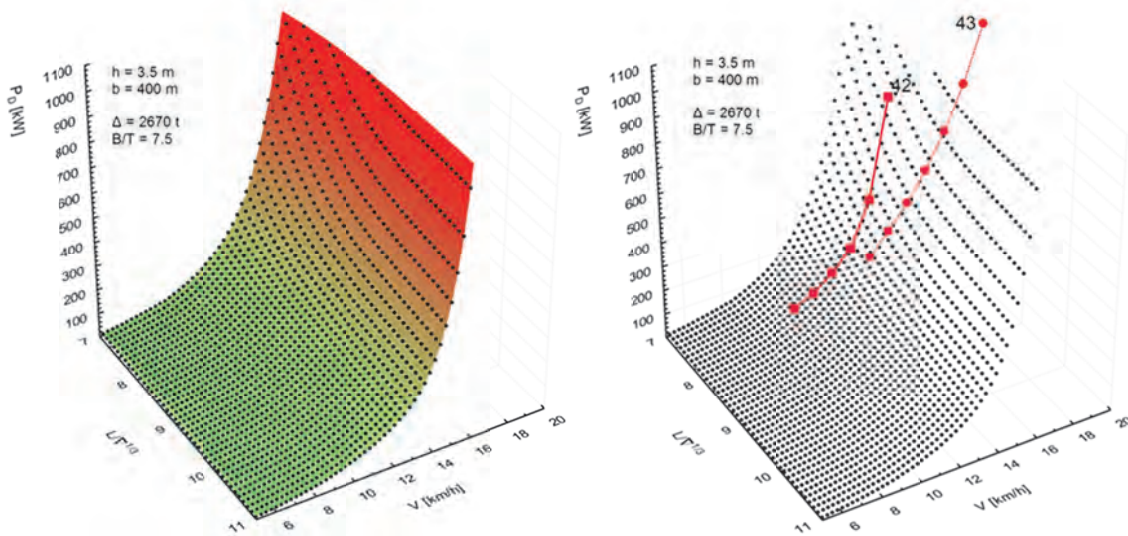
Из добијених резултата могу су уочити веома добра слагања мерења са прорачунима, као и висок ниво стабилности предложеног модификованог математичког модела. Из добијених резултата проистиче да би се модификовани математички модел могао користити за прорачунавање резултата мерења апсорбоване снаге из дубоке воде у плитку, али и из плитке у дубоку воду. Овде треба нагласити да дубина воде, осим на отпор брода, утиче и на коефицијенте пропулзије, као и да до сада није постојала одговарајућа метода која би омогућавала прорачунавање апсорбоване снаге из дубоке воде у плитку и обрнуто.

- Утицај коефицијента виткости брода на потребну снагу (случај 3)

Утицај коефицијента виткости брода при константним вредности депласмана (Δ) и односа ширине и газа брода (B/T), као и при пловидби пловним путем константне ширине и дубине, дат је на сликама 6.22 и 6.23. Као што је и очекивано, повећање виткости брода повољно утиче на снагу, што је утолико израженије уколико је брзина брода већа.



Слика 6.22 – Утицај виткости брода на потребну снагу у води дубине 7.5 метара

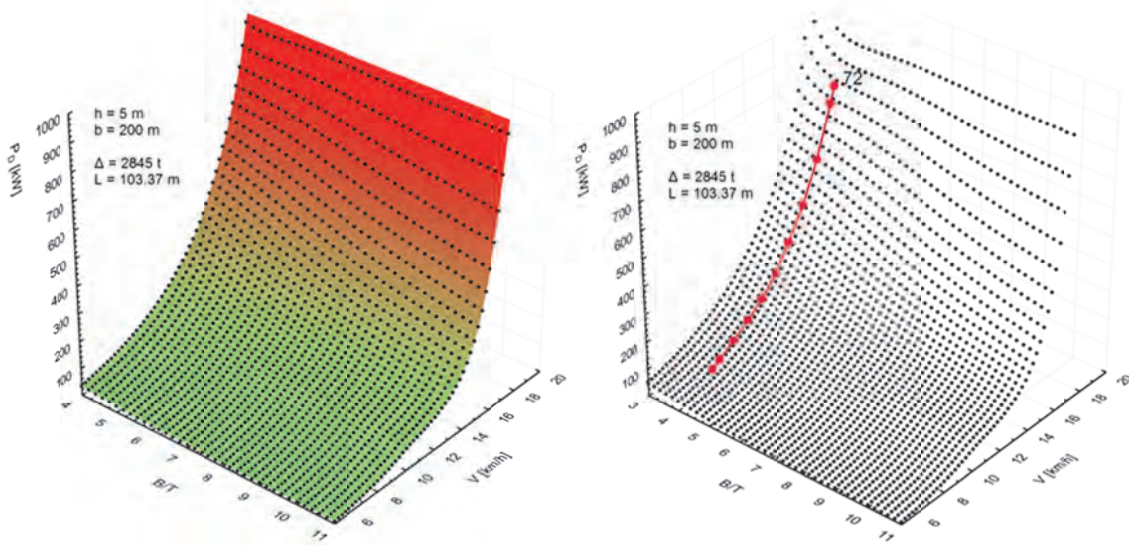


Слика 6.23 – Утицај виткости брода на потребну снагу у води дубине 3.5 метара

На дијаграмима су дата и поређења са моделским испитивањима (случајеви 42 и 43 из прилога 1) у две различите дубине пловног пута. Може се приметити да је повољан утицај виткости нешто израженији у плиткој води. Ово би значило да би за постизање исте брзине у случају дужег брода, који би био ужи и имао мањи газ, била потребна мања снага. Овакав закључак се на први поглед не чини логичним јер је познато да са повећањем дужине брода неповољни хидродинамички ефекти на отпор кретању брода, узроковани малом дужином воде, постају израженији. Међутим, ако се узме у обзир и чињеница да дужи брод ($\Delta = const.$, $B/T = const.$) има мањи газ, односно да је однос h/T већи, што вероватно повољно утиче на дострујавање воде пропелеру, а тиме и на коефицијенте пропулзије, добијени резултати и нису толико нелогични. Донекле необичан карактер резултата датих на слици 6.22 последица је тога што се део резултата односи на бродове код којих је однос дужине и ширине мањи од 7, а што је (на основу расположивих резултата моделских испитивања) доња граница за примену модификованог математичког модела.

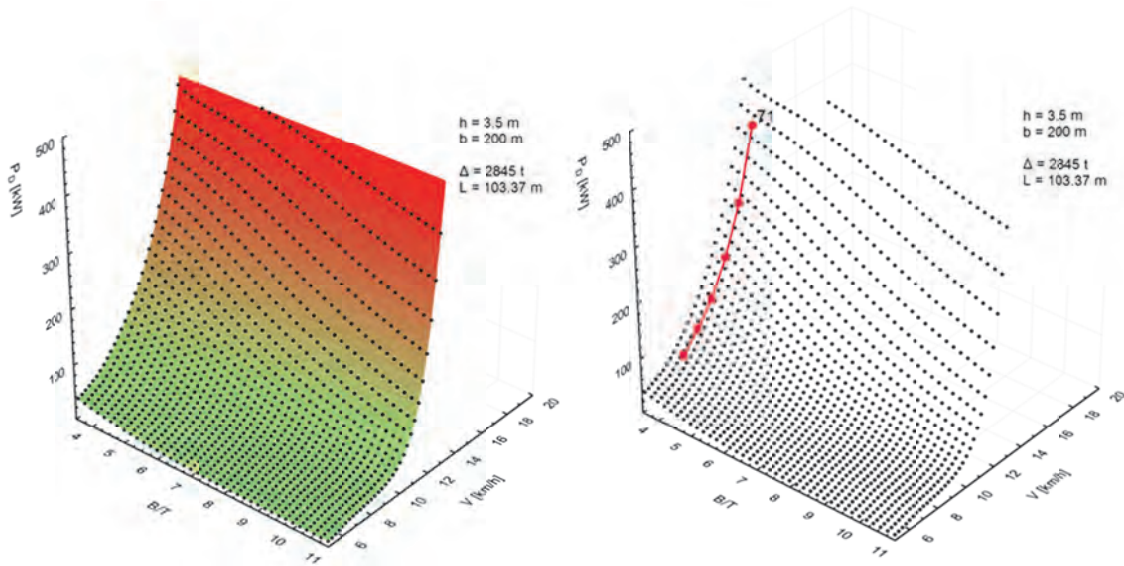
- **Утицај промене односа ширине и газа брода на потребну снагу (случај 4)**

У оквиру провере просторне стабилности модификованог математичког модела анализиран је и утицај промене односа ширине брода и газа брода на потребну снагу. Примери добијених резултата дати су на сликама 6.24 и 6.25.



Слика 6.24 – Утицај односа ширине и газа брода на потребну снагу у води дубине 5 метара

На дијаграмима, поређења ради, дати су и резултати моделских испитивања за случајеве 71 и 72 (прилог 1) који једини својим димензијама одговарају условима који су били задати при провери. Може се приметити да резултати добијени рачунски (површ) веома добро прате обе криве.



Слика 6.25 – Утицај односа ширине и газа брода на потребну снагу у води дубине 3.5 метара

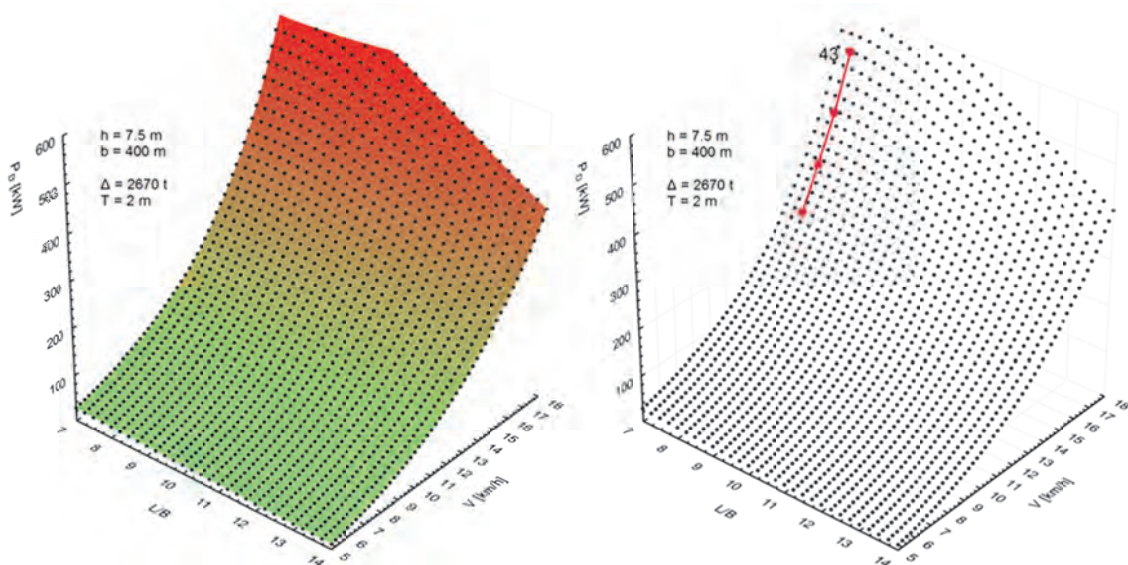
Из добијених резултата намеће се закључак да са порастом односа ширине и газа брода (B/T) снага потребна за постизање исте брзине опада, што је израженије уколико је брзина брода већа и дубина воде мања. Како су депласман и дужина

брота константни, повећање односа B/T подразумевало би повећање ширине уз истовремено смањење газа брода. То има за последицу пораст односа дубине воде и газа брода (h/T), а што се вероватно повољно одражава на коефицијенте пропулзије. Према томе, иако се отпор брода повећава са повећањем односа B/T [60] ова промена има за последицу ефикаснији погон брода.

Извесно „витоперење“ добијених површи може се уочити при већим брзинама које се приближавају горњој поткритичној зони. Међутим, циљ овог истраживања није анализа кретања брода у овој области јер та зона, када се говори о речним самоходним теретним бродовима, нема практичан значај.

- Утицај промене односа дужине и ширине брода на потребну снагу (случај 5)

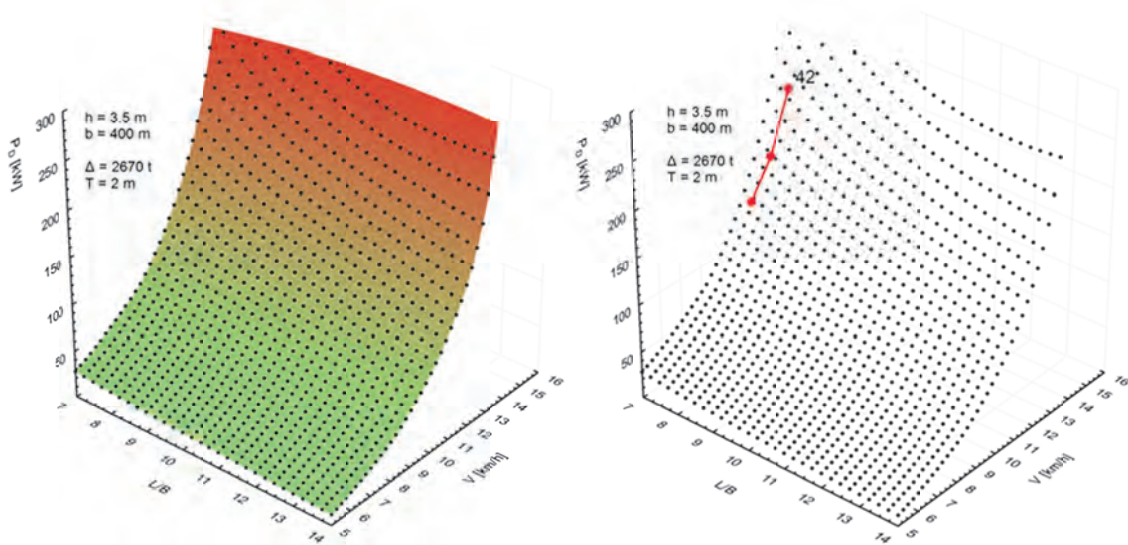
На дијаграмима датим на сликама 6.26 – 6.28 приказани су резултати који су добијени анализом утицаја односа дужине и ширине брода при константним вредностима депласмана и газа брода. У свим, овде датим, случајевима ширина пловног пута од 400 m може се сматрати неограниченом. Из добијених резултата може се закључити да се у свим разматраним случајевима добијају глатке површи без изражених појава нестабилности. На основу поређења израчунатих са резултатима моделских испитивања, упркос малим одступањима, може се закључити да модификовани математички модел даје довољно добре резултате.



Слика 6.26 – Утицај односа дужине и ширине брода ($h/T = 3.75$)

Из добијених резултата може се уочити да се пораст односа L/B , при константном газу и депласману брода, повољно одражава на енергетску ефикасност брода јер се са мањом снагом мотора може постићи иста брзина.

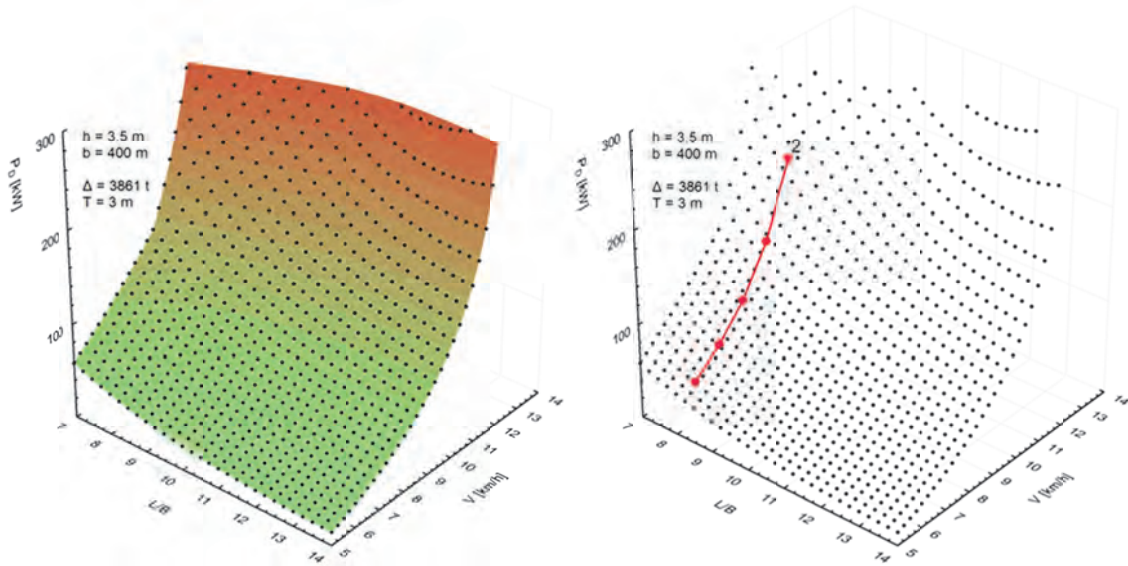
Познато је да са порастом односа L/B , при непромењеном депласману и газу отпор брода опада. Добијени резултати су показали да се овакав тренд може очекивати и када је о снази реч.



Слика 6.27 – Утицај односа дужине и ширине брода ($h/T = 1.75$)

Упоредо са провером утицаја односа димензија брода, анализиран је и утицај дубине воде, односно утицај односа дубине воде и газа брода (h/T) на добијене резултате. Овде су дата три случаја где је овај однос мењан између 3.75 и 1.17. Прва вредност одговара умерено дубокој води, док друга вредност одговара израженом утицају плитке воде (слика 6.28). Из добијених резултата може се закључити да је повољан утицај повећања односа L/B уколико израженији уколико је однос дубине воде и газа брода неповољнији, односно уколико је дубина воде мања. Анализом утицаја промене основних димензија брода на отпор која је спроведена у [60] закључено је да је отпор у плиткој води мање осетљив на промену главних димензија од отпора у дубокој води. Резултати који су овде добијени упућују на супротан закључак. Ако је однос дужине и ширине брода већи, што подразумева ужи и дужи брод при истом газу и депласману, тада је пропелер мање „заклоњен“ бродом и вода му лакше дострујава, што се повољно

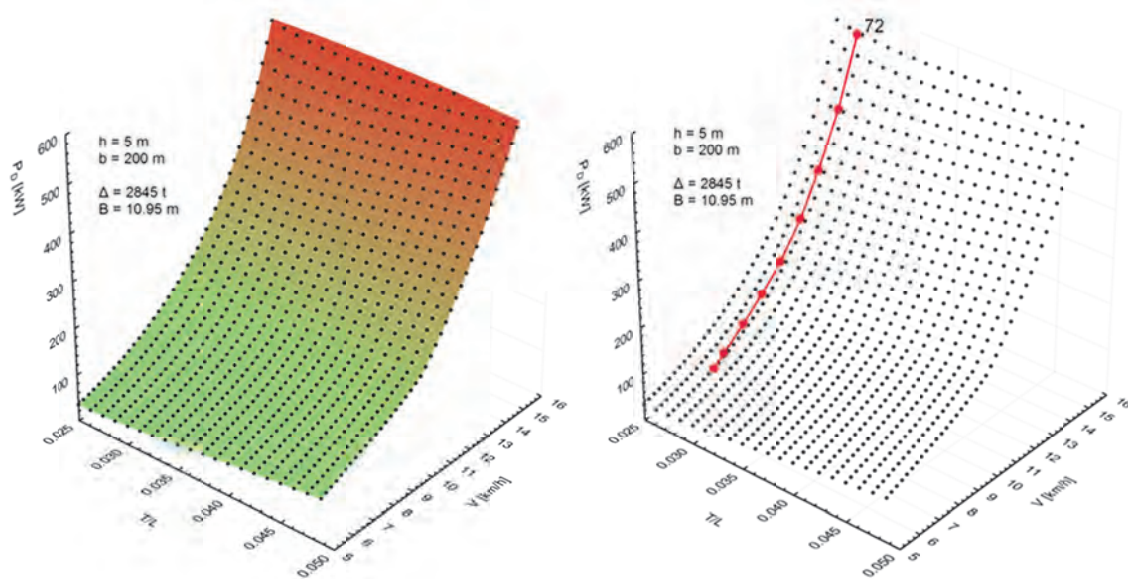
одражава на коефицијенте пропулзије, а тиме и на енергетску ефикасност брода. Према томе, у плиткој води осетљивост потребне снаге на промене главних димензија брода је израженија него у дубокој води.



Слика 6.28 – Утицај односа дужине и ширине брода ($h/T = 1.17$)

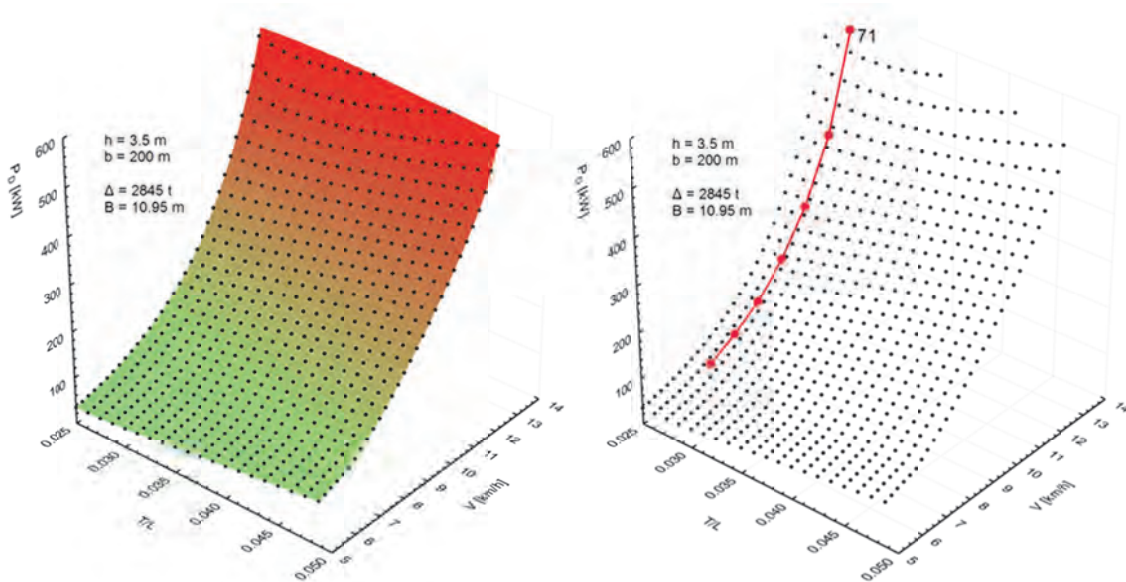
- Утицај промене односа газа и дужине брода на потребну снагу (случај б)

Последњи утицај који је анализиран у оквиру провере просторне стабилности модификованог математичког модела је утицај промене односа газа и дужине брода. Неки од резултата који су добијени дати су на сликама 6.29 и 6.30.



Слика 6.29 – Утицај односа газа и дужине брода ($h = 5m$)

Приликом варијација газа и дужине брода депласман и ширина брода нису мењани. На слици 6.29 дати су резултати који су добијени за дубину воде од 5 метара, а на слици 6.30 приказани су резултати који су добијени за дубину воде од 3.5 метара.



Слика 6.30 – Утицај односа газа и дужине брода ($h = 3.5\text{m}$)

Из добијених резултата може се уочити да са повећањем односа газа и дужине брода расте и потребна снага. Овакав резултат је сасвим очекиван, јер се повећање овог односа неповољно одражава и на отпор брода [60], али и на интеракцију између трупа брода и пропелера, нарочито у плиткој води.

- **Провера модификованог модела поређењем са резултатима мерења – 2D провера**

На дијаграмима датим у прилогу б приказано је поређење резултата моделских испитивања са резултатима који су добијени применом модификованог математичког модела. Из добијених резултата може се констатовати да модификовани модел у појединим случајевима лошије „прати“ резултате мерења који су коришћени при развоју модела. Међутим, провером просторне стабилности модификованог модела закључено је да нема значајнијих знакова нестабилности какви су уочени провером немодификованог (изворног) математичког модела, који је боље пратио улазна мерења. Осим тога, детаљном провером модификованог математичког модела, показало се да се његовом

применом добијају углавном логични резултати без значајнијих одступања од очекиваног карактера промене предате снаге у зависности од главних димензија бродова и карактеристика пловног пута, што није био случај када је реч о изворном математичком моделу. Према томе, овакви резултати уносе извесну сумњу у поузданост појединих моделских испитивања, која својим карактером одступају од очекиваних, утичући на изворни математички модел и чинећи га нестабилним.

На основу свега изнетог, утврђене су коначне границе за примену предложеног – модификованог математичког модела:

$$\begin{aligned}7.0 &\leq L / B \leq 14.0 \\3.5 &\leq B / T \leq 11.0 \\7.0 &\leq L / \nabla^{1/3} \leq 11.0 \\3.0 \text{ m} &\leq h \leq 20.0 \text{ m} \\50 \text{ m} &\leq b \leq 400 \text{ m}\end{aligned}$$

Иако је предложени математички модел детаљно анализиран, због већег броја независних променљивих на којима је заснован, постоји могућност да у некој комбинацији улазних величина дође до „искакања“, те се приликом његове примене препоручује опрез и критички приступ резултатима.

Уведеном модификацијом изворног математичког модела постигнуто је више ефеката:

- проширене су границе за примену модела чиме су проширене и могућности за анализу утицаја промена појединих параметара на потребну снагу, а тиме и на енергетску ефикасност бродова,
- одбачена су мерења која су уносила поремећаје што је имало за последицу појаву математичке нестабилности модела,
- модификовани математички модел боље описује промене до којих долази услед варијација разматраних независниј променљивих.

Употреба математичког модела ван ових граница се не препоручује, а уколико је то неопходно препоручује се пажљивији приступ резултатима.

7

Анализа резултата испитивања бродова у природној величини

7.1 Поређење резултата испитивања бродова у природној величини са резултатима који се добијају применом усвојеног математичког модела

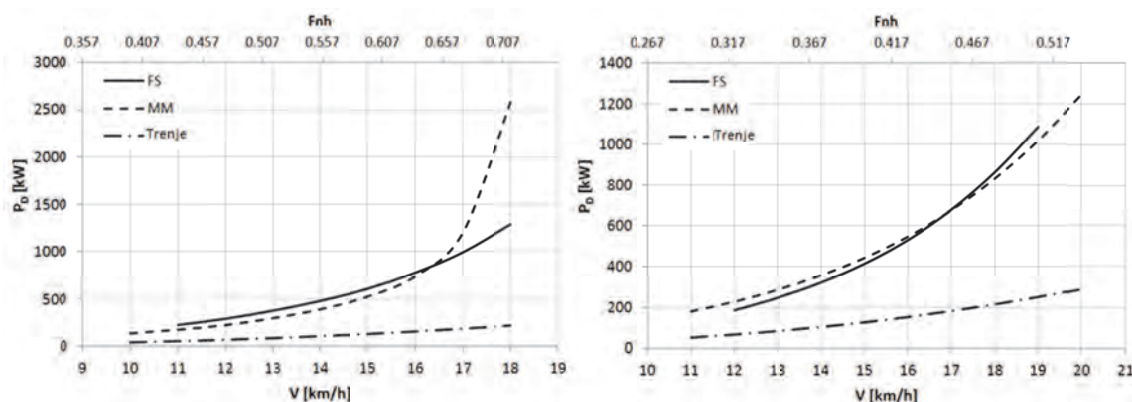
У поглављу 4.4 показано је да постоје некада и велике разлике између резултата испитивања истих бродова под различитим околностима. Осим тога, показано је да у неким случајевима постоје значајна одступања између резултата моделских испитивања и испитивања бродова у природној величини. Према томе, може се очекивати да у појединим случајевима постоје и одступања између резултата испитивања бродова у природној величини и одговарајућих резултата који су добијени применом математичког модела који је заснован на моделским испитивањима. У том смислу, су у раду проверена сва расположива мерења и констатовано је да на основу доступних података није лако извести конкретне закључке којима би били објашњени сви расположиви резултати. Да је то тако

може се сагледати већ на основу следећих неколико примера кроз које су приказане четири типичне групе добијених резултата.

На слици 7.1 приказано је поређење добијених резултата за два слична двопропелерна брода (испитивања 40 и 50), чије су карактеристике дате у прилогу 1. Резултати дати на левом дијаграму важе за дубину пловног пута од 5 метара, а на десном за дубину од 11 метара. Ширина пловног пута ни у једном случају није била ограничена. Пуна линија представља резултате испитивања реалних бродова, док су испрекиданом линијом представљени резултати који су добијени применом математичког модела. Осна линија представља утицај трења у укупној предатој снази, што је рачунато у циљу допунске провере резултата мерења. Ова величина је добијена из следећег израза:

$$\frac{R_F \cdot V}{\eta_D} = \frac{0.5 \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot C_F}{\eta_D}$$

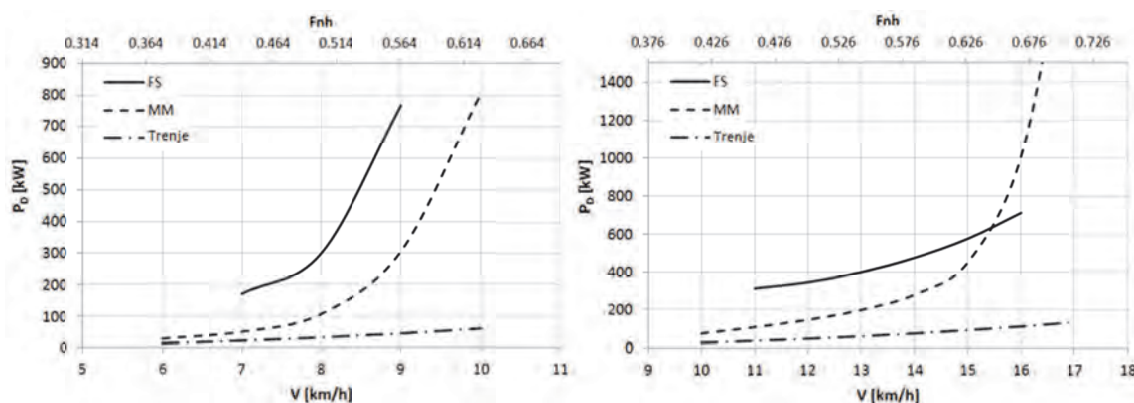
где је за вредност „квази-пропулзивног“ коефицијента (хидродинамичких губитака) усвојено 0.50, док је коефицијент отпора трења рачунат према *ИТТС-1957* препорукама.



Слика 7.1 – Поређење добијених резултата ($\Delta \approx 3300$ тона)

Из добијених резултата може се закључити да се у случају испитивања у дубокој води резултати доста добро слажу. У случају плитке воде резултати се добро прате до брзине која одговара Фрудовом броју на бази дубине од око 0.65. При већим брзинама се јавља веће одступање, с тим да се из измерених вредности не уочава тренутак када долази до појаве утицаја плитке воде.

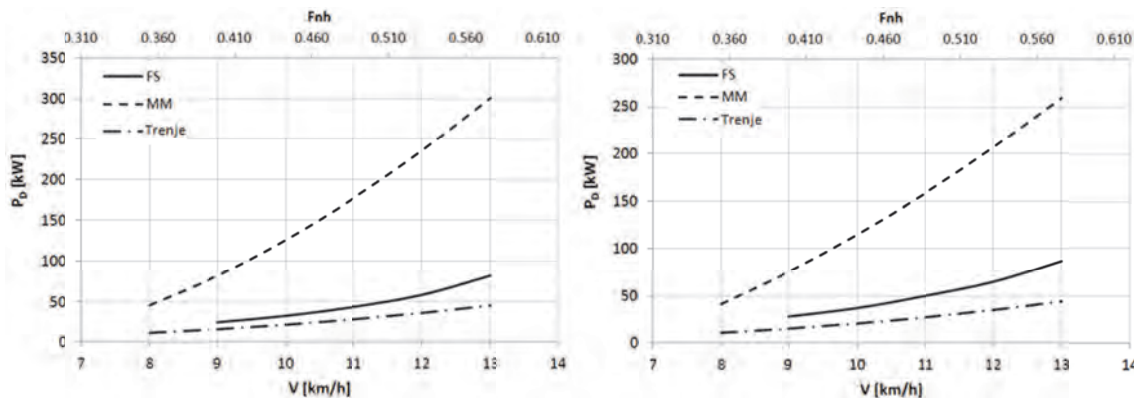
Из резултата који су дати на слици 7.2 јасно се уочавају велика одступања између резултата испитивања бродова 51 и 86 и вредности које се добијају применом математичког модела.



Слика 7.2 – Поређење добијених резултата (лево брод 51, а десно 86)

Карактери добијених кривих су такви да се резултати испитивања бродова у природној величини не могу добити кориговањем резултата добијених прорачунима. Шта више, ако се зна да се смањењем брзине брода смањује предата снага и да би требало да се асимптотски приближава нули при малим брзинама, карактер измерених кривих се не чини логичним. Ово се нарочито уочава на десном дијаграму где је пад снаге при мањим брзина занемарљиво мали.

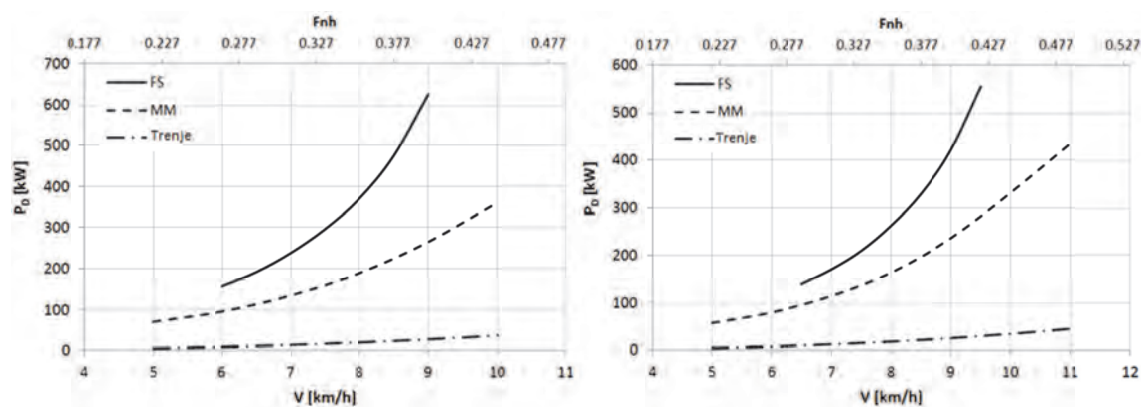
Још нелогичнијим чине се резултати који су представљени на слици 7.3. Овде су дати резултати испитивања два брода носивости од око 1000 тона који су приликом испитивања пловили у каналу ширине 55 метара и дубине 4 метра. Брод 81 је испитан при газу од 1.5 метара, а газ брода 85 је износио 1.65 метара.



Слика 7.3 – Поређење добијених резултата (лево брод 81, а десно 85)

Према резултатима мерења, која су обављена на бродовима у природној величини, проистиче да је за постизање брзине од 10 km/h потребна снага од око 40 kW, док се са око 90 kW може постићи брзина од 13 km/h. Овако ниске вредности се не чине реалним, тим пре што је реч о пловидби при веома неповољним условима – у каналу. Према добијеним резултатима следи да се велики део уложене снаге троши на савладавање отпора трења (око 50%), те да отпор таласа није доминантна компонента у укупном отпору, чак и при брзини од 13 km/h. Далеко реалнијим се чине резултати добијени математичким моделом, према којима је за постизање разматраних брзина потребна значајно већа снага. Да би било могуће постићи брзину од 13 km/h у случају брода 81 (пречник пропелера је 1.55 метара) потребно је пропелеру предати 300 kW, док је у случају брода 85, који има пропелер пречника 1.70 метара, потребно располагати са око 260 kW.

Међу свим испитаним случајевима далеко најчешће су резултати изгледали попут оних који су дати на слици 7.4. Дакле, у највећем броју случајева, математички модел је дао ниже вредности од оних које су добијене мерењима у реалним околностима. Овде су дати резултати испитивања брода дужине 105 метара, ширине 11 метара при газовима од 2.8 (случај 95), односно 2.5 метара (случај 96). Депласмани су износили 2830, односно 2520 тона. Брод је једнопропелерни, а пречник пропелера је 1.6 метара. Испитивања су спроведена у каналу ширине 55 и дубине 4 метра.



Слика 7.4 – Поређење добијених резултата (лево брод 95, а десно 96)

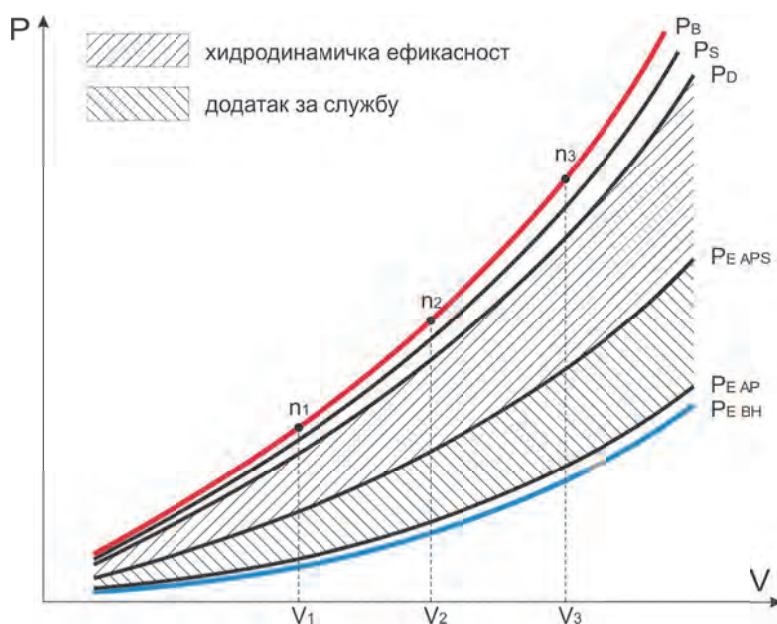
На први поглед, због великих одступања, и ови резултати би се могли учинити спорним попут резултата који су показани на сликама 7.2 и 7.3. Међутим, не треба заборавити да је математички модел развијен на основу моделских испитивања, која су спроведена под „идеалним“ околностима, односно без присуства неповољних спољашњих утицаја, а који су уобичајени при пловидби бродова у природној величини у реалним околностима. Овим се отвара простор за дубљу анализу хидродинамичких појава до којих долази приликом пловидбе самоходних теретних бродова у реалним околностима.

7.2 Анализа тока снаге од мотора до пропелера код морских бродова

Пре даље анализе могућих разлога за одступање резултата моделских испитивања од испитивања самохотки у природној величини, али и одступања између резултата поновљених испитивања исте самохотке у реалним околностима, сасвим је оправдано осврнути се на поступак за одређивање потребне снаге главних погонских мотора код морских бродова.

Када је о морским бродовима реч, данас постоји прилично јасан пут, као и општи консензус око начина на који се овај проблем решава. У поглављу 3.1.2 дате су опште напомене, као и објашњења релевантних физичких величина. На слици 3.4 дата је шема тока снаге од мотора до пропелера, а овде ће нешто детаљније бити анализирана промена потребне снаге у зависности од брзине кретања брода, са посебним освртом на губитке у преносу снаге, као и корекционе факторе којима се у случају морских бродова компензују спољашњи утицаји.

На слици 7.5 шематски је приказана промена карактеристичних снага у зависности од брзине брода.



Слика 7.5 – Карактеристичне снаге и њихова промена у зависности од брзине брода

Могу се уочити следеће карактеристичне снаге:

- Ефективна снага отпора „голог“ брода (без утицаја изданака) – $P_{E\text{ ВН}}$ – зависи од отпора кретању брода и од брзине. Отпор брода се одређује на основу моделских испитивања, односно под околностима у којима нема изражених неповољних спољашњих утицаја:

$$P_{E\text{ ВН}} = R_T \cdot V$$

- Утицај изданака на отпор (љуљне кобилице, вратила са скроковима, кормила, ногавице, итд.) може се одредити експериментално, а може се узети у обзир и повећањем отпора брода „голог трупа“ (без изданака) за 2 до 5% (код једнопропелерних бродова):

$$P_{E\text{ АР}} = P_{E\text{ ВН}} \cdot (1.02 \div 1.05)$$

- Како је морски брод при пловидби у реалним околностима изложен деловању ветра, таласа, морских струја, итд. потребно је ефективну снагу повећати како би и ови утицаји били узети у обзир. Додатак за „службу“

зависи од типа брода и подручја у коме се очекује да ће брод пловити. Ово повећање се може одредити на основу очекиваних околности под којима ће брод пловити. Данас постоје мање или више поуздане методе за израчунавање повећања отпора морских бродова, услед деловања појединих спољашњих утицаја. Међутим, сем у посебним случајевима, уобичајено је да се повећање отпора усваја на основу препорука базираних на искуству. Уколико се брод пројектује да плови у области где нису изражени јаки ветрови и велики таласи тада је уобичајено повећање ефективне снаге од око 15%, док се за сурове услове, попут оних који су карактеристични за Северни Атлантук, најчешће ефективна снага повећава и за више од 25%.

$$P_{E\ APS} = P_{E\ AP} \cdot (1.15 \div 1.25)$$

- Колико је снаге неопходно предати пропелеру (P_D) зависи, осим од ефективне снаге брода, узевши у обзир утицај изданака и услове службе, и од хидродинамичке ефикасности усвојеног пропулзора:

$$P_D = \frac{P_{E\ APS}}{\eta_D}$$

где је са η_D обележен тзв. квази-пропулзивни коефицијент који се може одредити из следеће релације:

$$\eta_D = \eta_o \cdot \eta_R \cdot \frac{1 - t}{1 - w}$$

Све величине из последњег израза објашњене су раније (поглавље 2).

Уобичајене вредности коефицијента прелаза (η_R) за једнопропелерне бродове се крећу између 1.0 и 1.1, док је у случају двопробелерних бродова вредност овог коефицијента између 0.95 и 1.00.

- Снага коју преноси вратило (P_S) је од предате снаге већа за губитке у лежајевима који носе вратило, а који се крећу између 2% и 3% у зависности од дужине вратила, односно броја лежајева (око 0.5% по лежају).

- У случају да у систему преноса снаге не постоји редуктор, тада је снага на спојници мотора (P_B) једнака снази на вратилу. У противном, мотор мора располагати са пар процената више снаге, како би се компензовали механички губици у редуктору.

Из свега набројаног може се закључити да у поступку одређивања карактеристика појединих компоненти пропулзивног комплекса морских бродова заправо постоје три засебна задатка које је неопходно решити:

1. одређивање отпора кретању брода,
2. корекција ефективне снаге отпора брода, у циљу узимања у обзир тзв. спољашњих утицаја и
3. одређивање хидродинамичких губитака у преносу снаге од мотора до пропелера.

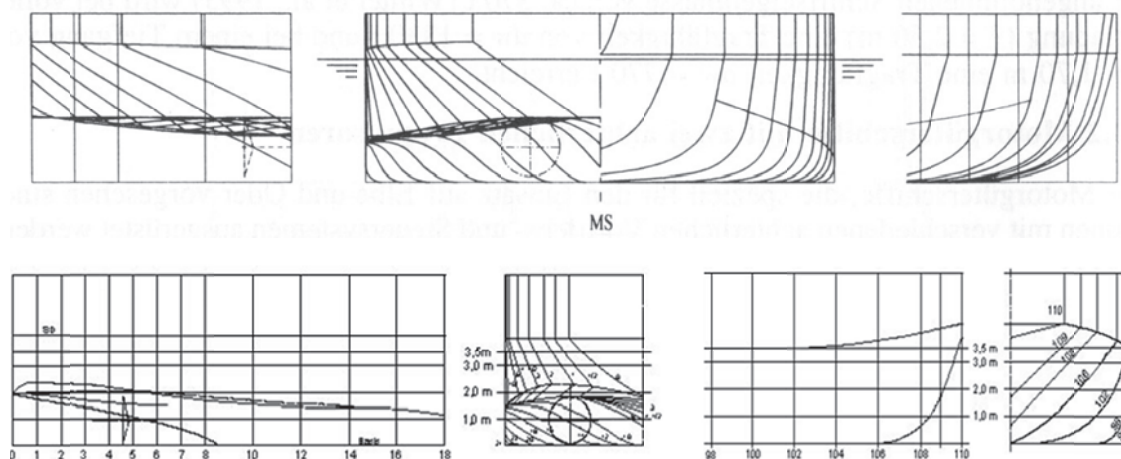
Поступак при пројектовању пропулзивног комплекса речних самоходних бродова је идентичан, с тим што, имајући у виду специфичне околности под којима самохотке плове, постоје извесни додатни проблеми. Према томе, у решавању набројаних задатака треба тражити разлоге за разлике које су добијене приликом директних мерења апсорбоване снаге на самохоткама у реалним околностима, што ће у даљем раду кроз пар примера бити и приказано.

7.3 Отпор речних самоходних теретних бродова

Форме речних самохотки се у значајној мери разликују од форми већине типова морских бродова. Паралелни средњак самохотки подсећа на квадар са главним ребром чији је коефицијент пуноће скоро једнак јединици. Што се облика прамца самохотки тиче данас постоје два основна типа:

- Класичан прамец код кога „доминирају бокови“, који се сужавају чинећи да се форма из изражених „U“ ребара на паралелном средњаку модификује у „V“ ребра, која се стапају у прамчаној статви,

- Прамац код кога „доминира дно“, које се подиже са мање или више израженом кобилицом, као код теретних баржи, док се бокови благо сужавају образујући прamac погодан за потискивање других пловних објеката



Слика 7.6 – Форме речних самохотки [9]

Можда и најизраженија разлика у форми речних самохотки у односу на морске бродове огледа се у облику крме.



Слика 7.7 – Форма крме једнопропелерне самохотке [9]

Због ограниченог газа и потребе да се уграде пропелери већег пречника него што би то било могуће у случају класичног облика крме, код самохотки се често могу срести крмени тунели и/или тзв. крмене сукњице, којима се побољшава дострујавање воде пропелеру. Ово су специфична решења која се ретко могу срести на другим објектима, изузев код речних потискивача.

Имајући у виду споменуте разлике у формама бродова, може се закључити да је примена постојећих емпиријских метода за одређивање отпора, које се данас уобичајено користе за морске бродове, веома проблематична у случају речних самохотки. Међутим, како нема метода за одређивање отпора које су развијене експлицитно за речне самохотке, некада се у циљу процене отпора речних самохотки користе методе које су развијене за морске бродове, а за које се показало да уз извесне модификације дају прихватљиве резултате. Тако је у пројекту „ARTEMIS“ [29], на основу података који су били на располагању, предочено да се отпор речних самохотки може проценити применом методе Гулдхамер-Харвалд (*Guldhammer & Harvald*). Према томе, и при изради дисертације је за одређивање отпора брода коришћена споменута метода. У циљу провере поузданости добијених резултата, овде је отпор рачунат и применом методе коју су развили Холтроп и Менен (*Holtrop & Mennen*), управо из разлога што ова метода има изузетно широку примену, имајући у виду да је развијена на бази великог броја испитивања различитих типова морских бродова. Како су обе методе добро познате и могу се пронаћи у литератури која се бави проблемима погона бродова, у овом раду оне неће бити посебно описиване.

Обе методе које су у раду коришћене развијене су за одређивање отпора брода у раним фазама израде пројеката, тако да су улазне величине које су потребне за прорачун у суштини основне димензије брода које су и у овом раду биле на располагању. Треба напоменути да ове две методе, осим што су развијене за морске теретне бродове, немају ништа заједничко. Развијене су од стране различитих аутора у различитом периоду и на бази различитих база података. Осим тога, метода Гулдхамер-Харвалд базирана је на Фрудовој рашчлани отпора где је укупни отпор (у складу са препорукама *ITTC-1957*) подељен на отпор трења и преостали отпор:

$$R_T = R_F + R_R,$$

док је Холтроп-Менен метода заснована на Хјузовој рашчлани отпора, те се у складу са препорукама *ITTC-1978* укупни отпор одредђује као сума вискозног отпора и отпора таласа:

$$R_T = R_V + R_W .$$

Иако обе методе пружају могућност да се утицај изданака на отпор брода израчуна засебно, услед чињенице да није било довољно информација о карактеристикама изданака разматраних самохотки, при прорачунима је овај утицај узет у обзир кроз повећање укупног отпора „голог“ трупа за 5%. Овде је узета горња препоручена вредност, јер савремене речне самохотке често имају прамчане пропелере чији систем тунела, који се налази у зони прамца, утиче на отпор брода. Осим тога, испитивања су показала да и сидра (која се и када су подигнута често налазе испод водне линије изван оплате брода) утичу на повећање отпора брода. Осим тога, сложена конфигурација крме (тунел, сукњице, сапнице, кормила, пропелерско вратило итд.) такође утиче на повећање отпора изданака. Овде свакако треба имати у виду и разлике у формама речних самохотки у односу на морске бродове.

За вредност корелационог додатка за потребе прорачуна усвојена је стандардна вредност од:

$$C_a = 0.4 \cdot 10^{-3}$$

Имајући у виду горе споменуто, спроведен је прорачун зависности отпора бродова од брзине за три случаја:

- брод 97 који плови на (практично) неограниченом пловном путу,
- брод 89 који плови пловним путем који је ограничен само по дубини и
- брод 96 који плови пловним путем који је ограничен и по дубини и по ширини.

Основне карактеристике ових бродова, као и околности под којима су испитивани дате су у следећој табели:

Табела 7.1 – Карактеристике разматраних бродова

R.B.	Lvl [m]	Bvl [m]	T [m]	∇ [m ³]	S [m ²]	h [m]	b [m]	D [m]	Broj propelera
97	92.54	11.05	1.85	1535	1228.4	12.50	400	1.60	2
89	104.22	10.95	3.22	3289	1664.6	5.00	400	1.60	1
96	103.19	11.00	2.50	2520	1500.6	4.00	55	1.60	1

Вредности дужина бродова на водним линијама, као и оквашене површине које су у табели дате, нису биле наведене у извештајима из којих су подаци о мерењима на овим бродовима преузети, већ су процењене у складу са препорукама које су изведене у поглављу 4.

За кинематску вискозност воде усвојена је вредност од $1.14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, а за густину воде 1 t/m^3 .

Резултати прорачуна зависности ефективне снаге од брзине разматраних бродова, при чему је утицај изданака узет у обзир, а који важе за пловидбу у води без ограничења, дати су у табелама 7.2 до 7.4, односно у форми дијаграма на сликама 7.8 до 7.10.

Табела 7.2 – Зависност ефективне снаге од брзине брода 97

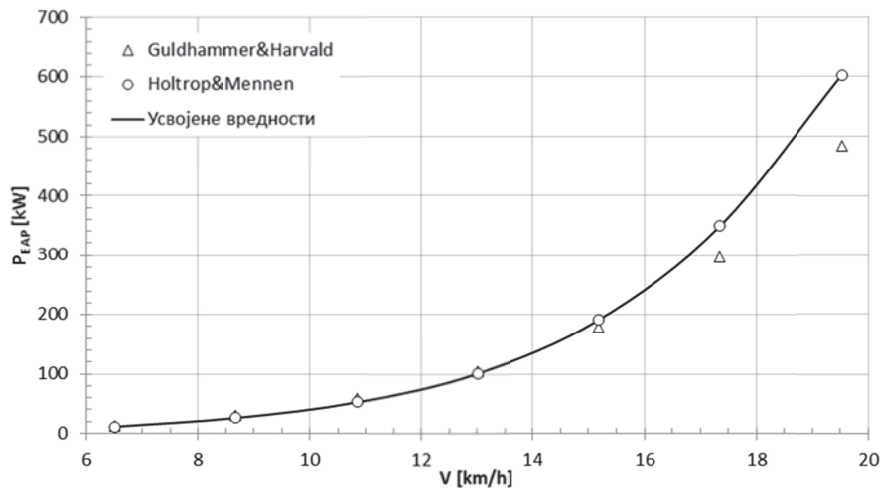
F_n	[-]	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
V	[m/s]	1.81	2.41	3.01	3.62	4.22	4.82	5.42
V	[km/h]	6.51	8.68	10.85	13.02	15.19	17.35	19.52
$R_n 10^{-9}$	[-]	0.1467	0.1957	0.2446	0.2935	0.3424	0.3913	0.4402
$C_F 10^3$	[-]	1.9723	1.8947	1.8377	1.7930	1.7564	1.7257	1.6992
<i>Guldhammer&Harvald</i>								
$C_R 10^3$	[-]	0.8937	0.9565	1.0718	1.2630	1.5579	1.9893	2.5968
$C_T 10^3$	[-]	3.2660	3.2512	3.3095	3.4559	3.7143	4.1150	4.6960
R_T	[kN]	6.56	11.60	18.45	27.75	40.59	58.74	84.84
$P_{E_{BH}}$	[kW]	11.9	28.0	55.6	100.3	171.2	283.2	460.1
$P_{E_{AP}}$	[kW]	12.4	29.4	58.4	105.3	179.8	297.3	483.1
<i>Holtrop&Mennen (1+k) = 1.282</i>								
R_F	[kN]	3.96	6.76	10.25	14.40	19.20	24.63	30.70
R_W	[kN]	0.00	0.14	1.17	4.97	14.21	31.60	59.29
R_A	[kN]	0.80	1.43	2.23	3.21	4.37	5.71	7.23
R_T	[kN]	5.88	10.24	16.54	26.64	43.19	68.89	105.87
$P_{E_{BH}}$	[kW]	10.6	24.7	49.8	96.3	182.2	332.1	574.2
$P_{E_{AP}}$	[kW]	11.2	25.9	52.3	101.1	191.3	348.7	602.9

Табела 7.3 – Зависност ефективне снаге од брзине брода 89

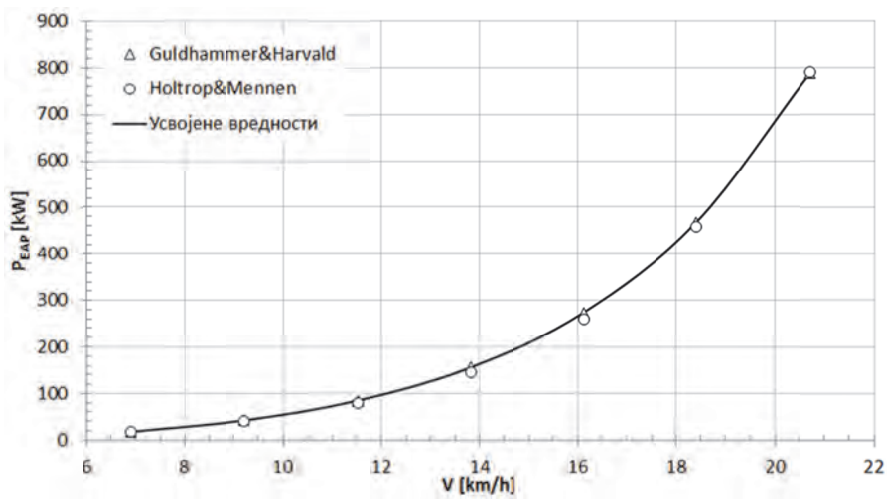
F_n	[-]	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
V	[m/s]	1.92	2.56	3.20	3.84	4.48	5.12	5.76
V	[km/h]	6.91	9.21	11.51	13.81	16.12	18.42	20.72
R _n 10 ⁻⁹	[-]	0.1754	0.2339	0.2923	0.3508	0.4092	0.4677	0.5262
C _F 10 ³	[-]	1.9237	1.8490	1.7939	1.7508	1.7155	1.6858	1.6603
<i>Guldhammer&Harvald</i>								
C _R 10 ³	[-]	0.5458	0.6245	0.7681	1.0061	1.3734	1.9120	2.6736
C _T 10 ³	[-]	2.8695	2.8734	2.9621	3.1569	3.4889	3.9978	4.7339
R _T	[kN]	8.79	15.65	25.21	38.68	58.19	87.09	130.51
P _{E BH}	[kW]	16.9	40.0	80.6	148.4	260.5	445.5	751.2
P _{E AP}	[kW]	17.7	42.0	84.6	155.8	273.5	467.8	788.7
<i>Holtrop&Mennen (1+k) = 1.293</i>								
R _F	[kN]	5.89	10.07	15.27	21.45	28.61	36.72	45.77
R _W	[kN]	0.00	0.05	0.63	3.38	11.48	29.11	60.56
R _A	[kN]	1.23	2.18	3.40	4.90	6.67	8.71	11.03
R _T	[kN]	8.85	15.26	23.78	36.03	55.16	85.32	130.80
P _{E BH}	[kW]	17.0	39.0	76.0	138.3	246.9	436.5	752.8
P _{E AP}	[kW]	17.8	41.0	79.8	145.2	259.3	458.3	790.4

Табела 7.4 – Зависност ефективне снаге од брзине брода 96

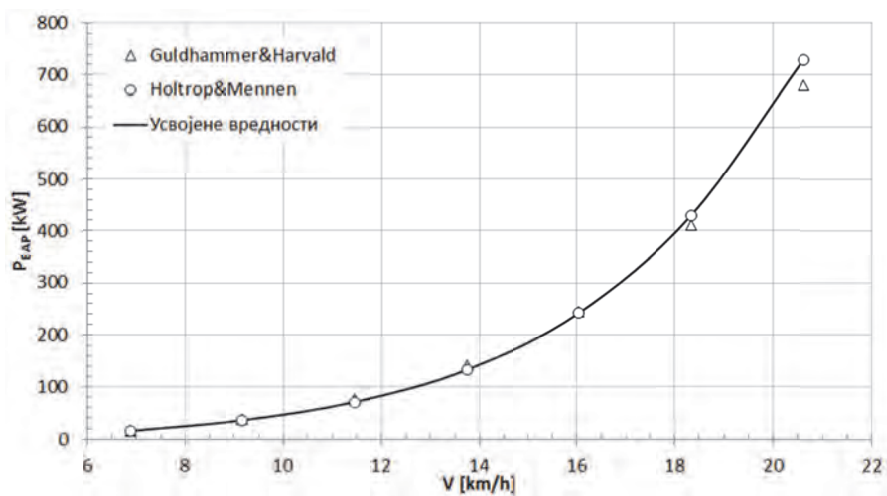
F_n	[-]	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
V	[m/s]	1.91	2.55	3.18	3.82	4.45	5.09	5.73
V	[km/h]	6.87	9.16	11.45	13.74	16.04	18.33	20.62
R _n 10 ⁻⁹	[-]	0.1728	0.2304	0.2880	0.3456	0.4032	0.4608	0.5184
C _F 10 ³	[-]	1.9277	1.8527	1.7975	1.7543	1.7189	1.6891	1.6635
<i>Guldhammer&Harvald</i>								
C _R 10 ³	[-]	0.6593	0.7285	0.8555	1.0663	1.3916	1.8680	2.5394
C _T 10 ³	[-]	2.9870	2.9812	3.0531	3.2206	3.5105	3.9571	4.6028
R _T	[kN]	8.17	14.49	23.19	35.22	52.26	76.94	113.27
P _{E BH}	[kW]	15.6	36.9	73.8	134.5	232.8	391.7	648.7
P _{E AP}	[kW]	16.4	38.7	77.5	141.2	244.4	411.3	681.1
<i>Holtrop&Mennen (1+k) = 1.273</i>								
R _F	[kN]	5.27	9.01	13.65	19.19	25.59	32.84	40.94
R _W	[kN]	0.00	0.10	0.95	4.36	13.19	30.61	59.40
R _A	[kN]	1.09	1.94	3.04	4.37	5.95	7.78	9.84
R _T	[kN]	7.81	13.51	21.37	33.17	51.73	80.20	121.37
P _{E BH}	[kW]	14.9	34.4	68.0	126.6	230.4	408.3	695.1
P _{E AP}	[kW]	15.7	36.1	71.4	133.0	241.9	428.7	729.8



Слика 7.8 – Зависност ефективне снаге од брзине брода 97



Слика 6.9 – Зависност ефективне снаге од брзине брода 89



Слика 7.10 – Зависност ефективне снаге од брзине брода 96

Из добијених резултата може се закључити да обе методе дају веома блиске вредности, што је потврђено на далеко већем броју примера но што је овде показано. Извесна одступања јављају се при већим брзинама, уколико је газ брода мањи од 2 метра, што се може уочити на слици 7.8, где до одвајања долази при брзини од око 15 km/h. Према томе, може се претпоставити да се применом одабраних метода, иако су развијене за морске бродове, може проценити вредност отпора речних самоходки, с тим да би било добро да се ова претпоставка провери, односно потврдити експериментима.

7.4 Повећање ефективне снаге услед деловања спољашњих утицаја

У поглављу 5 речено је да спољашњи утицаји и околности под којима су мерења спроведена у великој мери могу утицати на снагу коју је неопходно ангажовати у циљу постизања одређене брзине брода. Према томе, при анализи резултата испитивања бродова у реалним околностима, свакако се треба осврнути и на ове утицаје. Велика је штета што у извештајима из којих су преузети резултати мерења, није било довољно информација о околностима при којима су мерења спроведена, јер би једино тада било могуће, кроз конкретне вредности, боље разјаснити резултате мерења. Уместо тога, овде ће бити приказан начин на који би се спољашњи утицаји могли узети у обзир, што би требало да пружи нешто јаснију слику о величини појединих утицаја. Овим би требало да се омогући процена тзв. додатка за службу за пројектовање ових типова бродова.

На резултате који се добијају директним мерењима апсорпције снаге на броду при пловидби у реалним околностима, може утицати низ фактора који се могу поделити у две групе (како је то већ споменуто у поглављу 5):

1. Стање брода приликом спровођења мерења:
 - Оптерећење брода – на ком газу се спроводи мерење
 - Трим

- Храпавост оплате
 - Храпавост пропелера
 - Утицај кормиларења
 - Угао курса и позиција брода у односу на ток реке
2. Спољашњи утицаји под којима се мерења спроводе:
- Дубина и ширина пловног пута
 - Ветар
 - Таласи
 - Температура воде
 - Брзина тока реке
 - Утицај других бродова на истом пловном путу
 - Гравитациони отпор
 - Структура дна

Утицаји који су набројани у првој групи пре свега се односе на околности на које је могуће утицати пажљивим утоваром терета, одржавањем брода (чишћењем оплате и полирањем пропелера) кроз редовне ремонте и кормиларењем у складу са околностима које намеће пловни пут.

Са друге стране, утицаји из друге групе последица су околности које се мењају без могућности да се на њих утиче, односно једина могућа одлука се односити на оправданост испловљавања, у зависности од тога колико су неповољни услови за пловидбу.

Овде ће набројани утицаји бити анализирани према вероватноћи да су били присутни приликом мерења (чији су резултати дати у прилогу 2), те ће кроз конкретне резултате који се добијају за случај три одабрана брода бити дато и одговарајуће повећање снаге.

7.4.1 Утицај ограничења пловног пута

Речне самохотке веома често плове у условима ограниченог пловног пута под чиме се подразумева:

- ограничена дубина пловног пута и
- ограничена ширина пловног пута

Имајући у виду брзине којима се самохотке крећу оба ограничења неповољно утичу на отпор брода.

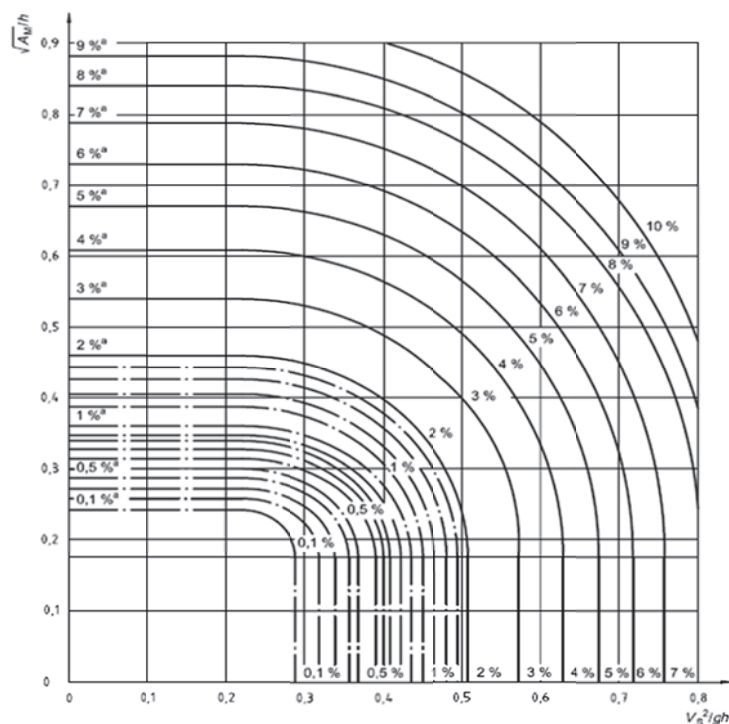
Приликом мерења апсорпције снаге брода пожељно је да се испитивања обаве на деоници где би поменути утицаји били минимални. Ово подразумева, у складу са препорукама *ИТТС-1987*, да:

- Фрудов број на бази дубине буде мањи од 0.7,
- дубина воде буде већа од 4 средња газа брода,

као и да однос површине попречног пресека канала и површине главног ребра брода буде већи од 15 [29].

Овакве услове за мерења на рекама често није могуће обезбедити, те у том случају треба констатовати околности под којима је мерење обављено, ради касније анализе резултата.

Данас постоји више приближних метода за прорачун утицаја ограничења пловног пута на отпор брода. Неке од ових метода директно или индиректно су засноване на моделским испитивањима, док су друге базиране на теоријским разматрањима. Према препорукама које су дате у документу [56], утицај дубине воде на отпор брода се рачуна према методи коју је Лакенби (*Lackenby*) предложио 1963. године [67]. Ова метода важи само за поткритичне брзине, што сасвим одговара уобичајеним брзинама којима самохотке плове. Према Лакенбијевој методи, утицај дубине воде одређује се кроз смањење брзине, што је много година раније предложио Шлихтинг (*Schlichting*).



Слика 7.11 – Лакенбијев дијаграм

Поступак за одређивање смањења брзине брода, приликом пловидбе у плиткој води, састоји се у следећем:

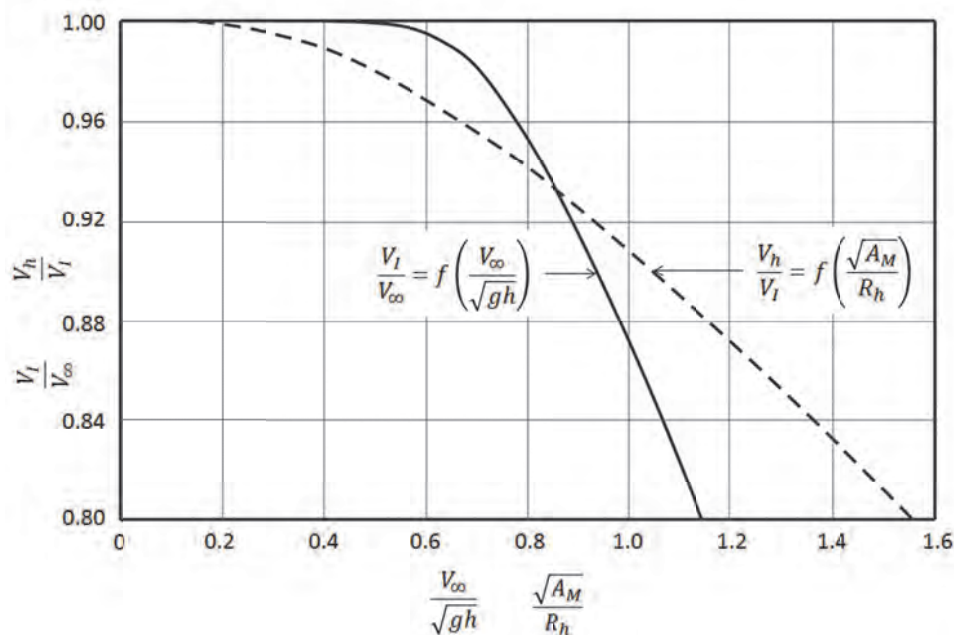
1. за познату вредност површине главног ребра брода (A_M) и дубине воде у којој брод плови, треба одредити: $\sqrt{A_M}/h$,
2. потом треба одредити Фрудов број (на бази дубине воде): $V/\sqrt{g \cdot h}$,
3. из дијаграма датог на слици 7.11 треба одредити процентуални пад брзине,
4. на крају преостаје да се одреди брзина брода у плиткој води.

До вредности смањења брзине може се доћи и из следећег израза који је базиран на Лакенбијевој методи [56]:

$$\frac{\Delta V}{V} = 0.1242 \cdot \left(\frac{A_M}{h^2} - 0.05 \right) + 1 - \sqrt{\tanh\left(\frac{gh}{V^2}\right)}, \quad \frac{A_M}{h^2} \geq 0.05 .$$

Што се утицаја ширине пловног пута на отпор брода тиче, и данас се користи метода коју је развио Ландвебер (*Landweber*) далеке 1939. године. На основу експерименталних испитивања утицаја димензија различитих канала на отпор теретних бродова, Ландвебер је предложио допуну Шлихтингове методе. Уместо

параметра $\sqrt{A_M}/h$, Ландвебер је предложио увођење величине $\sqrt{A_M}/R_h$, где је са R_h обележио хидраулички радијус, о чему је раније већ било речи у поглављу 6.3. Дијаграм који је предложио, а на основу кога је могуће проценити смањење брзине при пловидби у каналу, дат је на слици 7.12.

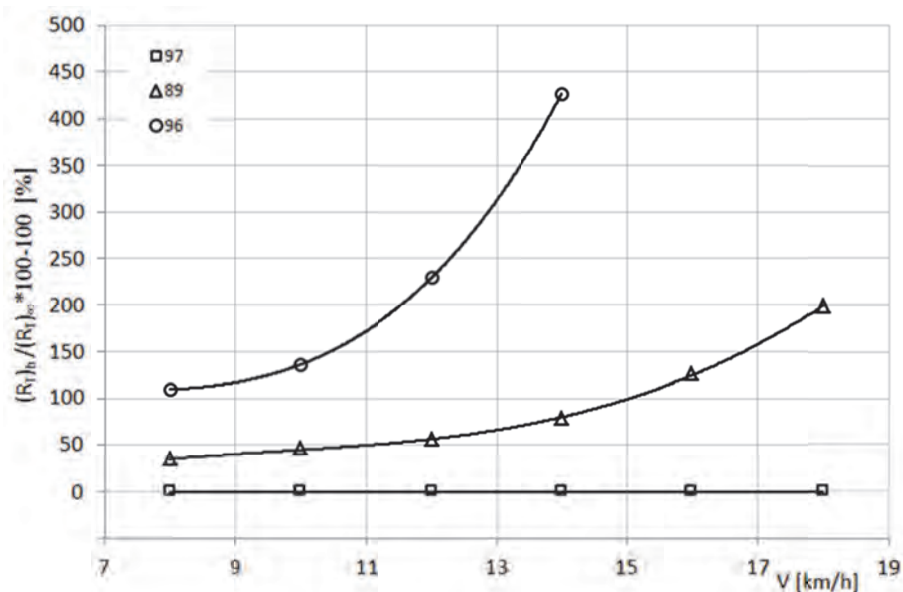


Слика 7.12 – Ландвеберов дијаграм

Поступак за одређивање пада брзине брода, приликом пловидбе у каналу, састоји се у следећем:

1. На основу вредности Фрудовог броја на бази дубине из дијаграма датог на слици 7.12 може се одредити V_l/V_{∞} , а одатле следи вредност за V_l .
2. За познати однос $\sqrt{A_M}/R_h$ се из истог дијаграма, али са одговарајуће криве, може очитати V_h/V_l одакле следи брзина брода у ограниченој води V_h .

Описаним поступцима урађен је прорачун утицаја ограничења пловног пута на отпор три разматрана брода (бродови 89, 96 и 97) и добијени резултати су дати у прилогу 7. На дијаграму који је дат на слици 7.13 добијени резултати су упоредно приказани. На ординати је у процентима дат пораст отпора услед утицаја ограничења пловног пута, а на апсциси је брзина брода.



Слика 7.13 – Повећање отпора брода услед утицаја ограничења пловног пута

Из добијених резултата може се уочити:

- У случају брода 97, где су дубина воде и ширина пловног пута са хидродинамичког аспекта неограничени ($h = 12.5$ m, $b = 400$ m), нема утицаја на отпор, односно брзину.
- За брод 89, где је ширина пловног пута неограничена, а дубина воде износи 5 метара ($h/T = 1.55$), према добијеним резултатима пораст отпора се креће између 40 и 200 % у зависности од брзине брода.
- Најизраженији пораст отпора је добијен у случају брода 96, где је дубина воде ограничена на 4 метра ($h/T = 1.60$), а ширина на 55 метара ($h \cdot b/A_M = 8.04$). У овом случају се повећање отпора креће између 110% и 430%.

Из дате анализе јасно се уочава значај утицаја ограничења пловног пута на погон брода, те се према томе о овој појави мора водити рачуна, и то како приликом израде пројекта новог брода, тако и при мерењима апсорпције снаге на постојећим бродовима.

Посебан проблем за анализу енергетске ефикасности брода представља чињеница да се карактеристике пловног пута током пловидбе мењају у зависности од конфигурације терена, структуре дна реке, као и атмосферских прилика које се одражавају на промене водостаја.

Како су повећања отпора брода приликом пловидбе у ограниченој води некада и изузетно велика, овај утицај свакако не би требало узимати у обзир кроз додатак на службу, него би га требало засебно анализирати имајући у виду подручје пловидбе за које је брод намењен.

7.4.2 Утицај кормиларења

У зависности од локације на којој се мерење апсорпције снаге спроводи, некада није могуће избећи употребу кормила што за последицу има и заносење и закретање брода. И отклон кормила, а нарочито суперпозиција споменутих кретања брода, могу утицати на пораст отпора. Ово се директно одражава на резултате мерења ангажоване снаге.

Према препорукама које су дате у документу [56], повећање отпора услед отклона кормила, а у циљу одржања курса, може се одредити из следећег израза:

$$R_{\delta\delta} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (1 - t_R) \cdot \frac{6.13 \cdot \lambda_R}{2.25 + \lambda_R} \cdot A_R \cdot V_{eff}^2 \cdot \delta_R^2$$

где су: t_R - коефицијент смањеног потиска при отклоњеном кормилу

λ_R - коефицијент виткости кормила

A_R - површина листа кормила [m²]

V_{eff} - брзина којом вода наструјава на кормило [m/s]

δ_R - угао отколна кормила [rad]

Коефицијент смањеног потиска при отклоњеном кормилу одређује се експериментално, и у [56] је дата препорука из које проистиче да зависи само од коефицијента пуноће истиснућа брода. Дата зависност се може представити следећим изразом [56]:

$$1 - t_R = 0.7726 \cdot C_B^2 - 0.7460 \cdot C_B + 0.8787$$

Препорука која је дата изведена је на основу испитивања морских бродова, те би свакако имало смисла испитати у којој мери се може применити за форме које су карактеристичне за речне самоходке. Међутим, у недостатку поузданијих метода у примеру који следи коришћене су вредности које су добијене применом датог израза.

Ефективна брзина, којом вода наструјава на кормило, према истом извору може се проценити применом следећег израза:

$$V_{eff} = \frac{0.75 \cdot V}{(1 - S_R)} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot (1 - c_1 \cdot c_2) \cdot S_R + [1 - c_1 \cdot c_2 \cdot (2 - c_2)] \cdot S_R^2}$$

где су: V - брзина брода [m/s]

S_R - реални склиз

$$S_R = \frac{P \cdot n - V \cdot (1 - w)_m}{P \cdot n}$$

$$c_1 = \frac{D}{b_R}$$

$$c_2 = 0.8 \cdot (1 - w)_m$$

P - корак пропелера [m]

n - брзина обртања пропелера [1/s]

b_R - висина листа кормила [m]

$(1 - w)_m$ - средња вредност коефицијента суструјања

Из датих израза може се уочити да је потребно располагати са доста података како би било могуће одредити повећање отпора брода услед отклона кормила. Тачне вредности свих наведених величина нису познате ни за један од разматраних бродова, тако да ће за потребе процене реда величине додатног отпора услед отклона кормила, потребни подаци бити процењени.

Директна последица отклона кормила је појава:

- закретања брода (ротација око вертикалне осе) и
- заносења брода (транслација у попречном правцу).

Поменута кретања карактеристична су за скретање брода. Као последица асиметричног опструјавања брода околном водом долази до појаве додатних сила које повећавају отпор брода. Резултујуће кретање има за последицу да се вектор брзине тежишта брода не поклапа са симетралом брода. Угао између ова два правца представља угао заносења.

Према [56] повећање отпора брода услед заносења може се проценити применом следећег израза:

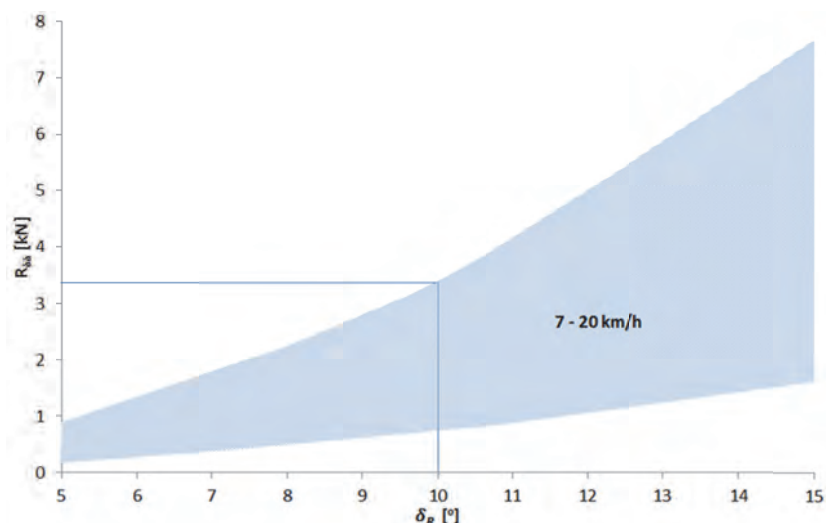
$$R_{\beta\beta} = 0.25 \cdot \pi \cdot \rho \cdot T^2 \cdot V_S^2 \cdot \beta^2$$

где је са β обележен угао заносења изражен у радијанима.

Резултати прорачуна утицаја отклона кормила и угла заносења на пораст отпора, за разматране бродове (89, 96 и 97), дати су у прилогу 7. За потребе прорачуна процењене су следеће величине:

- За брод 97 су познате димензије кормила, док су за преостала два брода димензије кормила процењене на основу података за сличне бродове.
- Корак пропелера брода 97 је познат, а вредности корака пропелера бродова 89 и 96 процењене су на основу прелиминарног избора оптималних пропелера за ове бродова, а имајући у виду расположиве податке са мерења.
- За вредност коефицијента суструјања је усвојено $w = 0.30$, с тим да је утврђено да би промена вредности коефицијента суструјања у интервалу ± 0.10 незнатно утицала на повећање отпора ($\Delta R_{\delta\delta} < 0.8 \text{ kN}$) и то при већим брзинама кретања брода.

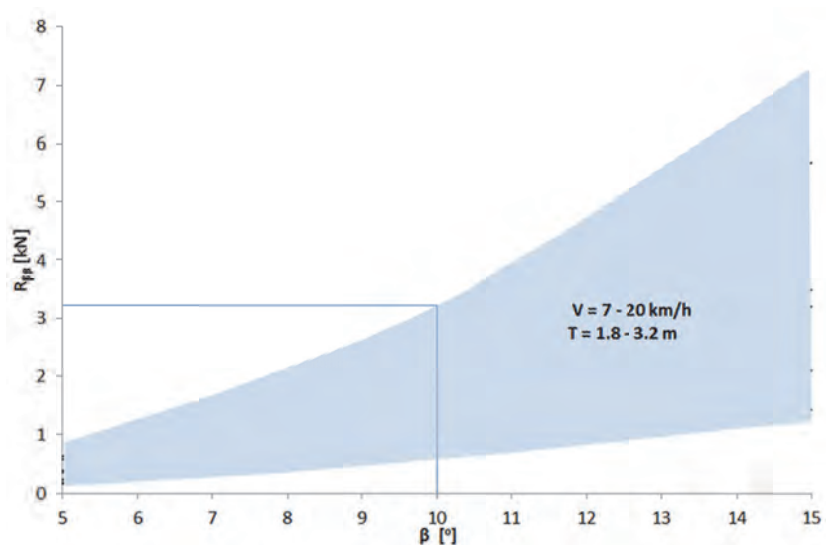
Утицај отклона кормила на повећање отпора оквирно је дат на следећем дијаграму.



Слика 7.14 – Утицај отклона кормила на повећање отпора брода

Из добијених резултата се уочава да се са повећањем отклона кормила повећава и отпор, што је утолико израженије уколико се брод креће брже. На основу процене да за одржавање курса брода при пловидби нема потребе кормило отклањати за више од ± 10 степени, сем приликом значајнијег скретања (што је пожељно избегавати приликом мерења апсорпције снаге), следи да је повећање отпора услед отклона кормила мање од 5%. При брзинама мањим од 10 km/h ово повећање пада испод 1%.

Утицај заносења брода на повећање отпора показан је на следећем дијаграму:



Слика 7.15 – Утицај заносења брода на повећање отпора

Као што се може уочити, ни повећање отпора услед занешења, сем при пловидби у неповољним условима, не прелази 5%.

Према [56] препорука је да се употреба кормила приликом мерења апсорпције снаге сведе на најмању могућу меру. Међутим, уколико није могуће избећи употребу кормила (нпр. због обезбеђивања безбедности брода при пловидби), тада треба пратити промену угла отклона кормила, као и промену угла занешења брода, што је потребно за каснију анализу резултата мерења.

На основу добијених резултата, може се закључити да би додатком за службу од 10% утицај умереног кормиларења био покривен. Приликом оштријег маневрисања одржање брзине брода не би био императив. Допунским испитивањима утицаја кормиларења на отпор брода у реалним околностима, требало би проверити добијене резултате и евентуално кориговати дату препоруку за додатак за службу.

7.4.3 Угао курса и позиција брода у односу на ток реке

Овде се пре свега мисли на угао под којим се брод креће у односу на ток реке, без употребе кормила. Уколико би се брод кретао дуж струјница речног тока тада би ова компонента била занемарљива. Међутим, ово није могуће услед сложених околности које прате пловидбу брода реком:

- струјнице мењају правац услед промена конфигурације дна и обала, као и промена водостаја,
- брод мора да поштује правила пловидбе и плови по курсу који је прилагођен ограничењима пловног пута.

Према томе, веома често самохотке плове под извесним углом у односу на струјнице реке. Са хидродинамичког аспекта ова појава је еквивалентна појавама до којих долази при кормиларењу брода, те према томе има за последицу извесно повећање отпора брода. Осим тога, услед разлика у притисцима по боковима брода, до којих долази услед асиметричног опструјавања трупа брода, да би се одржао курс потребно је деловати кормилом, што додатно повећава отпор. О утицају отклона кормила и занешења/закретања брода на отпор је већ било речи.

7.4.4 Повећање храпавости оплате и пропелера услед обраштања

Од стања оплате брода и квалитета површине крила пропелера у значајној мери зависи отпор брода, односно ефикасност пропулзивног комплекса. Уопштено посматрано, могућа су два основна проблема којима су бродови у експлоатацији изложени, а који за последицу имају повећање храпавости:

- Механичка оштећења оплате, односно пропелера, релативно су честа појава код речних самохотки, имајући у виду околности којима су ови бродови изложени при пловидби. Оваква оштећења оплате брода за последицу често имају и појаву корозије, што додатно повећава храпавост, а тиме и отпор трења. Овде се не говори о великим оштећењима, која за последицу имају избацивање брода ван функције, него о мањим оштећењима која временом могу значајно умањити енергетску ефикасност брода.
- Обраштање брода и пропелера организмима који насељавају подручја у којима брод плови. Колоније ових организама, које се развијају на оплати брода, у значајној мери могу повећати храпавост оплате, што се директно одражава на отпор брода. Ова појава је код речних бродова мање изражена него код морских, али је не треба занемарити.



Слика 7.16 – Обрасла сапница (<http://www.naiades.info>)

У литератури може се пронаћи више препорука за одређивање пораста отпора трења услед повећања храпавости оплате брода, међутим њихова примена је везана за познавање тачне вредности средње храпавости оплате. На пример, према Townsin-у [69] пораст отпора може се одредити из следећег израза:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta C_F}{C_T} = \frac{0.044}{C_T} \cdot \left[\left(\frac{k_2}{L} \right)^{1/3} - \left(\frac{k_1}{L} \right)^{1/3} \right]$$

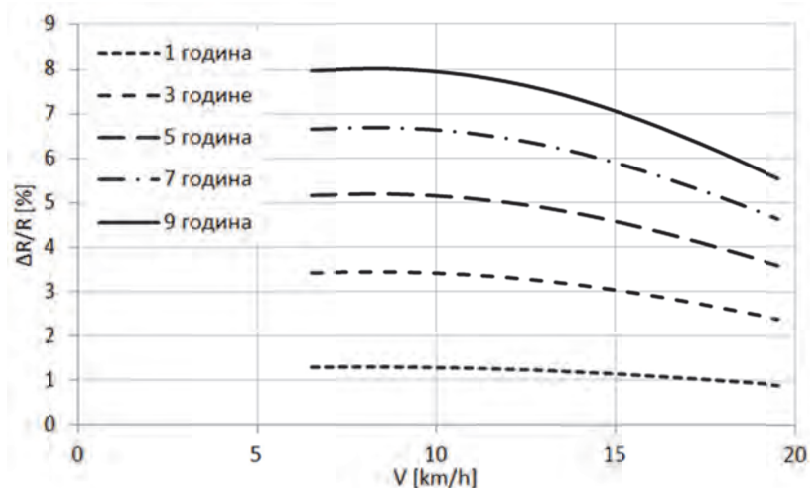
где су :

- ΔR – повећање отпора,
- ΔC_F – повећање коефицијента отпора трења,
- C_T – коефицијент тоталног отпора,
- k_1 – средња храпавост оплате новог брода,
- k_2 – средња храпавост брода након извесног времена.

Храпавост оплате новог брода зависи од квалитета израде (завара) и од квалитета завршног премаза. Уколико се не располаже са тачнијом вредношћу, обично се за храпавост новог брода усваја вредност од 150 μm .

Према истраживањима [68] која су обухватила велики број морских бродова различите намене, у периоду између 1976. и 1986. године, констатовано је да храпавост оплате брода просечно годишње расте за 30 до 40 μm . На ово значајно утиче квалитет завршног премаза брода. Данас постоје тзв. самополирајући премази, који у великој мери спречавају развој колонија живих организама на оплати брода, а тиме и значајно продужавају период између два доковања брода ради чишћења. Међутим, питање је у којој мери се овом проблему код речних бродова придаје пажња и колико је распрострањена употреба оваквих премаза код речних бродова.

Применом описаног поступка за брод 97, при чему је усвојен годишњи пораст храпавости оплате од 40 μm добијени су следећи резултати:



Слика 7.17 – Пораст укупног отпора брода услед повећања храпавости оплате

Из добијених резултата може се закључити да би отпор брода порастао око 5% (при мањим брзинама), у односу на отпор новог брода, уколико оплата брода не би била очишћена 5 година. Међутим, извесно је да ће у овом периоду брод морати ићи на док ради отклањања других оштећења до којих долази у експлоатацији, нарочито при пловидби нерегулисаним пловним путевима, а што може бити искоришћено и за инспекцију и чишћење оплате.

На енергетску ефикасност брода, осим стања оплате, у значајној мери утиче стање пропелера. Повећање храпавости крила, било да је узроковано обраштањем или оштећењима површине, непосредно се одражава на хидродинамичку ефикасност пропелера. Оштећења површине крила пропелера код речних самоходки су најчешће узрокована:

- Појавом кавитације – пропелери који покрећу речне самоходке су често веома оптерећени што може довести до појаве кавитације. Кавитација, у зависности од интензитета, може довести до значајних оштећења пропелера.
- Абразивним деловањем чврстих честица у води (песак и шљунак), што је нарочито изражено при пловидби у веома плиткој води. Овакве честице које су радом пропелера подигнуте са дна заједно са водом пролазе кроз сапницу. У зависности од гранулације ових честица, приликом њиховог проласка кроз зазор између крила пропелера и унутрашњег прстена

сапнице, може доћи до оштећења ивице крила, које је направљено од мекшег материјала него што је ова зона сапнице.

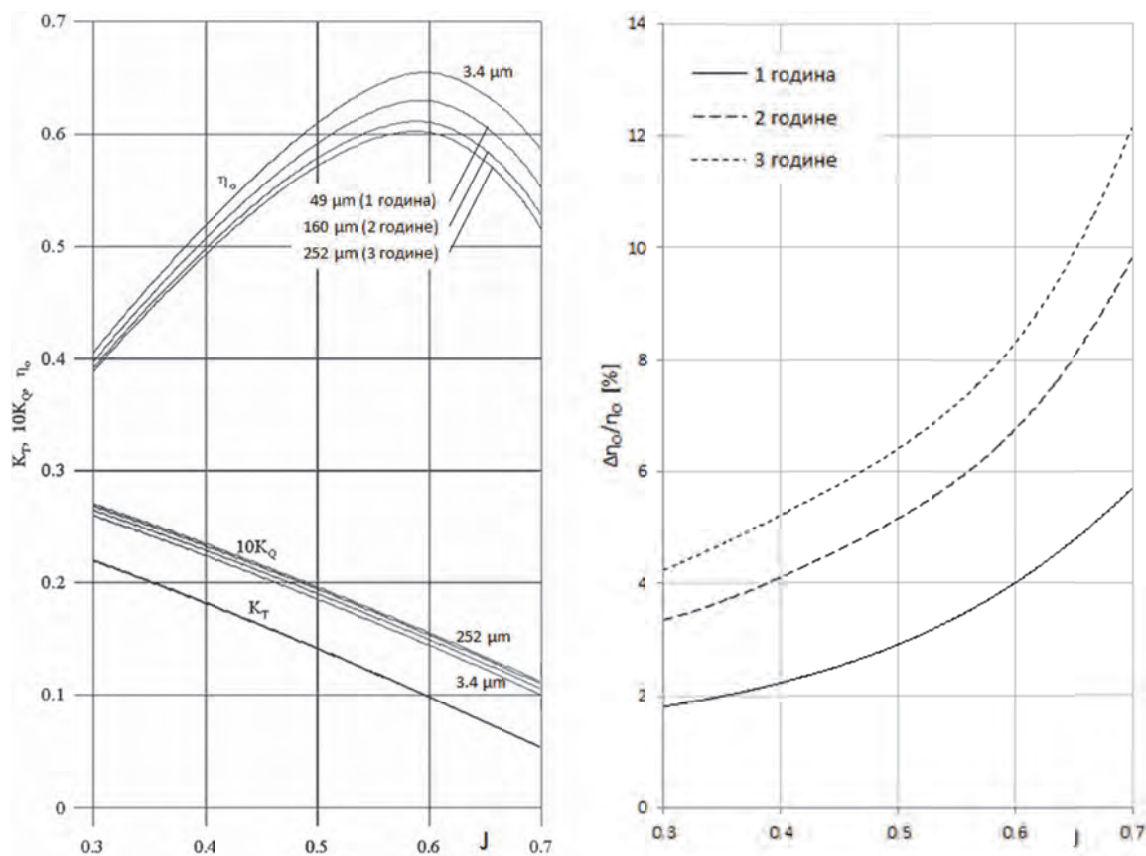
- Ударцима у чврсте предмете (балване и др.) који плутају на површини воде, што није ретка појава на пловним путевима са неуређеним обалама.



Слика 7.18 – Оштећења пропелера која су уочена приликом ремонта брода 97 који је обављен 2011. године

Испитивања утицаја храпавости пропелера [74] на хидродинамичке карактеристике показала су да неповољни ефекти повећања храпавости пропелера у већој мери могу утицати на енергетску ефикасност погона брода него повећање храпавости оплате брода.

У раду [75] анализиран је утицај храпавости површине крила пропелера на коефицијент потиска, коефицијент обртног момента и ефикасност пропелера у слободној вожњи. Овде нису разматрана значајнија механичка оштећења пропелера. Закључци до којих се дошло могу се сагледати из следећих дијаграма где су представљени добијени резултати.



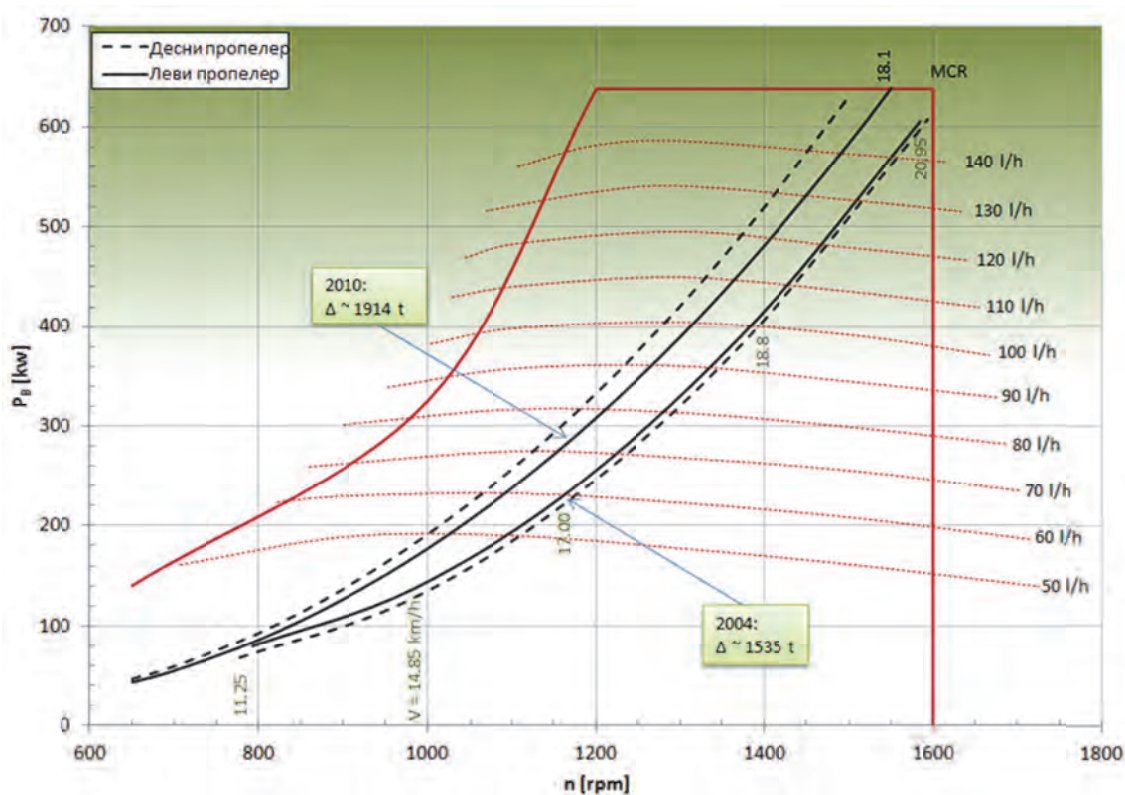
Слика 7.19 – Промена хидродинамичких карактеристика пропелера услед повећања храпавости површине [75]

Из добијених резултата се може закључити:

- Просечно повећање храпавости пропелера, код морских бродова, на годишњем нивоу износи око 110 μm .
- Промена храпавости пропелера не утиче на коефицијент потиска, али утиче на коефицијент обртног момента.
- Најзначајнији утицај се огледа у паду ефикасности, што за последицу има да је потребно уложити већу снагу да би се остварио исти потисак.
- Пад ефикасности пропелера зависи од брзине кретања брода, пречника пропелера и брзине обртања пропелера, односно зависи од коефицијента напредовања (J). Што је пропелер ефикаснији (при истом пречнику и истом броју обртаја постиже већу брзину) то је пад ефикасности већи услед повећања храпавости, односно пропелер је осетљивији на квалитет завршне обраде површине.

Када је реч о стању у коме су били пропелери приликом мерења апсорпције снаге на разматраним бродовима, једино је познато да је пропелер брода 97 био нов јер је мерење обављено недуго након поринућа брода. О стању осталих пропелера није било одговарајућих информација. Према томе, у случају бродова 89 и 96 није лако проценити колики су могући губици услед храпавости пропелера, али се може претпоставити да не прелазе 10%.

Интересантно је упоредити резултате испитивања 97 и 98 (видети прилог 1). Ова мерења су обављена на истом броду, али је испитивање 97 обављено у оквиру пробних вожњи при примопредаји брода, док је испитивање 98, које је реализовано за потребе овог истраживања, обављено шест година касније. Није познато да ли је брод у међувремену ремонтован, али је недуго након овог испитивања извучен на док ради ремонта и констатована су оштећења пропелера која су показана на слици 7.18. Према томе, мерења која су обављена 2010. године спроведена су са изузетно оштећеним пропелерима. Резултати који су добијени показани су на следећем дијаграму.



Слика 7.20 – Резултати мерења апсорпције снаге при новим (2004.) и оштећеним пропелерима (2010.)

У оба случаја, мерења су спроведена у практично неограниченом пловном путу, на Дунаву, на локацији где је дубина воде износила више од 10 метара. Како је ширина пловног пута практично неограничена, није било потребе за значајнијом употребом кормила, тако да није било ни израженијег заносења брода у току мерења снаге. Осим тога, у току мерења нису забележени ни изражен ветар, као ни таласи. Према томе, осим извесне разлике у депласманима и промена на оплати и пропелерима, није било других спољашњих утицаја, који би могли значајније утицати на уочену разлику у добијеним резултатима мерења.

Брод 97 има два пропелера и два мотора од по 638 kW. Оштећење (недостаје део крила) пропелера које је приказано на слици 7.18 заправо је оштећење десног пропелера, што се лепо препознаје у измереним вредностима. Из добијених резултата може се уочити да је максимална брзина која је постигнута приликом другог мерења (са оштећеним пропелерима) износила 18.1 km/h што је скоро 3 km/h мање него што је измерено када је брод био нов. Ова разлика се и не чини тако великом док се не сагледа промена потрошње горива. У дијаграму датом на слици 7.20 приказана је радна област уграђених мотора, а тачкастим линијама је представљена промена потрошње горива у зависности од режима рада мотора. У време док је био нов, брод је постигао брзину од 18 km/h уз укупну потрошњу од око 160 l/h, док је при истој брзини потрошња порасла на преко 300 l/h услед споменутих оштећења. Овде не треба заборавити да је брод 2010. године носио непуних 400 тона терета више. Упркос тога, овде је реч о изузетно великој промени потрошње, из које се јако добро може сагледати значај стања оплате и пропелера на енергетску ефикасност брода.

На крају, резимирајући закључке до који се дошло при анализи утицаја храпавости оплате и пропелера на потребну снагу, може се претпоставити да би додатком за службу од 15% била обезбеђена довољна резерва снаге за одржање брзине брода, а период између два ремонта ради чишћења био би продужен на разумну меру. Као и у случају закључака који се односе на утицај кормиларења, и ова препорука је подложна провери и евентуалној корекцији.

7.4.5 Утицај ветра на отпор брода

Према препорукама датим у *ISO-15016* [56] повећање отпора брода услед деловања ветра може се израчунати применом следећег израза:

$$R_{AA} = \frac{1}{2} \cdot \rho_A \cdot A_{XV} \cdot V_{WR}^2 \cdot C_{AA}(\Psi_{WR})$$

где су : ρ_A – густина ваздуха [kg/m^3]

A_{XV} – површина максималног попречног пресека брода која је изложена деловању ветра [m^2],

V_{WR} – релативна брзина ветра [m/s],

C_{AA} – коефицијент отпора ветра,

Ψ_{WR} – угао који одређује релативни правац дувања ветра у односу на брод [rad],

Коефицијент отпора ветра, који зависи од надводног дела брода и релативног правца дувања ветра, може се одредити из следеће зависности:

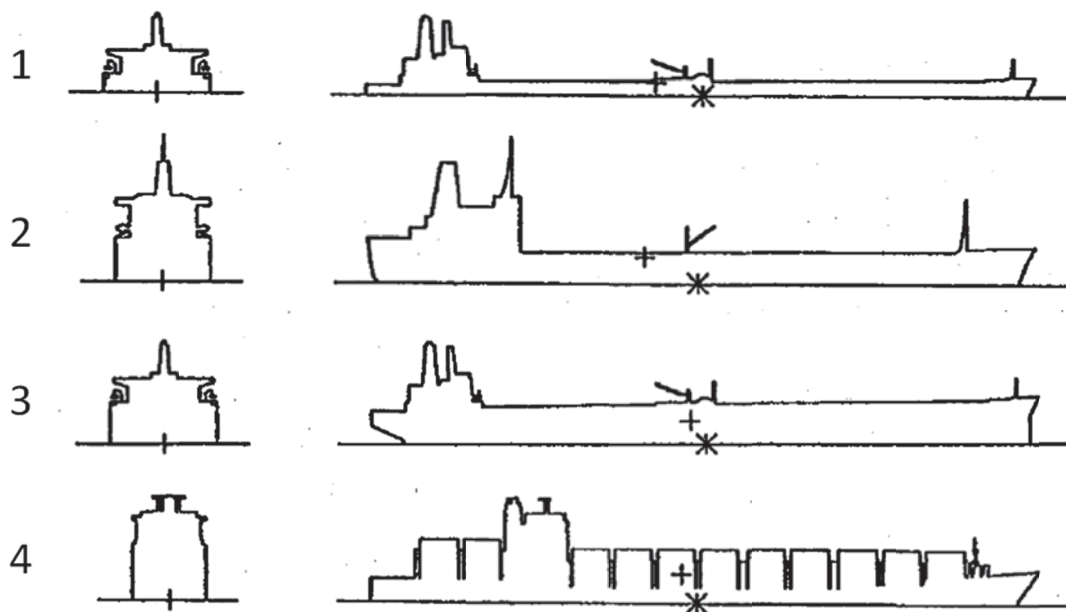
$$C_{AA}(\Psi_{WR}) = C_{AAO} \cdot K(\Psi_{WR})$$

где су : C_{AAO} – коефицијент отпора ветра када дува у прамац брода

$K(\Psi_{WR})$ – коефицијент правца релативног ветра

Оба коефицијента (C_{AAO} и K) се одређују моделским испитивањима у аеротунелима. Према препорукама датим у [56], али и у складу са *ИТТС* препорукама [31], у недостатку резултата моделских испитивања, вредности поменутих коефицијента могу се усвојити на основу испитивања сличних бродова. При реализацији овог истраживања нису пронађена слична испитивања аеродинамичких карактеристика речних самоходки, те су у нумеричком примеру који следи коришћени резултати испитивања најсличнијих морских бродова. У аеротунелу института за бродоградњу Универзитета у Хамбургу обављена су

опсежна испитивања великог броја различитих типова морских бродова и значајан део резултата је објављен у извештају [77], а део и у књизи [76]. Између великог броја испитаних бродова, имајући у виду надводни део брода, процењено је да би надводни део латералног пресека морских танкера имао највише сличности са речним теретним самохоткама.



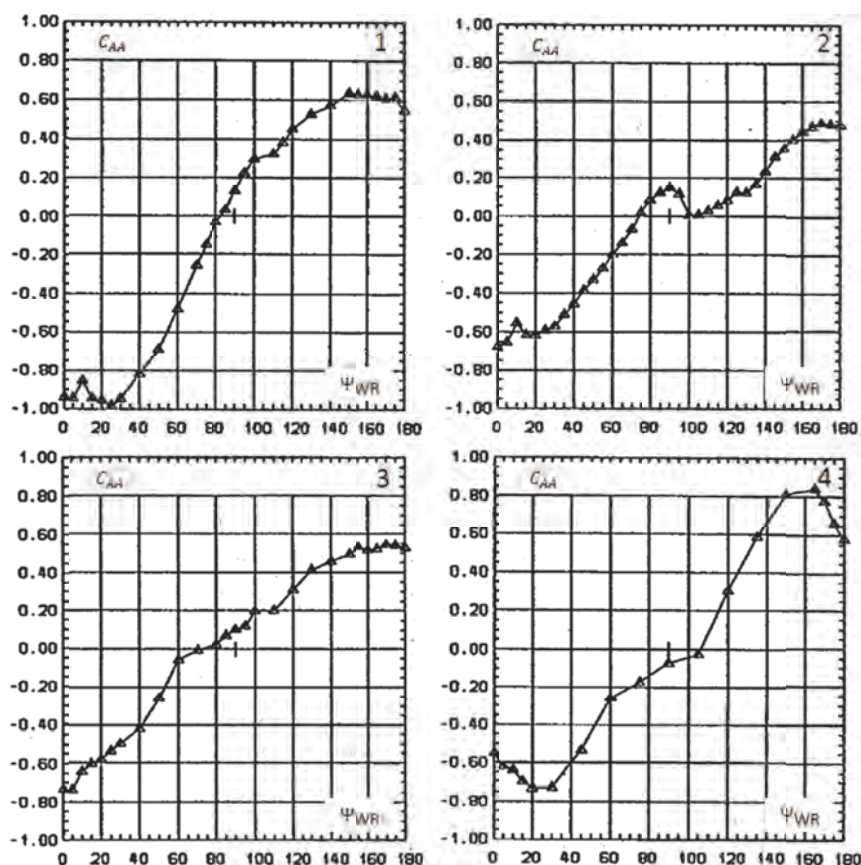
Слика 7.21 – Неколико типова морских бродова чији надводни део у извесној мери подсећа на надводни део речних самохотки

Осим форми танкера, чији надводни део подсећа на надводни део речних самохотки (за превоз генералног, расутог или течног терета), разматрани су и резултати испитивања контејнерских бродова јер се овај вид транспорта све чешће може срести и на рекама, а ови бродови су због велике изложене површине деловању ветра нарочито угрожени.

Резултати мерења коефицијената сила које делују на бродове (дате на слици 7.21) услед утицаја ветра под угловима између 0 и 180 степени, а у правцу симетрала бродова (коефицијената отпора ветра), у случају бродова 1, 2, 3 и 4 приказани су на слици 7.22.

Угао $\Psi_{WR} = 0^\circ$ односи се на случај када ветар дува у прамац, а $\Psi_{WR} = 180^\circ$ подразумева крмени ветар. Према томе, негативан предзнак коефицијента

подразумева повећање отпора брода. Из датих резултата може се уочити да и у случају бочног ветра ($\Psi_{WR} = 90^\circ$), услед асиметрије брода у односу на главно ребро, постоји подужна компонента силе, односно утицај на отпор брода. Осим тога, може се приметити и да је неповољан утицај прамчаног ветра израженији него повољан утицај крменог ветра, изузев у случају контејнерског брода где су интензитети ових утицаја приближно једнаки. У случају контејнерског брода (случај 4), који има изузетно велику латералну површину, вредност силе која је последица деловања ветра је највећа када ветар на брод наструјава под углом од $20 \div 30$ степени, било да дува са прамца или са крме.



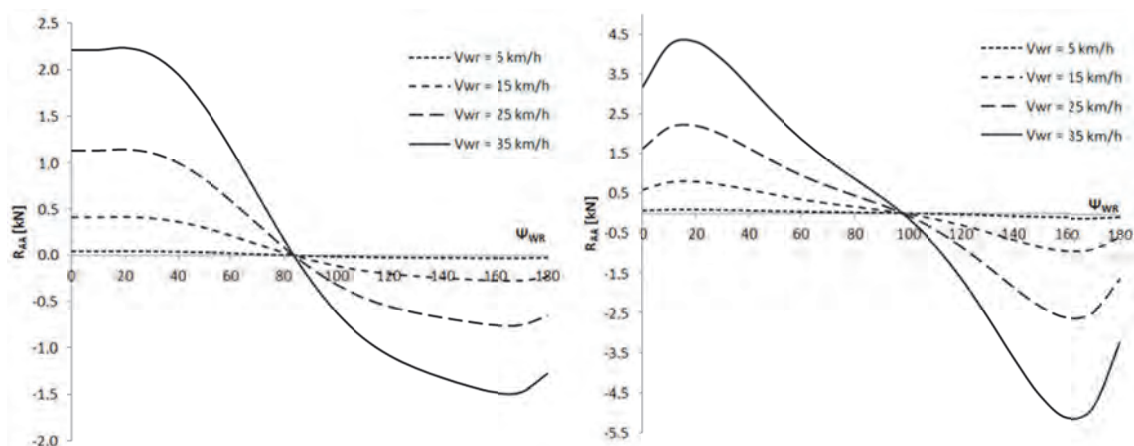
Слика 7.22 – Измерене вредности коефицијента отпора ветра одговарајућих бродова

Да би ред величине утицаја ветра на повећање отпора речних самоходки био квантитативно процењен, анализиран је утицај промене релативне брзине ветра у односу на брод у интервалу од 5 до 35 km/h. Овде је за анализу усвојена управо

промена релативне брзине ветра, јер је то податак који је лако измерити на броду приликом испитивања апсорпције снаге. Осим релативне брзине ветра, потребно је измерити и релативни угао ветра, што такође не би требало да представља проблем. Разматрана су два случаја:

- брод са малом изложеном латералном површином (случај 1 са слике 7.21), што би одговарало броду за превоз расутог терета; за овај брод је усвојена максимална површина попречног пресека од 40 m^2 и
- брод са великом изложеном латералном површином (случај 4 са слике 7.21), што би одговарало речном контејнерском броду; за овај брод је усвојена максимална површина попречног пресека од 100 m^2 (брод широк 11.45 m са слободним боком од 1.5 m , три реда контејнера по висини изнад палубе и кормиларницом изнад горњег реда).

За густину ваздуха је усвојена вредност која одговара температури од 15°C на надморској висини која одговара нивоу мора и која износи 1.225 kg/m^3 . Резултати који су добијени описаним поступком дати су у прилогу 7 као и на слици 7.23.



Слика 7.23 – Апсолутно повећање/смањење отпора брода услед утицаја ветра:
лево – брод за превоз расутог терета, десно – контејнерски брод

При тумачењу приложених резултата треба имати у виду да је апсолутна брзина ветра променљива, јер она зависи од и од релативне брзине ветра и од угла релативног ветра, односно од брзине кретања брода и угла курса брода.

Уколико би се брод 97 кретао брзином (у односу на дно реке) од 6.5 km/h ($R_T = 6.18 \text{ kN}$), а релативна брзина ветра који дува у прамац износила 35 km/h ($R_{AA} = 2.213 \text{ kN}$) тада би укупно повећање отпора износило око 35%. Апсолутна брзина ветра би тада износила 28.5 km/h, што свакако није брзина при којој би била обустављена пловидба.

Из добијених резултата може се закључити да се утицај ветра на резултате мерења апсорпције снаге не може занемарити, утолико пре уколико је изложена површина брода већа, а веома често се при мерењима утицају ветра не посвећује довољна пажња. Повећањем додатка за службу за 3÷5%, у зависности од типа брода, у извесној мери би утицај ветра био узет у обзир.

На крају би требало подсетити да су овде дати резултати базирани на испитивањима аеродинамичких карактеристика морских бродова и да би свакако било добро да се моделским испитивањима у ваздушном тунелу одреди промена коефицијента отпора ветра за форме које су типичне за речне самоходне теретне бродове.

7.4.6 Повећање отпора услед утицаја таласа

У складу са препорукама датим у *ISO-15016* [56] приликом мерења апсорпције снаге код морских бродова, неопходно је водити рачуна о утицају таласа. Овде се мисли на таласе који су последица атмосферских прилика – ветра у зони у којој се мерења обављају, али и таласа који долазе у зону мерења из удаљених подручја где су настали. Имајући у виду специфичности унутрашњих пловних путева до појаве таласа на рекама и каналима долази искључиво услед утицаја ветра који је присутан у време мерења. Утицај таласа које могу узроковати други пловни објекти, који се крећу у подручју у коме се обавља мерење, треба одстранити из резултата мерења тако што треба сачекати да се њихов утицај изгуби па тек потом

наставити мерења. Препоручује се да се параметри таласа (висина таласа, период таласа и правац простирања) измере посебним бовама и/или уређајима на броду, а уколико то није могуће потребно је да више учесника мерења, укључујући и заповедника брода (капетана), дају своју процену стања таласа у време мерења апсорпције снаге.

Данас постоји више теоријских и емпиријских метода за процену повећања отпора брода услед утицаја таласа. У документу [56] спомињу се радови Маруа (*Maruo*) [78], Фалтинсена (*Faltinsen*) [79] и Товнсина (*Townsin*) [80], као и формуле Фуђи-Такахашиа (*Fujii-Takahashi*) и Квона (*Kwon*), с тим да су методе које су предложене релативно компликоване за примену. Ове методе подразумевају да су на располагању резултати испитивања понашања брода на регуларним таласима константне висине, а различитих таласних дужина и различитих брзина [81]. Ови подаци, ни за један од разматраних бродова, нису на располагању. Осим споменутих метода оставља се могућност употребе и осталих за које се покаже да дају добре резултате.

У извештају 7.5-04-01-01.2 ИТТС-а са 24. заседања комитета за погон бродова (*Specialist Committee on Powering Performance*), понуђен је веома једноставан израз које се може употребити за грубу процену повећања отпора брода на таласима, који не прелазе 2 метра, а који је извео Креитнер (*Kreitner*) [81]:

$$\Delta R_{WO} = 0.64 \cdot \xi_W^2 \cdot B^2 \cdot C_B \cdot \rho / L$$

где су :

- ξ_W – висина таласа [m]
- B – ширина брода [m]
- C_B – коефицијент пуноће истиснућа
- ρ – густина воде [N/m³]
- L – дужина брода [m]

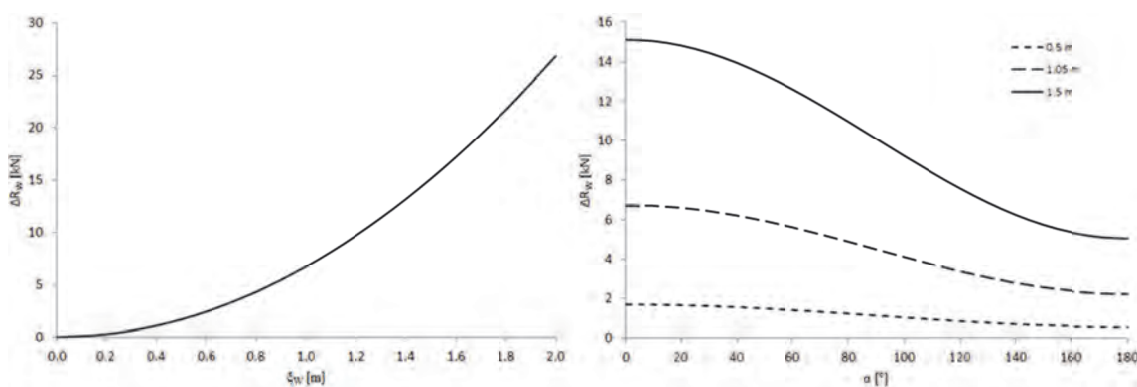
Овај израз важи само за случај када таласи долазе са прамца. Међутим, у радовима [82] и [83], у којима се аутори баве анализом спољашњих утицаја на

пропулзивне карактеристике морских бродова, дата је корекција која омогућава примену Креитнеровог израза без обзира на правац простирања таласа:

$$\Delta R_W = \Delta R_{WO} \cdot (0.667 + 0.333 \cdot \cos \alpha)$$

У последњем изразу α представља релативни угао простирања таласа у односу на угао курса брода. При пловидби прамцем ка таласима $\alpha = 0^\circ$.

Применом описаног поступка на брод 97 добијени су следећи резултати (видети прилог 7):



Слика 7.24 – Повећање отпора брода 97 при пловидби на таласима

На левом дијаграму, на слици 7.24, дат је пораст отпора брода при пловидби прамцем ка таласима у зависности од висине таласа, у складу са оригиналним Креитнеровим изразом. На десном дијаграму, на истој слици, дати су резултати који су добијени применом приложене корекције и овде је показана промена додатног отпора у зависности од релативног правца простирања таласа и висине таласа (0.5, 1.0 и 1.5 метара).

Добијене вредности повећања отпора при пловидби прамцем насупрот таласима чине се нелогичним. Међутим, како овде није циљ детаљно истраживање утицаја таласа на повећање отпора, већ само груба процена реда величине овог утицаја, на основу добијених резултата може се закључити да би повећањем додатка за службу за 10% био покривен утицај таласа чија висина не прелази 1 метар.

7.4.7 Остали утицаји

• **Депласман брода** – Раније је речено да често није могуће утицати на оптерећење брода под којим се мерења апсорпције снаге спроводе, јер се мерења спроводе при комерцијалним пловидбама бродова уз оптерећења која су условљена захтевима тржишта, односно проценом бродовласника. Реализација мерења која подразумевају пловидбу брода при оптерећењу које је условљено потребама истраживања су за бродовласнике често нерентабилна. У таквим случајевима, применом одређених корекција измерене вредности апсорбоване снаге могу се прерачунати на услове који би одговарали жељеном депласману.

Према препоруци датој у документу *ISO-15016*, корекција отпора брода може се спровести применом следећег израза:

$$\Delta R_{DIS} = 0.65 \cdot R_{T1} \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_1} - 1 \right) \rightarrow R_T = R_{T1} + \Delta R_{DIS}$$

где су : ΔR_{DIS} – корекција отпора [kN]

R_{T1} – измерени отпор брода [kN]

Δ_0 – депласман за који се тражи отпор [t]

Δ_1 – депласман при коме је мерење обављено [t]

Директну корекцију измерене апсорбоване снаге, за случај жељеног депласмана брода, могуће је спровести и применом тзв. адмиралитетске константе из следеће релације:

$$AC = \frac{\Delta_1^{2/3} \cdot V^3}{P_1} = const. \rightarrow P = \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_1} \right)^{2/3} \cdot P_1$$

где су : AC – адмиралитетска константа

P_1 – измерена снага [kW]

Δ_0 – депласман за који се тражи снага [t]

Δ_1 – депласман при коме је мерење обављено [t]

• **Трим брода** – Трим брода у зависности од газа, брзине брода и дубине воде може значајно (и до 10%) утицати на отпор, а тиме и на потребну снагу за постизање захтеване брзине. Промена трима се одражава на:

1. Промену оквашене површине, што директно утиче на отпор трења,
2. Промену расподеле притиска дуж трупа брода, што се одражава на отпор таласа
3. Промену интеракције између трупа брода и пропелера

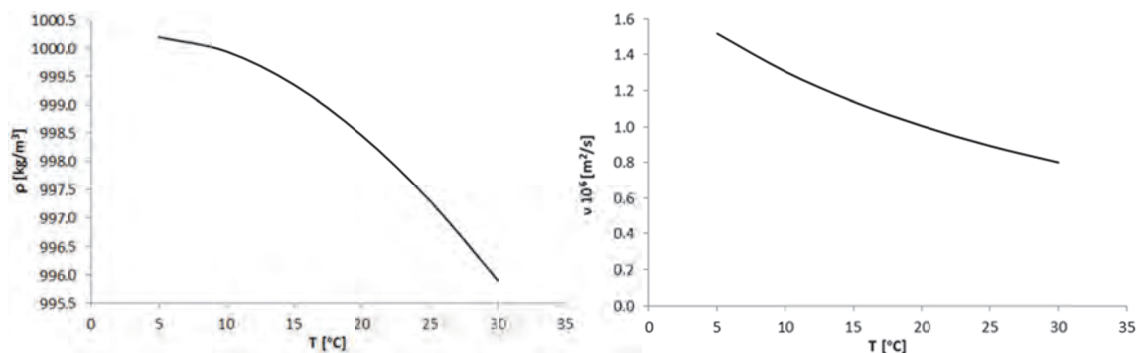
Услед чињенице да се форме бродова разликују, нарочито прамци и крме, не постоји једноставна приближна формула којом би било могуће проценити промену отпора брода при варијацијама трима. Ова зависност може се одредити експериментално – моделским испитивањима. У последње време, са широм применом *CFD*-а, рађена су испитивања утицаја промене трима на потрошњу горива и данас постоје комерцијални програмски пакети који су базирани на овим истраживањима. Један од таквих програма је *ECO-Assistant* чији је задатак да у зависности од стања оптерећења брода и жељене брзине одреди оптималан статички трим, а у циљу смањења потрошње горива.

• **Температура воде** – Од температуре воде зависе и густина и кинематска вискозност воде. У документу *ISO-15016* напоменуто је да и о овоме треба водити рачуна приликом анализе пропульзивних карактеристика брода и дати су обрасци помоћу којих се могу одредити поменуте карактеристике слатке воде у зависности од температуре (T):

$$\rho = g \cdot [1.019492 \cdot 10^2 + 5.503076 \cdot 10^{-3} \cdot T - 7.68434 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 3.611636 \cdot 10^{-6} \cdot T^3]$$

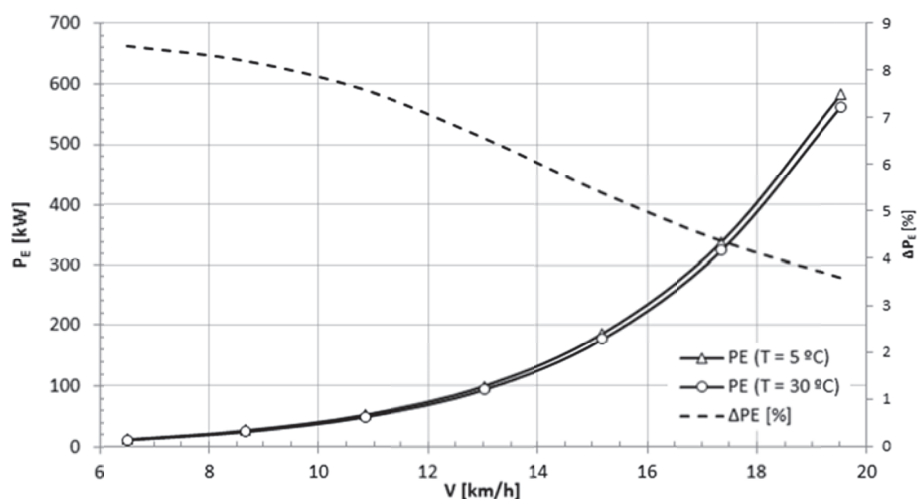
$$\nu = 1.78617 \cdot 10^{-6} - 6.071739 \cdot 10^{-8} \cdot T + 1.507093 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 - 2.552462 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 + 2.087519 \cdot 10^{-13} \cdot T^4$$

Дата зависност графички је представљена на слици 7.25.



Слика 7.25 – Зависност густине и кинематске вискозности слатке воде од температуре

Да би се боље сагледао ред величине утицаја температуре на отпор брода, применом методе Холтроп-Менен израчуната је ефективна снага брода 97 за две значајно различите температуре воде и добијени резултати су показани у прилогу 7, а закључак је дат на слици 7.26.



Слика 7.26 – Утицај температуре на ефективну снагу

Испрекиданом линијом на дијаграму датом на слици 7.26 представљена је разлика између ефективних снага изражена у процентима. Може се уочити да је утицај температуре израженији при мањим брзинама, што је и очекивано јер при мањим брзинама доминира трење. Добијене разлике у резултатима нису безначајне те би свакако приликом мерења апсорпције снаге и каснијој анализи резултата требало водити рачуна и о утицају температуре воде.

- **Брзина тока реке** – О мерењу брзине тока реке, односно мерењу брзине брода у односу на воду (релативне брзине брода) било је речи у поглављу 5.3. Тада је напоменуто да би најбоље било уколико би било могуће, помоћу неког од описаних уређаја, мерити брзину брода у односу на воду. Ово некада није могуће, те се прибегава мерењима апсорпције снаге при узводној и при низводној вожњи на истој деоници, те се за анализу резултата усваја средња постигнута брзина. На исти начин се, према препорукама датим у *ISO-15016*, спроводе мерења и на морским бродовима уколико постоји кретање воде (морске струје) у области где се мерења спроводе.

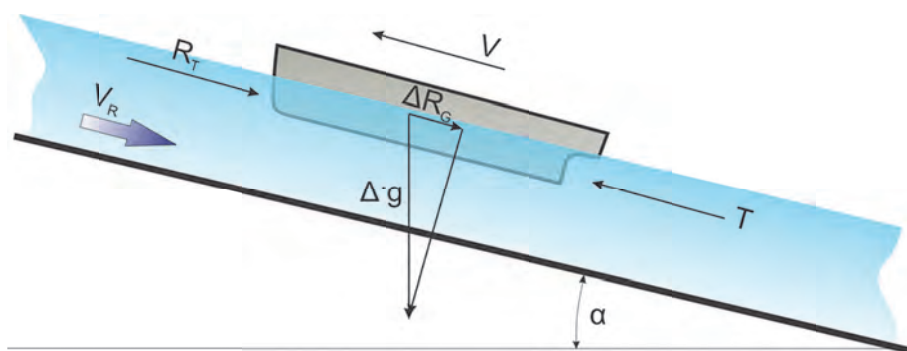
- **Утицај других бродова на истом пловном путу** – Брод у току пловидбе у великој мери утиче на поље притиска у води у својој околини. Као последица овога пловидба брода је праћена системом попречних и разилазних таласа. Осим тога, брод при кретању, услед вискозних појава, за собом вуче велику количину воде чија је маса реда величине депласмана брода.

Према томе, веома је важно да се приликом мерења апсорпције снаге брод на коме се мерења обављају не креће у близини другог брода, нарочито уколико је тај други брод већи. У противном, резултати мерења се не могу сматрати коректним јер садрже и значајан утицај другог брода.

Ово је некада тешко обезбедити на пловним путевима где је фреквенција саобраћаја велика, те се о томе мора водити рачуна.

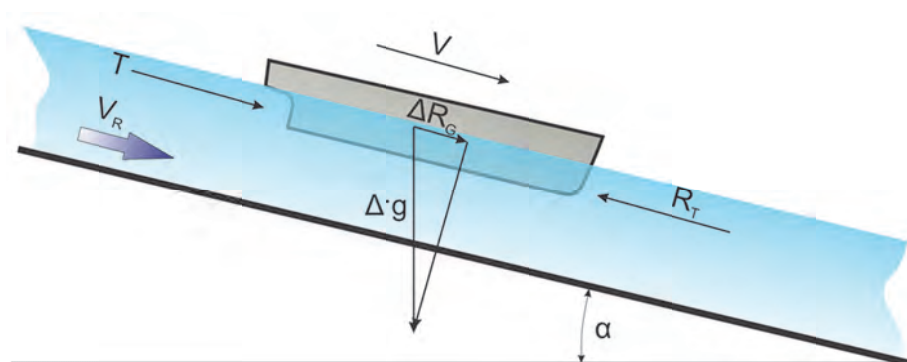
- **Гравитациони отпор** – У неким истраживањима отпора речних бродова узима се у обзир и висинска разлика коју брод савладава при пловидби.

При узводној пловидби услед висинске разлике, зависно од нагиба дна и тежине брода, додатно се повећава отпор.



Слика 7.27 – Повећање отпора при узводној пловидби

Насупрот томе, при низводној пловидби отпор се смањује.



Слика 7.28 – Смањење отпора при низводној пловидби

Овај ефекат је утолико израженији уколико је већа висинска разлика дуж пловног пута, коју брод савладава.

Примера ради, надморска висина Дунава код Новог Сада износи око 80 m, а у Кладову је око 60 m. Нови Сад се налази на око 1255 km од ушћа, док је Кладово око 935 km удаљено од ушћа Дунава у Црно море. То значи да је на укупној дистанци од 320 километара висинска разлика 20 метара, одакле проистиче да је просечан нагиб терена око 0.00358 степени. У случају брода 97, који при газу од 1.85 метара има депласман од 1535 тона, при пловидби између Новог Сада и Кладова средње повећање/смањење отпора услед утицаја гравитације износи око 0.95 kN. Овај додатни отпор не зависи од брзине брода па се према томе у

процентима изражено овај утицај креће између 1 и 15% отпора брода, у зависности од тога да ли се брод креће брзином од 6.5 или 19.5 km/h.

7.5 Додатак за службу

На основу свега што је изнето у овом поглављу, може се закључити да би повећање отпора речног самоходног теретног брода, који је израчунат на основу резултата моделских испитивања, требало да износи око 30 до 40%. Ово повећање – додатак за службу – код морских бродова се уобичајено креће између 10 и 25% (некада и 30%), у зависности од интензитета спољашњих утицаја који су карактеристични за подручје пловидбе брода. Ово не значи да ће брод моћи да одржи максималну брзину и при најнеповољнијим могућим условима, већ да ће имати довољно додатне снаге на располагању што му може помоћи да безбедно превазиђе неповољне околности. Осим тога, резерва снаге, без обзира на спољашње услове, у случају потребе може да олакша кормиларење брода и скрати зауставни пут при „кочењу“.

У табели 7.5 набројани су најзначајнији спољашњи утицаји који се могу очекивати при пловидби. На основу прелиминарних прорачуна дате су оквирне препоруке за повећање додатка за службу. Свака од датих величина је подложна дискусији и евентуалним корекцијама у зависности од нових сазнања која ће донети нека нова истраживања.

Табела 7.5 – Утицај најзначајнијих компоненти додатка за службу

Поремећај	Повећање отпора	
Ограничења пловног пута	посебан прорачун	
Утицај отклона кормила	5	%
Заношење брода	5	%
Храпавост оплате	5	%
Храпавост пропелера	10	%
Ветар	5	%
Таласи	10	%

7.6 Хидродинамичка ефикасност пропулзивног комплекса

Хидродинамичка ефикасност пропулзивног комплекса брода зависи пре свега од ефикасности самог пропелера, али и од начина на који брод и спољашњи услови утичу на његов ред.

Ефикасност пропелера зависи од више фактора, од којих су најзначајнији:

- тип пропелера,
- број крила,
- геометријске специфичности крила и главчине,

као и од оптерећења које пропелер, када се нађе иза брода, треба да савлада да би се брод кретао жељеном брзином. Уколико се са C_{th} означи коефицијент потиска пропелера:

$$C_{th} = T / \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot V_A^2 \right)$$

при чему је T потисак пропелера, D пречник пропелера, а V_A брзина којом вода дострујава пропелеру, тада се на основу теорије о промени количине кретања може показати да ефикасност идеалног пропелера од оптерећења зависи у складу са следећим изразом [38]:

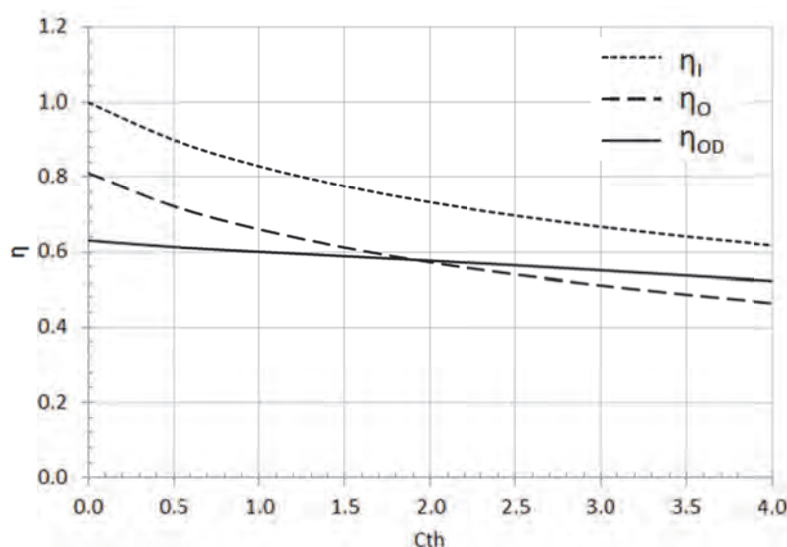
$$\eta_I = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_{th}}}$$

Дати израз изведен је уз извесне претпоставке које су уведене да би проблем могао бити аналитички решен, а које подразумевају:

- да пропелеру дотиче неограничена количина воде,
- да је убрзање воде узроковано радом пропелера равномерно распоређено по површини диска пропелера,
- да је сила потиска која је последица убрзања воде равномерно распоређена по површини диска пропелера,

- да пропелер својим радом може тренутно да утиче на поље притиска, односно да промена притиска узрокована радом пропелера на зависи од времена,
- треће је занемарено.

Није тешко уочити да чак и под оваквим - идеалним условима ефикасност тзв. идеалног пропелера опада са повећањем његовог оптерећења (видети слику 7.29).



Слика 7.29 – Промена ефикасности пропелера у зависности од коефицијента потиска

Ефикасност реалног пропелера (η_o), али без присуства брода испред пропелера, за око 20% је нижа од ефикасности идеалног пропелера [84].

Услед чињенице да су пропелери речних самохотки често веома оптерећени и да се пречник пропелера не може повећати због ограниченог газа брода, није редак случај да се за погон самохотки користе пропелери у сапницама. На тај начин се спречава преструјавање воде на врховима крила, а дострујавање воде пропелеру је равномерније, што повољно утиче на повећање ефикасности пропелера. Према [84], приближна зависност ефикасности пропелера у сапници (без присуства брода) од коефицијента потиска описана је следећим изразом:

$$\eta_{OD} = \eta_I \cdot (0.001 \cdot C_{th}^3 - 0.0185 \cdot C_{th}^2 + 0.112 \cdot C_{th} + 0.63)$$

Карактер промене ефикасности пропелера у сапници, у зависности од коефицијента потиска, приказан је на слици 7.29. Може се уочити да је при нижим оптерећењима ефикасност ових пропелера мања у односу на пропелере без сапница. Један од узрока је трење које се јавља на сапници. Уколико је сапница дужа, утолико је трење веће те су и губици већи. Међутим, при већим оптерећењима пропелера, позитиван ефекат сапнице долази до изражаја. Тада се утицај сапнице повољно одражава на ефикасност пропелера при раду. Што је пропелер више оптерећен то је разлика у ефикасности већа у корист пропелера у сапници.

Осим ефикасности пропелера, на ефикасност пропулзивног комплекса у значајној мери утиче форма крменог дела брода. Начин на који труп брод утиче на рад пропелера описан је у поглављу 3. Тада су сви хидродинамички утицаји дати тзв. „квази-пропулзивним“ коефицијентом, који се може одредити из следећег израза:

$$\eta_D = \eta_O \cdot \eta_R \cdot \eta_H = \eta_O \cdot \eta_R \cdot \frac{1 - t}{1 - w}$$

Уколико је на брод уграђен пропелер у сапници тада у претходном изразу уместо η_O треба да стоји η_{OD} .

Зависност између ефективне снаге, којој је у овом поглављу посвећена посебна пажња, и снаге на вратилу, односно предате снаге (видети скицу 3.4) која се одређује при мерењима апсорбоване снаге дата је следећом релацијом:

$$P_E = P_D \cdot \eta_D$$

Према томе, уколико би постојао начин да се одреди вредност квази-пропулзивног коефицијента, а што би подразумевало да се одреде све компоненте које га чине, тада би било могуће успоставити директну везу између ове две снаге. Међутим, иако је овакав пут при прорачунима уобичајен код морских бродова, јер постоје релативно поуздане препоруке за процену сваке од поменутих компоненти, код речних самохотки таквих препорука нема. Додатан проблем представља и чињеница да споменуте величине зависе и од ограничења пловног пута.

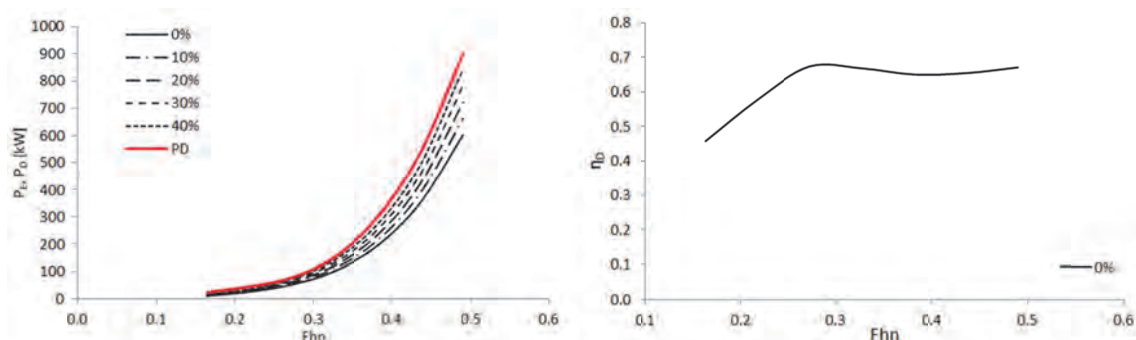
7.7 Процена вредности квази-пропулзивног коефицијента за одабране бродове

За бродове 97, 89 и 96, за које је (у овом поглављу) израчунат отпор, може се показати какве би се вредности коефицијента η_D добиле дељењем процењене ефективне снаге измереном предатом снагом. Како није познато под каквим околностима су испитивања ових бродова спроведена, односно не зна се колико су били изражени спољашњи утицаји, овде ће бити претпостављене вредности додатка за службу од 0%, 10%, 20%, 30% и 40%.

У случају брода 97 добијени су следећи резултати:

Табела 7.6 – Процена вредности коефицијента η_D брода 97

Fnh	[-]	0.16	0.22	0.27	0.33	0.38	0.44	0.49
V	[m/s]	1.81	2.41	3.01	3.62	4.22	4.82	5.42
V	[km/h]	6.51	8.68	10.85	13.02	15.19	17.35	19.52
R_{TAP}	[kN]	6.18	10.75	17.37	27.97	45.35	72.33	111.17
$P_{EAP}^{(0\%)}$	[kW]	11.17	25.91	52.32	101.14	191.30	348.70	602.90
$P_{EAP}^{(10\%)}$	[kW]	12.28	28.50	57.56	111.25	210.43	383.57	663.19
$P_{EAP}^{(20\%)}$	[kW]	13.40	31.09	62.79	121.36	229.56	418.44	723.48
$P_{EAP}^{(30\%)}$	[kW]	14.52	33.68	68.02	131.48	248.69	453.31	783.77
$P_{EAP}^{(40\%)}$	[kW]	15.63	36.27	73.25	141.59	267.82	488.18	844.07
P_D	[kW]	24.42	44.86	77.75	151.43	294.29	533.34	899.05
$\eta_D^{(0\%)}$	[-]	0.457	0.578	0.673	0.668	0.650	0.654	0.671
$\eta_D^{(10\%)}$	[-]	0.503	0.635	0.740	0.735	0.715	0.719	0.738
$\eta_D^{(20\%)}$	[-]	0.549	0.693	0.808	0.801	0.780	0.785	0.805
$\eta_D^{(30\%)}$	[-]	0.595	0.751	0.875	0.868	0.845	0.850	0.872
$\eta_D^{(40\%)}$	[-]	0.640	0.809	0.942	0.935	0.910	0.915	0.939



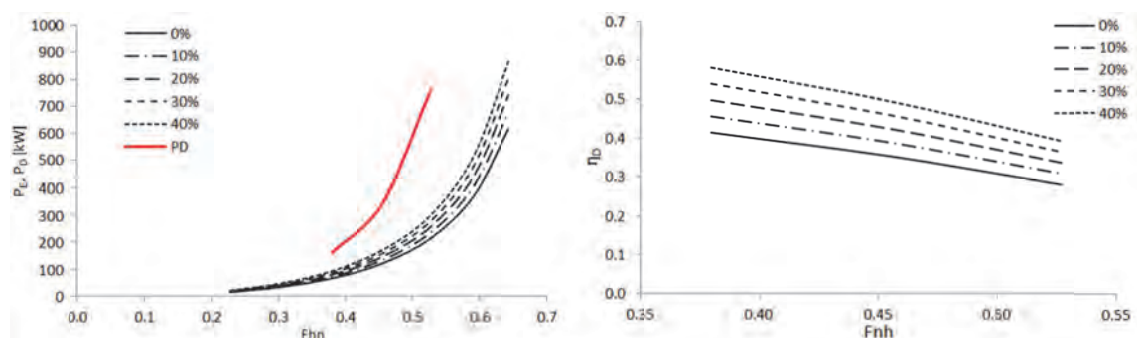
Слика 7.30 – Брод 97 - промена предате снаге и ефективне снаге у зависности од Fnh при различитим вредностима додатка за службу (лево); промена процењене вредности квази-пропулзивног коефицијента у зависности од Fnh

Овде се треба присетити да је мерење апсорпције снаге брода 97 обављено у време када је брод био нов и да су околности за испитивања биле повољне, те да има смисла претпоставити да спољашњи фактори, који би могли неповољно утицати на отпор, нису били изражени. Да је то тако може се видети и из добијених резултата. Са повећањем ефективне снаге, што би било последица евентуалних спољашњих утицаја, добијају се све веће вредности коефицијента η_D , које излазе из оквира реалних вредности (црвена поља у табели 7.6).

У случају брода 89 добијени су следећи резултати:

Табела 7.7 – Процена вредности коефицијента η_D брода 98

Fnh	[-]	0.23	0.30	0.38	0.46	0.53	0.59	0.64
$V_{Lakenbi}$	[m/s]	1.60	2.13	2.66	3.19	3.69	4.14	4.50
$V_{Lakenbi}$	[km/h]	5.75	7.66	9.58	11.47	13.29	14.89	16.19
R_{TAP}	[kN]	9.29	16.02	24.97	37.83	57.92	89.59	137.34
$P_{EAP}^{(0\%)}$	[kW]	14.83	34.09	66.41	120.58	213.77	370.63	617.69
$P_{EAP}^{(10\%)}$	[kW]	16.31	37.50	73.05	132.64	235.15	407.69	679.46
$P_{EAP}^{(20\%)}$	[kW]	17.80	40.91	79.69	144.70	256.52	444.75	741.23
$P_{EAP}^{(30\%)}$	[kW]	19.28	44.32	86.33	156.76	277.90	481.81	803.00
$P_{EAP}^{(40\%)}$	[kW]	20.76	47.72	92.97	168.82	299.28	518.88	864.77
P_D	[kW]	-	-	160.01	341.21	762.20	-	-
$\eta_D^{(0\%)}$	[-]	-	-	0.415	0.353	0.280	-	-
$\eta_D^{(10\%)}$	[-]	-	-	0.457	0.389	0.309	-	-
$\eta_D^{(20\%)}$	[-]	-	-	0.498	0.424	0.337	-	-
$\eta_D^{(30\%)}$	[-]	-	-	0.540	0.459	0.365	-	-
$\eta_D^{(40\%)}$	[-]	-	-	0.581	0.495	0.393	-	-



Слика 7.31 – Брод 89 - промена предате снаге и ефективне снаге у зависности од Fnh при различитим вредностима додатка за службу (лево); промена процењене вредности квази-пропулзивног коефицијента у зависности од Fnh

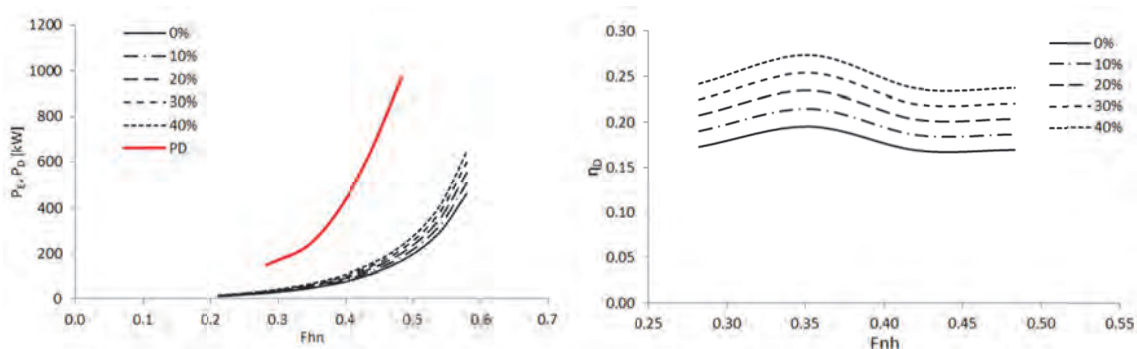
Једино што се зна о условима под којима је мерење апсорпције снаге брода 89 обављено је да је дубина воде била ограничена на 5 метара. Добијене вредности η_D нису нереалне па је тешко из резултата проценити да ли је било додатних спољашњих утицаја.

У случају брода 89 добијени су следећи резултати:

Табела 7.8 – Процена вредности коефицијента η_D брода 96

Fnh	[-]	0.21	0.28	0.35	0.42	0.48	0.54	0.58
$V_{Landveber}$	[m/s]	1.32	1.77	2.21	2.63	3.02	3.36	3.62
$V_{Landveber}$	[km/h]	4.77	6.36	7.95	9.48	10.89	12.10	13.04
R_{TAP}	[kN]	8.20	14.19	22.44	34.83	54.31	84.22	127.44
$P_{EAP}^{(0\%)}$	[kW]	10.86	25.07	49.53	91.68	164.26	283.01	461.72
$P_{EAP}^{(10\%)}$	[kW]	11.94	27.58	54.49	100.85	180.69	311.32	507.89
$P_{EAP}^{(20\%)}$	[kW]	13.03	30.09	59.44	110.02	197.12	339.62	554.06
$P_{EAP}^{(30\%)}$	[kW]	14.11	32.59	64.39	119.19	213.54	367.92	600.24
$P_{EAP}^{(40\%)}$	[kW]	15.20	35.10	69.35	128.36	229.97	396.22	646.41
P_D	[kW]	-	144.82	253.21	541.69	967.06	-	-
$\eta_D^{(0\%)}$	[-]	-	0.173	0.196	0.169	0.170	-	-
$\eta_D^{(10\%)}$	[-]	-	0.190	0.215	0.186	0.187	-	-
$\eta_D^{(20\%)}$	[-]	-	0.208	0.235	0.203	0.204	-	-
$\eta_D^{(30\%)}$	[-]	-	0.225	0.254	0.220	0.221	-	-
$\eta_D^{(40\%)}$	[-]	-	0.242	0.274	0.237	0.238	-	-

Брод 96 испитиван је на веома ограниченом пловном путу, у каналу ширине 55 метара и при дубини воде од 4 метра. Ово може бити разлог изузетно ниских вредности коефицијента η_D које су добијене.



Слика 7.32 – Брод 96 - промена предате снаге и ефективне снаге у зависности од F_{nh} при различитим вредностима додатка за службу (лево); промена процењене вредности квази-пропулзивног коефицијента у зависности од F_{nh}

7.8 Предлог поступка за одређивање коефицијената пропулзије на основу испитивања бродова у природној величини

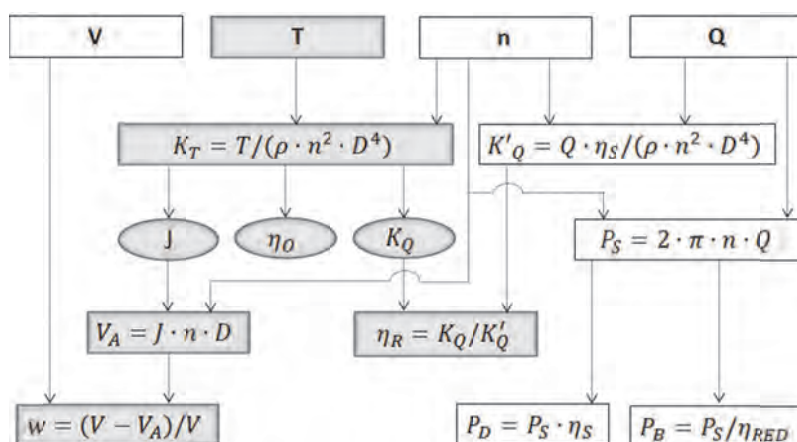
Приликом спровођења мерења апсорпције снаге, обично се мери:

- број обртаја мотора, односно пропелера,
- брзина којом се брод креће у односу на воду и
- обртни момент који преноси вратило.

На основу ових величина није могуће проценити вредности коефицијената пропулзије (w , t , η_O и η_R). Метода идентификације, која би подразумевала да се поједине вредности претпоставе како би се друге израчунале, да би се на основу добијених вредности могла проценити оправданост уведених претпоставки, у овом случају не може се применити. Ово је закључено на основу већег броја покушаја. Разлог је тај што је потребно претпоставити бар три величине да би се одредила четврта, а што оставља сувише велики број могућности које би требало испитати. При томе, на основу добијених резултата, многе претпостављене комбинације вредности коефицијената пропулзије се не могу недвосмислено одбацити као физички нереалне. Према томе, намеће се потреба за другачијим приступом.

Могуће решење проблема лежи у мерењу додатних величина при испитивању апсорпције снаге. У току мерења обртног момента, који вратило преноси у различитим режимима рада мотора, требало би мерити и потисак који пропелер остварује. Ово би подразумевало монтажу још једне мерне тракице - сензора на вратило под углом од 45° у односу на мерну тракицу која мери обртни момент. Тиме би се обезбедило да активни мерни елементи овог сензора буду постављени дуж вратила, те би се свака промена дужине вратила, која је последица деловања подужне силе, могла регистровати мерном опремом. Уколико је на броду уграђен пропелер у сапници требало би узети у обзир и додатни потисак који даје сапница. Мерење потиска, уз остале поменуте вредности, применом поступка које је описан на слици 7.33 омогућило би да се директно израчуна степен корисног

дејства пропелера (η_O), коефицијент ефективног суструјања (w), и коефицијент прелаза (η_R).



Слика 7.33 – Препоручени поступак за одређивање коефицијената пропулзије

У шеми датој на слици 7.33 описан је поступак којим би било могуће одредити коефицијенте пропулзије из испитивања брода у природној величини. Описани поступак би подразумевао да су подаци са испитивања пропелера у слободној вожњи на располагању, одакле би се за познате вредности коефицијента потиска и корака пропелера могле очитати вредности:

- коефицијента напредовања пропелера,
- степен корисног дејства пропелера у слободној вожњи и
- коефицијент обртног момента пропелера у слободној вожњи.

Ове величине у шеми су дате у овалним пољима. Неосенчена поља представљају величине које су и до сада мерене, односно величине које је могуће израчунати на основу измерених вредности.

Мерењем потиска, према свему изнетом, може се доста добити, међутим отвара се ново питање – како измерити потисак пропелера са довољном тачношћу. Нарочито у случају пропелерских вратила великог пречника поузданост мерења потиска применом мерних трака може бити спорна. У овом раду, проблеми везани за мерења потиска на броду у природној величини нису детаљније разматрани. Ова тема је остављена за будућа истраживања.

8

Енергетска ефикасност речних самоходних теретних бродова

8.1 Предлог препорука за утврђивање критеријума неопходних за одређивање EEDI

Иако се већ пуне четири године, на међународном нивоу, интензивно ради на развоју и унапређењу индекса енергетске ефикасности (*EEDI* и *EEOI*) морских бродова, као и на утврђивању критеријума за оцену бродова у том смислу, нема значајних помака у примени истих поступака када је о речним теретним бродовима реч. Стручна јавност је сагласна да постоји потреба да се дефинишу допунски критеријуми који би енергетској ефикасности самохотки дали већи значај, како при пројектовању тако и при експлоатацији ових бродова. Ипак помаци у том смислу су више него скромни. Разлози за овакво тренутно стање се огледају у:

- недефинисаним условима за које би овакав показатељ био развијен,

- недостатку података за довољно велики број бродова, на основу којих би било могуће успоставити критеријуме и
- оспоравању, односно критици метода које се користе на морским бродовима.

Код морских бродова, према [34], за одређивање индекса енергетске ефикасности (*EEDI*) усваја се 75% снаге мотора као и брзина коју је могуће постићи уз наведено оптерећење мотора. У ранијим поглављима је показано у којој мери услови при којима речне самохотке плове, у реалним околностима, могу утицати на снагу коју је потребно ангажовати за постизање одређене брзине. Како *EEDI* непосредно зависи од ангажоване снаге и постигнуте брзине отвара се питање која снага, односно брзина, би биле меродавне. Осим тога, у речне самохотке се често уграђују мотори који располажу са више снаге (но што је потребно за постизање жељене брзине брода) чиме се омогућава вуча још једне или више додатних баржи, као и скраћење зауставног пута, односно побољшање маневарских карактеристика. Према томе, примена препорука које важе за морске бродове не би била сврсисходна.

Имајући у виду горе споменуто, чини се да би највише имало смисла, при дефинисању индекса енергетске ефикасности речних самохотки, критеријуме успоставити на основу реалних снага мотора које је потребно ангажовати за постизање одређених брзина у условима при којима су спољашњи утицаји занемарљиво мали. На тај начин би различите бродове било могуће међусобно поредити, а било би могуће анализирати и утицај промена појединих параметара брода на енергетску ефикасност.

8.2 Израчунавање индекса енергетске ефикасности – нумерички пример

Описани услови највише би одговарали моделским испитивањима бродова на неограниченом пловном путу.

Према томе, овде ће за неколико произвољно изабраних бродова из расположиве базе, у циљу наговештаја начина на који би било могуће проценити вредности индекса енергетске ефикасности речних самохотки, бити дати резултати који су добијени:

- применом развијеног математичког модела,
- применом метода које су разматране у поглављу 7.

При избору бродова вођено је рачуна да носивости покрију што шири опсег, а да су при томе на располагању или да се могу проценити сви потребни подаци. Тако је усвојена следећа група бродова:

Табела 8.1 – Разматрани бродови

R.B.	Lvl [m]	Bvl [m]	T [m]	∇ [m ³]	S [m ²]	h [m]	b [m]	D [m]	Broj propelera	DWT [t]	W [t]
36	67	8.2	2.5	1209	807.4	5	400	1.5	1	909	300
97	92.54	11.05	1.85	1535	1228.4	12.50	400	1.60	2	925	610
96	103.19	11.00	2.50	2520	1500.6	4.00	55	1.60	1	1840	680
89	104.22	10.95	3.22	3289	1664.6	5.00	400	1.80	1	2593	680
97*	92.54	11.05	2.70	2410	1394.9	-	-	1.6	2	1800	610

Намера је била да се ова листа прошири испитивањима бродова која имају и веће носивости и који су наведени у следећој табели, међутим није било могуће довољно тачно проценити тежине ових бродова. Брод 97 (табела 8.1) разматран је за два газа: 1.85 метара, за шта постоје испитивања снаге, и на 2.70 метара што му је пројектовани газ (случај 97*), али за шта нема испитивања.

Табела 8.2 – Бродови који услед недовољно података нису ушли у анализу

R.B.	Lvl [m]	Bvl [m]	T [m]	∇ [m ³]	S [m ²]	h [m]	b [m]	D [m]	Broj propelera	DWT [t]	W [t]
11	109.74	14.00	3.50	4600	2133.0	18.00	-	1.85	2	-	-
26	139.45	14.00	3.00	5119	2626.6	5.00	-	1.85	2	-	-
16	109.46	22.40	3.50	6930	3123.9	5.00	-	1.91	3	-	-

8.2.1 Процена вредности снаге применом развијеног математичког модела

Бродови чије су димензије дате у табели 8.1 испитивани су под различитим околностима и при различитим спољашњим утицајима. Примера ради, дубине

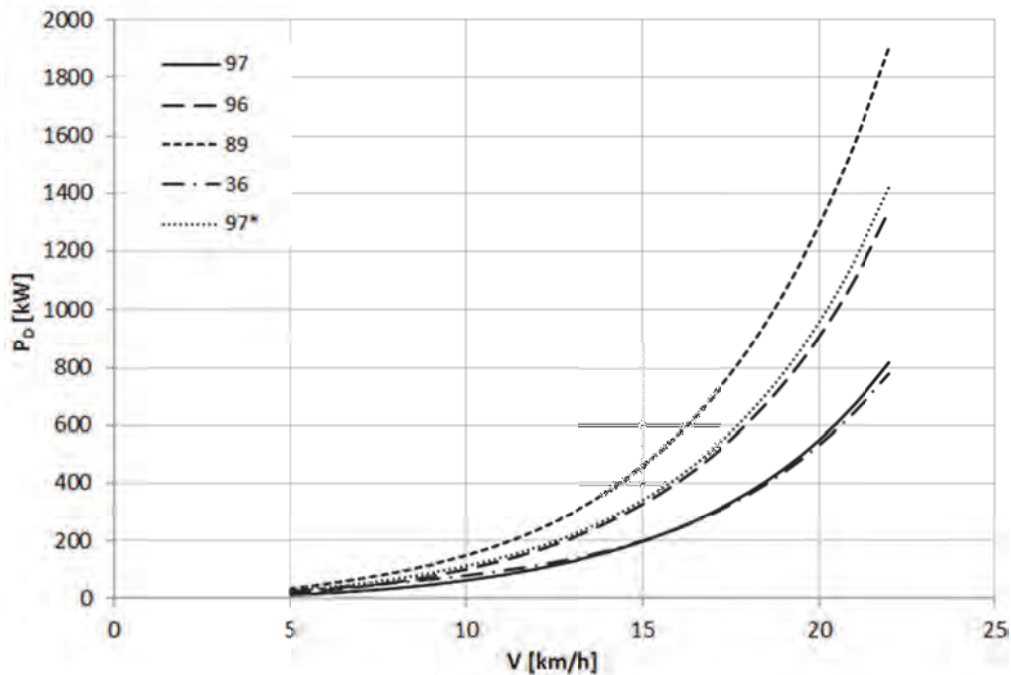
пловног пута су се кретале између 4 и 12.5 метара. Да би сви резултати испитивања били доведени у „исту равн“ потребно је ове спољашње утицаје одстранити. Математички модел, који је развијен и објашњен у поглављу 6, погодан је за овакав прорачун, јер пружа могућност контроле утицаја ограничења пловног пута, док су остали спољашњи утицаји елиминисани тиме што је развијен на основу моделских испитивања. Иначе, треба напоменути да ни један од овде разматраних бродова није коришћен при развоју модела.

Применом математичког модела за процену потребне снаге при различитим брзинама разматраних бродова, а без спољашњих утицаја, добијени су следећи резултати:

Табела 8.3 – Зависност предате снаге од брзине разматраних бродова

Случај	36	97	96	89	97*
V [km/h]	P ₀ [kW]				
5	25.36	12.33	18.29	34.71	26.22
6	34.57	18.72	28.61	50.51	38.33
7	44.47	26.71	41.54	69.16	52.55
8	55.17	36.59	57.56	91.32	69.33
9	66.98	48.69	77.29	117.95	89.32
10	80.38	63.43	101.50	150.27	113.38
11	96.04	81.33	131.06	189.77	142.57
12	114.77	102.96	167.02	238.20	178.18
13	137.54	129.04	210.61	297.62	221.71
14	165.49	160.47	263.29	370.41	274.97
15	199.95	198.34	326.86	459.41	340.12
16	242.47	244.07	403.49	567.96	419.77
17	294.83	299.44	495.91	700.06	517.08
18	359.06	366.73	607.51	860.44	635.83
19	437.38	448.72	742.45	1054.66	780.49
20	532.11	548.72	905.64	1288.98	956.07
21	645.40	670.34	1102.61	1570.03	1167.78
22	778.88	817.15	1339.05	1904.09	1420.34

Добијени резултати графички су приказани на слици 8.1.



Слика 8.1 – Зависност предате снаге од брзине разматраних бродова

8.2.2 Процена вредности снаге на основу прорачуна отпора брода

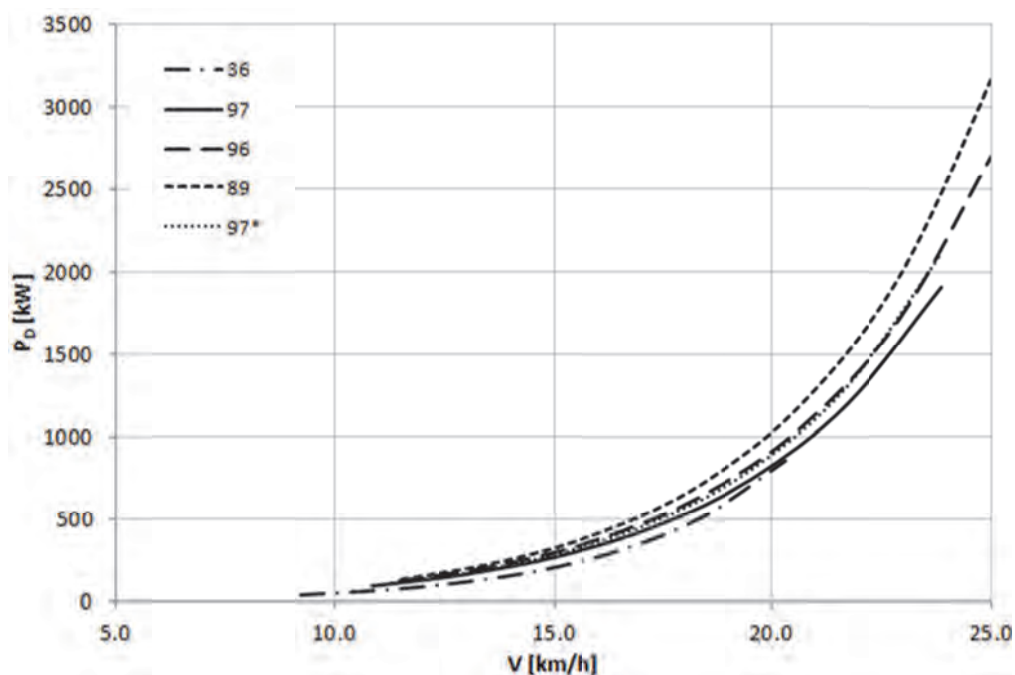
У поглављу 7 показано је да се за процену зависности отпора од брзине уобичајених речних самохотки могу користити методе Гулдхамер-Харвалд и Холтроп-Менен, иако нису развијене за речне бродове. Осим тога, поређењем вредности ефективне снаге која је одређена поменутих метода са резултатима мерења предате снаге, који су добијени при испитивању 97 које је обављено без изражених спољашњих утицаја, добијена је вредност квазипропулзивног коефицијента од око 0.65. Како при прорачунима који су овде спроведени спољашњих утицаја, а пре свега ограничења пловног пута, такође нема усвојена је иста вредност овог коефицијента. Ово је релативно груба претпоставка, али је у недостатку тачнијих вредности за потребе овог прорачуна прихватљива.

На тај начин добијени су следећи резултати:

Табела 8.4 – Зависност предате снаге од брзине разматраних бродова

Случај 36	V	[km/h]	9.2	11.1	12.9	14.8	16.6	18.5	20.3
	P _E	[kW]	23	42	73	123	205	338	557
	P ₀	[kW]	36	65	113	190	315	520	857
Случај 97	V	[km/h]	10.8	13.0	15.2	17.4	19.5	21.7	23.9
	P _E	[kW]	58	105	180	297	483	777	1242
	P ₀	[kW]	90	162	277	457	743	1195	1911
Случај 96	V	[km/h]	11.5	13.7	16.0	18.3	20.6	22.9	25.2
	P _E	[kW]	77	141	244	411	681	1117	1820
	P ₀	[kW]	119	217	376	633	1048	1719	2800
Случај 89	V	[km/h]	11.5	13.8	16.1	18.4	20.7	23.0	25.3
	P _E	[kW]	85	156	274	468	789	1317	2187
	P ₀	[kW]	130	240	421	720	1213	2027	3365
Случај 97*	V	[km/h]	10.8	13.0	15.2	17.4	19.5	21.7	23.9
	P _E	[kW]	62	111	191	318	521	847	1373
	P ₀	[kW]	95	172	294	489	802	1303	2113

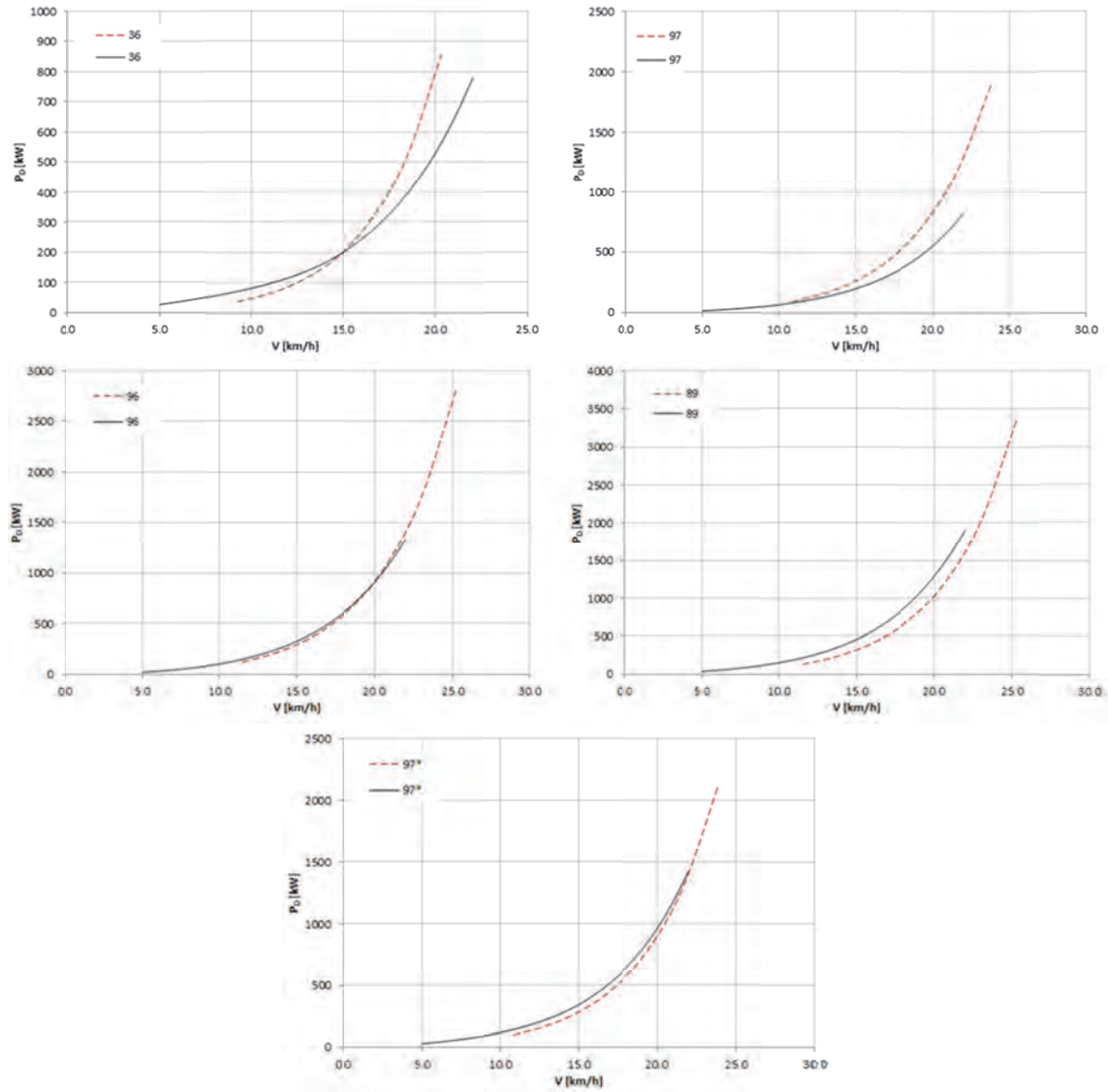
Добијени резултати су графички дати на следећој слици:



Слика 8.2 – Зависност предате снаге од брзине разматраних бродова

8.2.3 Поређење резултата

Поређење резултата који су добијени применом коришћених метода приказано је на следећој слици:



Слика 8.3 – Поређење резултата добијених применом коришћених метода

Испрекиданим линијама су представљени резултати који су добијени на основу прорачуна отпора бродова, док пуне линије представљају резултате добијене применом математичког модела. На прва два дијаграма (случајеви 36 и 97) уочљива су већа одступања, док су у осталим разматраним случајевима слагања добијених резултата веома добра. Могуће објашњење већих одступања у

случајевима 36 и 97 треба тражити у димензијама и оптерећењу ових бродова. Мањи брод (36) је због својих димензија сасвим сигурно изван прихватљивих граница за примену коришћених метода за прорачун отпора. У случају већег брода (97), који је иначе пројектован да плови на газу који је за скоро 1 метар већи од анализираног, проблематична је применљивост математичког модела. Мало је вероватно да је приликом моделских испитивања разматран случај пловидбе брода при таквим околностима. Према томе, могло би се претпоставити да су у случају брода 36 добијени бољи резултати применом математичког модела, док су у случају брода 97 поузданији резултати добијени прорачуном отпора брода.

8.2.4 Процена вредности индекса енергетске ефикасности речних самоходних теретних бродова

Као што је речено у поглављу 3, индекс енергетске ефикасности представља однос количине емитованог угљен-диоксида у атмосферу или цене која је плаћена у еколошком смислу и количине терета која је при томе превезена, односно добити која је остварена:

$$EEDI = \frac{P_B \cdot SCF \cdot C_F}{K \cdot V_{ref}} \left[\frac{g \text{ CO}_2}{t \cdot km} \right]$$

Према томе, овај показатељ непосредно зависи од:

- брзине брода,
- снаге мотора која је ангажована за постизање ове брзине,
- носивости брода,
- потрошње горива и
- врсте горива.

Како брзине за које су пројектовани разматрани бродови нису познате одлучено је да анализа буде спроведена за опсег брзина између 16 и 22 km/h. Овај опсег је одабран на основу уобичајених брзина којима самохотке плове (уколико нема

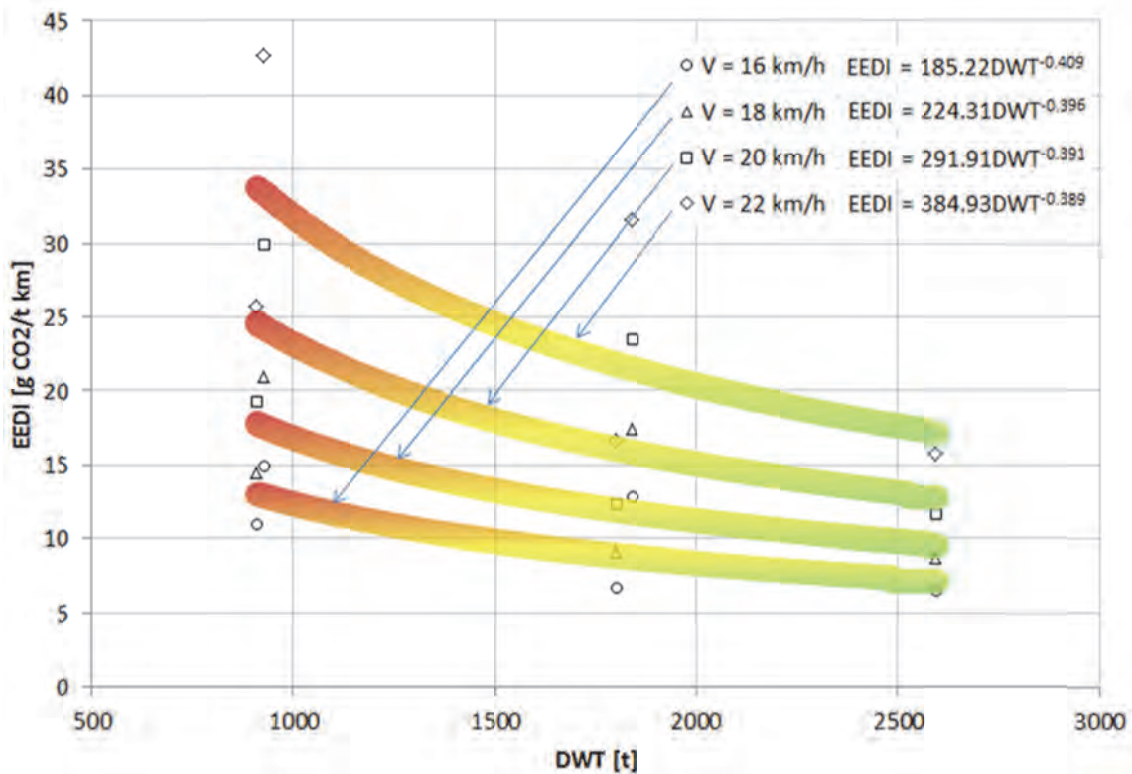
ограничавајућих фактора). При одређивању одговарајућих снага мотора, усвојени су губици у редукторима и вратилима од укупно 5%. За погон главних мотора, чија просечна потрошња износи око 200 g/kWh, усвојено је најчешће коришћено дизел гориво, чији специфични коефицијент емисије CO₂ износи 3.206 t CO₂/t горива (видети табелу 3.1).

На описани начин добијени су следећи резултати:

Табела 8.5 – Израчунате вредности индекса енергетске ефикасности за разматране бродове

Брод	V [km/h]	16.0	18.0	20.0	22.0
36	P _D [kW]	242	359	532	779
97		244	367	549	817
96		568	860	1289	1904
89		403	608	906	1339
97*		420	636	956	1420
36	P _B [kW]	255	377	559	818
97		256	385	576	858
96		596	903	1353	1999
89		424	638	951	1406
97*		441	668	1004	1491
36	EEDI [g CO ₂ /t·km]	11.0	14.5	19.3	25.7
97		15.0	21.0	30.0	42.7
96		13.0	17.5	23.5	31.6
89		6.5	8.7	11.7	15.8
97*		6.8	9.2	12.4	16.7

Добијене вредности графички су представљене у дијаграму датом на слици 8.4.



Слика 8.4 – Индекс енергетске ефикасности разматраних самохотки

Из добијених резултата може се закључити:

- Описани поступак за оцену енергетске ефикасности, који се иначе користи код морских бродова, се може применити на речне бродове.
- Као што се могло и очекивати са повећањем носивости бродова *EEDI* има ниже вредности – бродови су ефикаснији.
- Потврђена су ранија искуства (са морских бродова) да су расипања добијених вредности утолико већа уколико су бродови мањи.
- Уз сваку разматрану брзину дат се и приближан израз за зависност *EEDI* од носивости брода у облику какав је уобичајен код морских бродова. Дате једначине су изведене на основу малог броја бродова те их тако треба и тумачити. Потребно је далеко више података, који се односе пре свега на новије бродове, да би се добиле референтне (*baseline*) криве које би могле бити коришћене као критеријуми за оцену енергетске ефикасности нових самохотки.
- Од изабраних бродова најлошијим се показао испитани случај 97. Ово се могло и очекивати имајући у виду да је испитивање обављено при свега

50% оптерећења брода. Да брод није неефикасан указују вредности које су добијене у случају 97* где је анализирана ефикасност истог брода али на пројектованом газу.

Даљи рад на успостављању реалних критеријума за оцену енергетске ефикасности речних бродова би подразумевао проширење базе података, тј. додавање што је могуће већег броја речних самоходних теретних бродова, по могућности новијих, у анализу. Тако би се дошло до поузданијих критеријума који би могли бити коришћени при пројектовању нових бродова овог типа.

Током времена, са даљим унапређењем погонских агрегата, са применом нових технологија и квалитетнијих погонских горива, може се очекивати снижавање референтних кривих – поштравање критеријума. Ово би, дугорочно гледано, имало позитивне ефекте и на еколошке и на економске параметре који се односе на транспорт робе унутрашњим пловним путевима.

9

Закључне напомене и смернице за будућа истраживања

9.1 Закључне напомене

Резултати изнети у овом раду су проистекли из вишегодишњег истраживања проблема везаних за погон речних самоходних теретних бодова.

Рад је подељен у девет поглавља од којих прва четири, на известан начин, представљају увод у коме је:

- описана улога речних самоходки у савременом транспорту у Европи,
- описани су укратко пловни путеви Европе и њихови потенцијали,
- показани су најчешћи типови речних самоходки и на известан начин је приказана еволуција ових бродова у протеклих педесетак година,
- дате су основе бродске хидродинамике које се односе на отпор и пропулзију ових бродова,

- указано је на показатеље енергетске ефикасности који се примењују код морских бродова, чиме је наговештен даљи пут у истраживању,
- и коначно, на основу свих резултата мерења апсорпције снаге до којих је било могуће доћи је оформљена база која је послужила као полазна основа за даља истраживања.

Значај првог дела рада се огледа у ближем упознавању са овим типом бродова - речним самохоткама, специфичним околностима при којим најчешће плове одакле проистичу и проблеми при погону ових бродова. Препознавање проблема увек је први корак у њиховом решавању.

У оквиру овог дела истраживања, приказане су и међусобне зависности између основних димензија расположивих бродова и дате су препоруке (добијене на бази статистике) које се могу користити при пројектовању речних самохотки.

Свако наредно поглавље посвећено је настојањима да се дође до конкретних одговора који треба да расветле поједине проблеме и представља својеврстан допринос овог рада.

Велике разлике у резултатима мерења сличних или истих бродова, које су констатоване приликом формирања базе са резултатима мерења, а што је у почетку представљало велики проблем, делимично су постале јасније након спровођења низа непосредних експеримената – мерења на реалним бродовима у реалним околностима. За потребе овог сегмента истраживања, у сарадњи са домаћом фирмом „*Electronic Design*“, развијена је сасвим нова телеметријска опрема, као и пратећи рачунарски програм за мерење обртног момента на вратилу и анализу резултата. У лабораторијским условима, спроведено је тестирање опреме, при чему је посебна пажња посвећена калибрацији мерног сензора и могућим изворима грешака при мерењима. Закључено је да резултати мерења апсорпције снаге у реалним условима у великој мери зависе од околности под којима су мерења спроведена и да је веома важно да се током мерења прати читав низ могућих „поремећаја“ што је неопходно за каснију анализу резултата. У

подацима који су били доступни у разним извештајима, на основу којих је формирана база са резултатима испитивања, нису били регистровани спољашњи утицаји у току мерења, али ни стање оплате брода и пропелера, што је анализу измерених разлика значајно компликовало.

Важан део истраживања представља математички модел за процену зависности потребне снаге од брзине брода, у функција од основних димензија брода и ограничења пловног пута, који је развијен на основу расположивих резултата моделских испитивања (укупно 63 испитивања са преко 600 измерених вредности). Одлучено је да при развоју математичког модела резултати испитивања бродова у природној величини, који су били на располагању, а који у себи садрже и спољашње утицаје (који су непознати), не буду коришћени. Овакав приступ је имао за циљ развој модела:

- чијом употребом се може искључити потреба за спровођењем моделских испитивања бродова чије су форме и димензије сличне разматраним бродовима,
- који се може користити за поређење различитих бродова, а да при томе спољашњи утицаји не утичу на закључке,
- који може да послужи за одређивање тзв. додатка за службу за речне самохотке чиме би били компензовани уобичајени умерени спољашњи утицаји, што је важно при избору пропульзивног комплекса брода,
- који се може користити за процену утицаја ограничења пловног пута на снагу која је неопходна за постизање одређене брзине, чиме је осим утицаја на отпор обухваћен и утицај на коефицијенте пропульзије и
- који се може користити за процену вредности индекса енергетске ефикасности речних самохотки.

При развоју математичког модела коришћена је метода вештачких неуронских мрежа (*ANN*). Закључено је да се ова метода може успешно користити за развој математичких модела – инжењерских алата у области бродоградње, али да је „тежа за контролу“ од уобичајене регресионе анализе и да је, у том смислу, провери математичке стабилности потребно посветити више пажње.

Како је спроведено истраживање указало на значајан утицај спољашњих фактора при којима самохотке плове, као и велики утицај стања брода и кормиларења, овоме је у раду посвећена посебна пажња. Применом разних метода које се данас углавном користе за одређивање појединих утицаја код морских бродова, а чију применљивост на речне самотоке би свакако требало додатно истражити, процењени су поједини утицаји. Одавде су проистекле препоруке које су у раду дате, а које се односе на:

- процену додатка за службу,
- процену вредности појединих коефицијената пропулзије (коефицијента прелаза, коефицијента суструјања и квазипропулзивног коефицијента).

Коначно, наговештен је и пут којим би било могуће одредити индекс енергетске ефикасности и успоставити референтне криве за речне самоходне теретне бродове.

9.2 Смернице за будућа истраживања

Истраживање које је спроведено у овом раду је отворило бројна питања, али и наговестило неке од одговора. Основни проблем, који је био присутан све време истраживања и који неке од изведених закључака оставља отвореним за дискусију, огледа се у недовољном броју мерења. У том смислу, у даљем раду би се требало осврнути на:

- додатна мерења апсорпције снаге, што би обезбедило равномернију покривеност и побољшање математичког модела уз истовремено проширење граница за примену модела,
- проверу метода које су коришћене за процену спољашњих утицаја и њихове применљивости на речне самохотке,
- мерење потиска пропелера и унапређење препоручених поступака за одређивање коефицијената пропулзије при пловидби брода ограниченим пловним путевима,

- прорачуне вредности индекса енергетске ефикасности за већи број бродова и побољшање датих референтних кривих,
- проверу утицаја ограничења пловног пута, али и других утицаја на енергетску ефикасност речних самоходних теретних бродова,
- и на крају, кроз обједињење свега набројаног, успостављање модела за оптимизацију транспорта у зависности од димензија брода, количине терета који се транспортује и специфичних околности којима је брод у пловидби изложен.

Литература

1. Peters, W., J., „1D - Method to describe the effects of a lowered riverbed on the navigability of the river Elbe“, Research report, Water Engineering & Management, Faculty of Engineering Technology, University Twente, 2005.
2. SPIN – Rhine, Version 1 – „Innovative Types of Inland Ships and their Use on the River Rhine, its Tributaries and the Adjacent Canals“ by Mueller, E., VBD, Duisburg, 2003.
3. SPIN – Working Paper, „Innovative Transport Vehicles on the Danube and its Tributaries“, by Radojicic, D., DPC, Belgrade, 2004.
4. Schweighofer, J., Seiwerth, P., „Environmental Performance of Inland Navigation“, European Inland Waterway Navigation Conference, Visegrad, June, 2007.
5. *** PIANC „Considerations to reduce environmental impacts of vessels“, Report 99, July 2008.
6. *** PINE – Final Concise Report, „Prospects of Inland Navigation within the enlarged Europe“, March, 2004.
7. *** COLD – Final Report, „An Assessment of the Opportunities and Risks of Container Transport on the Danube River between Austria and the Black Sea“, August, 2006.
8. *** „Manual on Danube Navigation“, Via Donau – Osterreichische Wasserstrassen-Gesellschaft mbH, Vienna, 2007.

9. Radojčić, D., „Environmentally Friendly Inland Waterway Ship Design for the Danube River“, World Wide Fund for Nature International, Danube-Carpatian Programme (WWF-DCP), Vienna, 2009.
10. Hofman, M., „Inland container vessel: Optimal characteristics for a specified waterway“, Coastal Ships & Inland Waterway II, RINA, London, 2006.
11. Hofman, M., Radojčić, D., Motok, M., Simić, A., „Container vessels for the Danube waterway – guidelines on preliminary design“, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2003.
12. *** „The Power of Inland Navigation - The future of freight transport and inland shipping in Europe 2010-2011“, Dutch Inland shipping information Agency (BVB), Rotterdam, 2010.
13. *** Resolution No. 92/2 on New Classification of Inland Waterways, CEMT, June, 1992.
14. EICB - <http://www.informatie.binnenvaart.nl/schepen/scheepstypen.html>.
15. www.informatie.binnenvaart.nl/schepen/scheepstypen.html.
16. www.captainsvoyage-forum.com/showthread.php/1678-Dutch-inland-freighters.
17. www.marinetraffic.com.
18. <http://danube-inland-navigation-vessels.blogspot.com/>.
19. www.new-logistics.com/.
20. www.binnenvaart.be/en/waterwegen/kaart_europa.html.
21. *** „Inventory of Most Important Bottlenecks and Missing Links in the E Waterway Network“, TRANS/SC.3/159, Resolution No. 49, UNECE, Geneva, 2005.
22. *** „Priručnik za unutarnju plovidbu u Republici Hrvatskoj“, Centar za razvoj unutrašnje plovidbe d.o.o., Zagreb, prosinac 2006.

-
23. *** „Danube navigation statistics for 2008 – 2009“, Danube Commission, Budapest, 2012.
 24. <http://www.ivr.nl/statistieken>
 25. Radojčić, D., „On Engineering Greener Logistics on Inland Waterways“, RORO 2008 Conference, Gotheburg, Sweden, May, 2008.
 26. Molland, A.F., Turnock, S.R. and Hudson, D.A. „Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power“, Cambridge University Press, Cambridge, 2011.
 27. Molland, A.F. (ed.), „The Maritime Engineering Reference Book: a Guide to Ship Design, Construction and Operation“, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2008.
 28. Bertram, V., „Practical Ship Hydrodynamics“, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
 29. Georgakaki A., Sorenson S.C., „Report on Collected Data and Resulting Methodology for Inland Shipping“, ARTEMIS, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, 2004.
 30. *** „ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Testing and Extrapolation Methods, Propulsion, Performance, Predicting Powering Margins“, Specialist Committee on Powering Performance of 24th ITTC, 2005.
 31. Rysst, J., Nyhus, E., „Climate changes regulations – consequences for ship design in a challenging buisness environment“, Climate Change and Ship Increasing Energy Efficiency, Proceeding, SNAME, February, 2010.
 32. *** IMO, MEPC 59/4/7, „Prevention of Air Pollution from Ships“, April, 2009.

- 33 *** IMO, MEPC.1/Circ.681, „Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships“, August, 2009.
- 34 Ozaki, et al, „An Evaluation of the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Baseline for Tankers, Containerships, and LNG Carriers“, Climate Change and Ship Increasing Energy Efficiency, Proceeding, SNAME, February, 2010.
- 35 *** IMO, MEPC.1/Circ.684, „Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator“, August, 2009.
- 36 Zöllner, J., Renner, V., „Technische und wirtschaftliche Voraussetzungen für große Containerschiffe“, Binnenschiffahrt, Schiffstechnik, Nr. 3, Februar, 1998.
- 37 Zöllner, J., „Vortriebstechnische Entwicklungen in der Binnenschiffahrt“, Ship's Propulsion – New and further Development, Universität Duisburg-Essen, Mai, 2003.
- 38 Edward, V., Lewis, (ed.), „Principles of Naval Architecture, Volume II, Resistance, Propulsion and Vibration“, Second Revision, SNAME, New Jersey, 1988.
- 39 Čolić, V., „Eksperimentalna istraživanja tehničko-eksploatacionih osobnosti putničkih i samohodnih teretnih brodova na dunavskoj plovnoj mreži“, Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2010.
- 40 Heuser, H., Luthra, G., „Ermittlung des Maßstabseinflusses auf Antriebs Kursund Manövrierverhalten von Binnenschiffsmodellen, wenn sie bei naturgetreuer Fahrweise die Basis für die Bemessung wasserbaulischer Konstruktionen darstellen“, Bericht 1155, VBD, Duisburg, 1986.
- 41 Hoffmann, K., „An Introduction to Measurements using Strain Gages“, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989.

- 42 Hoffmann, K., „Practical hints for the installation of strain gages“, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 4th revised edition, Darmstadt, 1996.
- 43 Milorad Milovančević, Nina Anđelić, „Otpornost materijala“, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2006.
- 44 *** „Shunt Calibration of Strain Gage Instrumentation“, Vishay Micro-Measurements, Tech Note TN-514, July, 2007.
- 45 *** „Strain Gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature“, Vishay Micro-Measurements, Tech Note TN-504-1, August, 2007.
- 46 *** „Errors Due to Misalignment of Strain Gages“, Vishay Micro-Measurements, Tech Note TN-511, July, 2007.
- 47 *** „Digital Signal Analysis, Using Digital Filters and FFT Techniques“, Selected Reprints from Technical Review, Brüel & Kjær, March, 1981.
- 48 Collett, C., V., Hope, A., D., „Engineering Measurements“, Pitman Publishing Corporation, New York, 1974.
- 49 Adams, L., F., „Engineering Measurements and Instrumentation“, The English language Book society and Hodder & Stoughton, London, 1978.
- 50 Haslam, J., A., Summers, G., R., Williams, D., „Engineering instrumentation and control“, Edward Arnold Publishers Ltd, London, 1981
- 51 www.hbm.com
- 52 www.vishaypg.com/micro-measurements/
- 53 www.omega.com/

-
- 54 www.binsfeld.com
- 55 www.ni.com
- 56 *** ISO-15016, „Ships and marine technology – Guidelines for the assessment of the speed and power performance by analysis of speed trial data“, Geneva, 2002
- 57 Миљковић, З., „Системи вештачких неуронских мрежа у производним технологијама“, Машински факултет, Универзитет у Београду, 2003.
- 58 Rojas, R., „Neural Networks – A Systematic Introduction“, Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- 59 Zurek, S., „aNETka V2.0 – Operation Manual“, Wolfson Centre for Magnetism School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, 2005.
- 60 Hofman, M., Radojčić, D., „Отпор и пропулзија брзих бродова у плиткој води“, Машињски факултет, Универзитет у Београду, Београд, 1997.
- 61 Hofman, M., Kozarski, V., „Shallow Water Resistance Charts for Preliminary Vessel Design“, International Shipbuilding Progress, Vol. 47, No. 449, Delft University Press, 2000.
- 62 Guldhammer, H., Harvald, Sv. Aa., „Ship Resistance: Effect of Form and Principal Dimensions“, Akademisk Forlag, Copenhagen, 1974.
- 63 Andersen, P., Guldhammer, H., „A Computer-Oriented Power Prediction Procedure“, Proceedings CADMO 86, 1986.
- 64 Holtrop, J., Mennen, G.G.J., „A Statistical Power Prediction Method“, International Shipbuilding Progress, Vol. 25, 1978.

-
- 65 Holtrop, J., Mennen, G.G.J., „An approximate power prediction method“, International Shipbuilding Progress , Vol. 29, 1982.
- 66 Holtrop, J., „A Statistical Re-analysis of Resistance and Propulsion Data“, International Shipbuilding Progress, Vol. 31, 1984.
- 67 Lackenby, H., „The Effect of Shallow Water on Ship Speed“, The Shipbilder and Marine-Engine Builder, Vol.70, No. 672, 1963.
- 68 Townsin, R.L., Byrne, D., Svensen, T.E. and Milne, A., „Fuel economy due to improvements in ship hull surface conditions 1976–1986“, International Shipbuilding Progress, Vol.33, No. 383, 1986.
- 69 Townsin, R.L., „Workshop – Calculating the Cost of Marine Surface Roughness on Ship Performance“, WEGEMT School on Marine Coatings at the University of Plymouth, 2000.
- 70 Kauczynski, W., Walderhaug, H., „Effects of Distributed Roughness on the Skin Friction of Ships“, International Shipbuilding Progress, Vol.34, No. 389, 1987.
- 71 Walderhaug, H., „Paint Roughness Effects on Skin Friction“, International Shipbuilding Progress, Vol.33, No. 382, 1986.
- 72 Anderson, C., Atlar, M., Callow, M., Candries, M., Milne, A. and Townsin, L.R., „The development of foul-release coatings for seagoing vessels“, Journal of Marine Design and Operations, Vol. 4, 2003.
- 73 Chambers, L.D., Stokes, K.R., Walsh, F.C. and Wood, R.J.K., „Modern approaches to marine antifouling coatings“, Surface & Coatings Technology, Vol. 201, 2006.

-
- 74 Kan, S., Shiba, H., Tsuchida, K. and Yokoo, K., „Effect of fouling of a ship’s hull and propeller upon propulsive performance“, International Shipbuilding Progress, Vol. 5, 1958.
- 75 Atlar, M., Glover, E.J., Candries, M. and Mutton, R.J., „The effect of a foul release coating on propeller performance“, International conference on Marine Science and Technology for Environmental Sustainability, Newcastle upon Tyne, 2002.
- 76 Brix. J., (ed.), „Manoeuvring Technical Manual“, Seehafen Verlag GmbH, Hamburg, 1993.
- 77 Blendermann, W., „Wind Loading of Ships – Collected Data from Wind Tunnel Tests in Uniform Flow“, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Bericht No 574, Hamburg, 1996.
- 78 Maruo, H., „On the increase of the resistance of a ship in rough seas“, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.108, 1960.
- 79 Faltinsen, O.M., Minsaas, K.J., Liapis, N. and Skjoldal, S.O., „Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway“, Proc. 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, 1980.
- 80 Townsin, R.L., Kwon, Y.J., Baree, M.S. and Kim, D.Y., „Estimating the influence of weather on ship performance“, Transactions, RINA, Vol. 135, 1993.
- 81 *** ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, „Full Scale Measurements, Speed and Power Trials, Analysis of Speed/Power Trial Data“, Specialist Committee on Powering Performance of 24th ITTC, 7.5-04-01-01.2, 2005.

-
- 82 Mads Aas-Hansen, „Monitoring of hull condition of ships“, M.Sc. Thesis, Nerwegian University of Science and Technology, 2010.
- 83 Insel, M., „Uncertainty in the analysis of speed and powering trials“, Ocean Engineering, Vol. 35, 2008.
- 84 Kristensen, H.O.H, „Model for Environmental Assessment of Container Ship Transport“, Transactions, SNAME, Vol. 118, 2010.
- 85 Andersen, P., Breslin, P.B., „Hydrodynamics of Ship Propellers“, Cambridge University Press, 1994.
- 86 *** ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, „Full Scale Measurements, Ice Testing, Ship Trials in Ice“, ITTC, 7.5-04-03-01, 1999.
- 87 *** IMO, MEPC 61/5/2, „Reduction of GHG Emissions From Ships - Report on a Trial Verification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI)“, Submitted by Germany, 61st session, June, 2010.
- 88 *** IMO, MEPC 60/4/5, „Prevention of Air Pollution From Ships - Report on the Trials on the Verification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI)“, Submitted by Japan, 60th session, December, 2009.
- 89 *** IMO, MEPC 60/4/3, „Prevention of Air Pollution From Ships - Energy Efficiency Design Index for Tankers“, Submitted by INTERTANKO, 60th session, December, 2009.
- 90 *** IMO, MEPC 60/4/45, „Prevention of Air Pollution From Ships - Proposal for an Energy Efficiency Design Index Verification Process“, Submitted by ITTC, 60th session, January, 2010.

ПРИЛОГ 1

**Основне димензије речних самоходних теретних бродова
који су коришћени при анализи**

Табела П1.1 – Основни подаци о испитаним бродовима - прва група испитивања

R.B.	Lvl [m]	Bvl [m]	T [m]	V [m ³]	S [m ²]	h [m]	L/B [-]	B/T [-]	$\frac{B}{h}$ [-]	h/T [-]	BTLvl [m ³]	D [m]	Broj propelera
1	108.64	14.00	2.00	2444.9	1696.2	3.50	7.760	7.000	8.064	1.750	3041.92	1.85	2
2	109.45	14.00	3.00	3861.0	1939.0	3.50	7.818	4.667	6.977	1.167	4596.90	1.85	2
3	108.64	14.00	2.00	2444.9	1696.2	5.00	7.760	7.000	8.064	2.500	3041.92	1.85	2
4	109.45	14.00	3.00	3861.0	1939.0	5.00	7.818	4.667	6.977	1.667	4596.90	1.85	2
5	109.74	14.00	3.50	4600.0	2078.0	5.00	7.839	4.000	6.599	1.429	5377.26	1.85	2
6	108.64	14.00	2.00	2444.9	1696.2	10.00	7.760	7.000	8.064	5.000	3041.92	1.85	2
7	109.45	14.00	3.00	3861.0	1939.0	10.00	7.818	4.667	6.977	3.333	4596.90	1.85	2
8	109.74	14.00	3.50	4600.0	2078.0	10.00	7.839	4.000	6.599	2.857	5377.26	1.85	2
9	108.64	14.00	2.00	2444.9	1696.2	18.00	7.760	7.000	8.064	9.000	3041.92	1.85	2
10	109.45	14.00	3.00	3861.0	1939.0	18.00	7.818	4.667	6.977	6.000	4596.90	1.85	2
11	109.74	14.00	3.50	4600.0	2078.0	18.00	7.839	4.000	6.599	5.143	5377.26	1.85	2
12	107.99	22.40	2.00	3533.5	2348.8	3.50	4.821	11.200	7.090	1.750	4837.95	1.91	3
13	109.07	22.40	3.00	5743.5	2581.5	3.50	4.869	7.467	6.090	1.167	7329.50	1.91	3
14	107.99	22.40	2.00	3533.5	2348.8	5.00	4.821	11.200	7.090	2.500	4837.95	1.91	3
15	109.07	22.40	3.00	5743.5	2581.5	5.00	4.869	7.467	6.090	1.667	7329.50	1.91	3
16	109.46	22.40	3.50	6930.0	2691.7	5.00	4.887	6.400	5.741	1.429	8581.66	1.91	3
17	107.99	22.40	2.00	3533.5	2348.8	10.00	4.821	11.200	7.090	5.000	4837.95	1.91	3
18	109.07	22.40	3.00	5743.5	2581.5	10.00	4.869	7.467	6.090	3.333	7329.50	1.91	3
19	109.46	22.40	3.50	6930.0	2691.7	10.00	4.887	6.400	5.741	2.857	8581.66	1.91	3
20	107.99	22.40	2.00	3533.5	2348.8	18.60	4.821	11.200	7.090	9.300	4837.95	1.91	3
21	109.07	22.40	3.00	5743.5	2581.5	18.60	4.869	7.467	6.090	6.200	7329.50	1.91	3
22	109.46	22.40	3.50	6930.0	2691.7	18.60	4.887	6.400	5.741	5.314	8581.66	1.91	3
23	138.64	14.00	2.00	3283.3	2229.4	3.50	9.903	7.000	9.328	1.750	3881.92	1.85	2
24	139.45	14.00	3.00	5118.7	2529.4	3.50	9.961	4.667	8.092	1.167	5856.90	1.85	2
25	138.64	14.00	2.00	3283.3	2229.4	5.00	9.903	7.000	9.328	2.500	3881.92	1.85	2
26	139.45	14.00	3.00	5118.7	2529.4	5.00	9.961	4.667	8.092	1.667	5856.90	1.85	2

Табела П1.1 – Основни подаци о испитаним бродовима - прва група испитивања (наставак)

R.B.	Lvl [m]	Bvl [m]	T [m]	V [m ³]	S [m ²]	h [m]	L/B [-]	B/T [-]	$\frac{h}{L}$ [-]	h/T [-]	BTLvl [m ³]	D [m]	Broj propelera
27	139.74	14.00	3.50	6058.0	2734.0	5.00	9.981	4.000	7.666	1.429	6847.26	1.85	2
28	138.64	14.00	2.00	3283.3	2229.4	10.00	9.903	7.000	9.328	5.000	3881.92	1.85	2
29	139.45	14.00	3.00	5118.7	2529.4	10.00	9.961	4.667	8.092	3.333	5856.90	1.85	2
30	138.64	14.00	2.00	3283.3	2229.4	18.00	9.903	7.000	9.328	9.000	3881.92	1.85	2
31	139.45	14.00	3.00	5118.7	2529.4	18.00	9.961	4.667	8.092	6.000	5856.90	1.85	2
32	139.74	14.00	3.50	6058.0	2734.0	18.00	9.981	4.000	7.666	5.143	6847.26	1.85	2
33	138.64	14.00	2.00	3283.3	2229.4	18.59	9.903	7.000	9.328	9.295	3881.92	1.85	2
34	139.45	14.00	3.00	5118.7	2529.4	18.59	9.961	4.667	8.092	6.197	5856.90	1.85	2
35	139.74	14.00	3.50	6058.0	2734.0	18.59	9.981	4.000	7.666	5.311	6847.26	1.85	2
36	67.00	8.20	2.50	1209.0	807.4	5.00	8.171	3.280	6.289	2.000	1373.50	1.50	1
37	80.00	9.50	2.50	1620.0	1057.4	5.00	8.421	3.800	6.812	2.000	1900.00	1.55	1
38	110.00	11.40	2.50	2752.0	1638.4	5.00	9.649	4.560	7.850	2.000	3135.00	1.76	2
39	135.00	17.00	2.50	4745.0	2742.6	5.00	7.941	6.800	8.034	2.000	5737.50	1.75	3
40	110.00	11.40	3.00	3304.8	1749.1	5.00	9.649	3.800	7.385	1.667	3762.00	1.60	2
41	110.00	11.40	2.00	2112.3	1532.0	5.00	9.649	5.700	8.573	2.500	2508.00	1.60	2
42	110.00	15.00	2.00	2670.0	1871.0	3.50	7.333	7.500	7.929	1.750	3300.00	1.76	2
43	110.00	15.00	2.00	2670.0	1871.0	7.50	7.333	7.500	7.929	3.750	3300.00	1.76	2
44	130.00	15.00	2.00	3264.0	2228.6	3.50	8.667	7.500	8.764	1.750	3900.00	1.76	2
45	130.00	15.00	2.00	3264.0	2228.6	7.50	8.667	7.500	8.764	3.750	3900.00	1.76	2
46	150.00	15.00	2.00	3859.0	2676.4	3.50	10.000	7.500	9.563	1.750	4500.00	1.76	2
47	150.00	15.00	2.00	3859.0	2676.4	7.50	10.000	7.500	9.563	3.750	4500.00	1.76	2
48	170.00	15.00	2.00	4454.0	3136.5	3.50	11.333	7.500	10.332	1.750	5100.00	1.76	2
49	170.00	15.00	2.00	4454.0	3136.5	7.50	11.333	7.500	10.332	3.750	5100.00	1.76	2
50	106.50	11.36	3.00	3267.0	1720.0	11.00	9.375	3.787	7.177	3.667	3629.52	1.85	2
51	118.64	20.60	1.40	2979.5	2660.8	2.00	5.759	14.714	8.245	1.429	3421.69	1.40	3
52	118.64	20.60	1.40	2979.5	2660.8	5.00	5.759	14.714	8.245	3.571	3421.69	1.40	3
53	119.58	20.60	1.65	3575.4	2790.7	5.00	5.805	12.485	7.820	3.030	4064.35	1.40	3

Табела П1.2 – Основни подаци о испитаним бродовима - друга група испитивања

R.B.	Lvl [m]	Bvl [m]	T [m]	V [m ³]	S [m ²]	h [m]	b [m]	L/B [-]	B/T [-]	$\frac{b}{h}$ [-]	h/T [-]	BTLvl [m ³]	D [m]	Broj propelera
54	66.18	8.16	2.60	1245.0	811.3	5.00	400	8.111	3.138	6.152	1.923	1404.17	1.40	1
55	65.47	8.16	2.10	990.0	729.2	5.00	400	8.023	3.886	6.569	2.381	1121.90	1.40	1
56	64.76	8.16	1.60	737.0	653.3	5.00	400	7.936	5.100	7.169	3.125	845.45	1.40	1
57	64.04	8.16	1.10	490.0	583.6	5.00	400	7.848	7.418	8.123	4.545	574.83	1.40	1
58	65.47	8.16	2.1	990	729.2	5.00	125	8.023	3.886	6.569	2.381	1121.90	1.50	1
59	65.47	8.16	2.1	990	729.2	3.50	125	8.023	3.886	6.569	1.667	1121.90	1.50	1
60	65.47	8.16	2.1	990	729.2	2.75	125	8.023	3.886	6.569	1.310	1121.90	1.50	1
61	64.76	8.16	1.6	737	653.3	5.00	125	7.936	5.100	7.169	3.125	845.45	1.50	1
62	64.76	8.16	1.6	737	653.3	3.50	125	7.936	5.100	7.169	2.188	845.45	1.50	1
63	64.76	8.16	1.6	737	653.3	2.75	125	7.936	5.100	7.169	1.719	845.45	1.50	1
64	64.04	8.16	1.1	490	583.6	5.00	125	7.848	7.418	8.123	4.545	574.83	1.50	1
65	64.04	8.16	1.1	490	583.6	3.50	125	7.848	7.418	8.123	3.182	574.83	1.50	1
66	64.04	8.16	1.1	490	583.6	2.75	125	7.848	7.418	8.123	2.500	574.83	1.50	1
67	93.41	11.4	2.5	2372	1398.3	3.50	400	8.194	4.560	7.004	1.400	2662.31	1.50	2
68	103.91	11	3	3050	1616.8	4.00	55	9.446	3.667	7.165	1.333	3428.87	-	1
69	103.62	11	2.8	2830	1569.8	4.00	55	9.420	3.929	7.326	1.429	3191.47	-	1
70	103.19	11	2.5	2520	1500.6	4.00	55	9.381	4.400	7.583	1.600	2837.74	-	1
71*	103.37	10.95	2.8	2845	1561.4	3.50	-	9.440	3.911	7.295	1.250	3169.17	1.60	1
72*	103.37	10.95	2.8	2845	1561.4	5.00	-	9.440	3.911	7.295	1.786	3169.17	1.60	1
73*	103.37	10.95	2.8	2845	1561.4	10.00	-	9.440	3.911	7.295	3.571	3169.17	1.60	1

* Мерења су спроведена са моделима $\lambda = 10, 16, 20, 25$

Табела П1.3 – Основни подаци о испитаним бродовима - трећа група испитивања

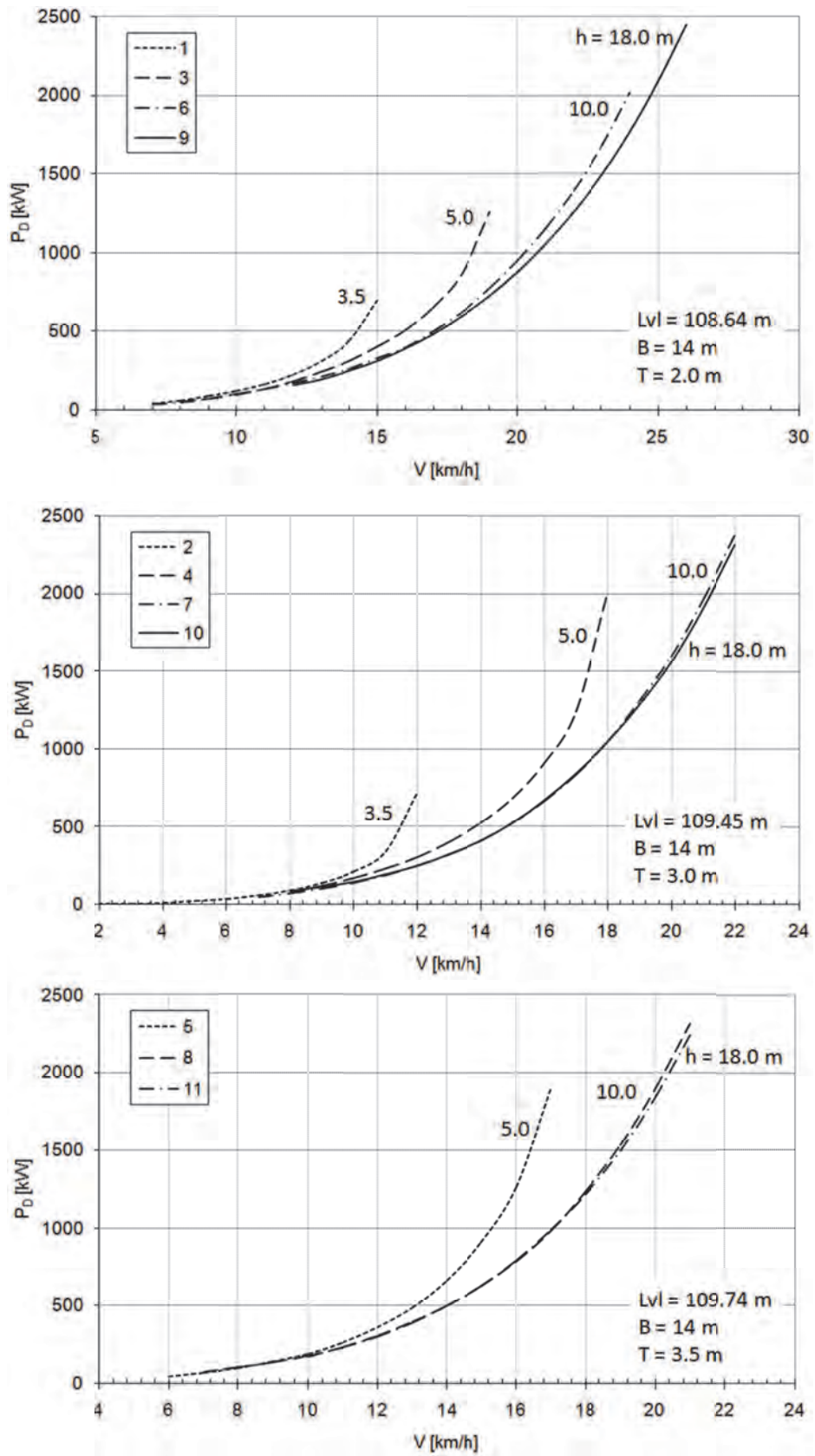
R.B.	Lvl [m]	Bvl [m]	T [m]	V [m ³]	DWT [t]	S [m ²]	h [m]	b [m]	L/B [-]	B/T [-]	$\frac{h}{b}$ [-]	h/T [-]	BTLvl [m ³]	D [m]	Broj propelera
74	66.04	8.16	2.50	1178	935	794.4	4.90	400	8.093	3.264	6.253	1.960	1347.25	1.40	1
75	82.66	9.50	2.50	1745	1285	1090.8	4.00	55	8.701	3.800	6.866	1.600	1963.20	1.55	1
76	82.38	9.50	2.30	1625	1165	1051.0	4.00	55	8.671	4.130	7.007	1.739	1799.90	1.55	1
77	82.38	9.50	2.30	1625	1165	1051.0	3.50	55	8.671	4.130	7.007	1.522	1799.90	1.55	1
78	82.38	9.50	2.30	1625	1165	1051.0	3.10	55	8.671	4.130	7.007	1.348	1799.90	1.55	1
79	82.38	9.50	2.30	1625	1165	1051.0	2.80	55	8.671	4.130	7.007	1.217	1799.90	1.55	1
80	81.95	9.50	2.00	1360	900	992.7	4.00	55	8.626	4.750	7.396	2.000	1556.98	1.55	1
81	81.23	9.50	1.50	995	535	899.4	4.00	55	8.551	6.333	8.137	2.667	1157.55	1.55	1
82	78.75	9.46	2.50	1664	1289	1038.7	4.00	55	8.325	3.784	6.646	1.600	1862.45	1.70	1
83	78.75	9.46	2.50	1664	1289	1038.7	4.00	45	8.325	3.784	6.646	1.600	1862.45	1.70	1
84	78.04	9.46	2.00	1309	934	943.1	4.00	55	8.249	4.730	7.134	2.000	1476.44	1.70	1
85	77.54	9.46	1.65	1063	688	879.2	4.00	55	8.196	5.733	7.597	2.424	1210.26	1.70	1
86	98.15	9.50	2.39	2040	1540	1272.8	4.50	400	10.331	3.975	7.739	1.883	2228.39	1.55	1
87	104.22	10.95	3.22	3289	2650	1664.6	7.50	400	9.518	3.401	7.008	2.329	3674.67	1.60	1
88	104.22	10.95	3.22	3289	2650	1664.6	6.00	400	9.518	3.401	7.008	1.863	3674.67	1.60	1
89	104.22	10.95	3.22	3289	2650	1664.6	5.00	400	9.518	3.401	7.008	1.553	3674.67	1.60	1
90	107.05	11.40	3.15	3515	2838	1736.3	12.00	400	9.391	3.619	7.041	3.810	3844.24	1.60	2
91	100.13	11.40	2.70	2625	-	1534.6	8.65	400	8.784	4.222	7.259	3.204	3082.09	1.76	2
92	106.41	11.40	2.70	2820	-	1627.4	8.65	400	9.334	4.222	7.532	3.204	3275.27	1.70	2
93	93.41	11.40	2.50	2372	-	1398.3	10.00	400	8.194	4.560	7.004	4.000	2662.31	1.50	2
94	103.91	11.00	3.00	3050	2330	1616.8	4.00	55	9.446	3.667	7.165	1.333	3428.87	-	1
95	103.62	11.00	2.80	2830	2110	1569.8	4.00	55	9.420	3.929	7.326	1.429	3191.47	-	1
96	103.19	11.00	2.50	2520	1800	1500.6	4.00	55	9.381	4.400	7.583	1.600	2837.74	-	1
97	92.54	11.05	1.85	1535	945	1228.4	12.50	400	8.375	5.973	8.023	6.757	1891.84	1.60	2
98	93.04	11.05	2.20	1914	1324	1302.8	12.50	400	8.420	5.023	7.494	5.682	2261.91	1.60	2
99	75.71	9.09	0.60	325	-	677.7	12.50	400	8.329	*	*	*	412.94	1.60	1
100	103.19	11.00	2.50	2535	1891	1500.6	4.15	55	9.381	4.400	7.568	1.660	2837.74	1.60	1
101	102.70	22.80	1.65	3130	1530	-	7.00	500	4.504	13.818	7.021	4.242	3863.57	-	2
102	76.00	11.00	1.90	1246	806	1023.1	10.00	500	6.909	5.789	7.063	5.263	1588.40	-	2

* Празан брод: T = 0.6 m

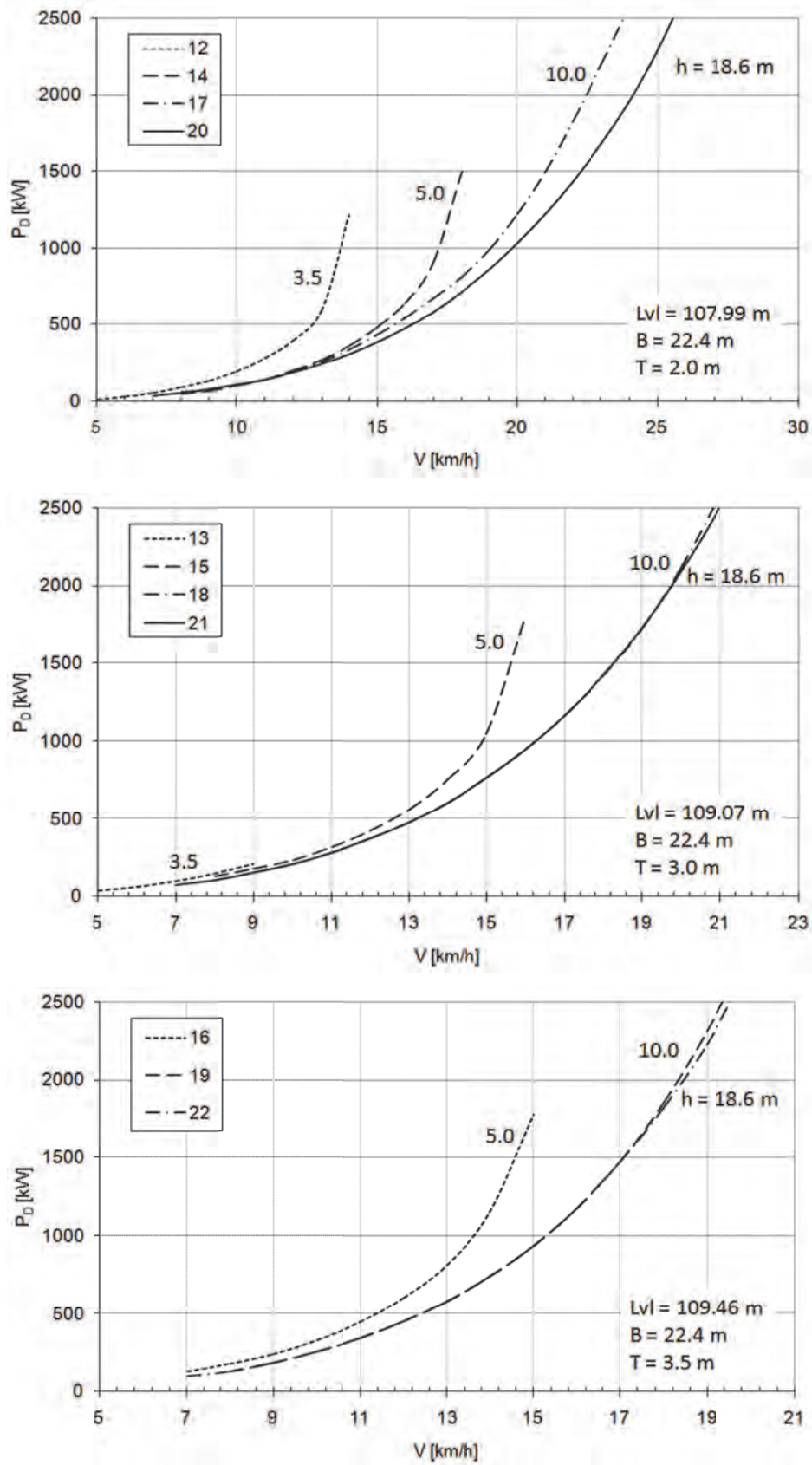
ПРИЛОГ 2

**База резултата испитивања хидродинамичких
карактеристика речних самоходних теретних бродова**

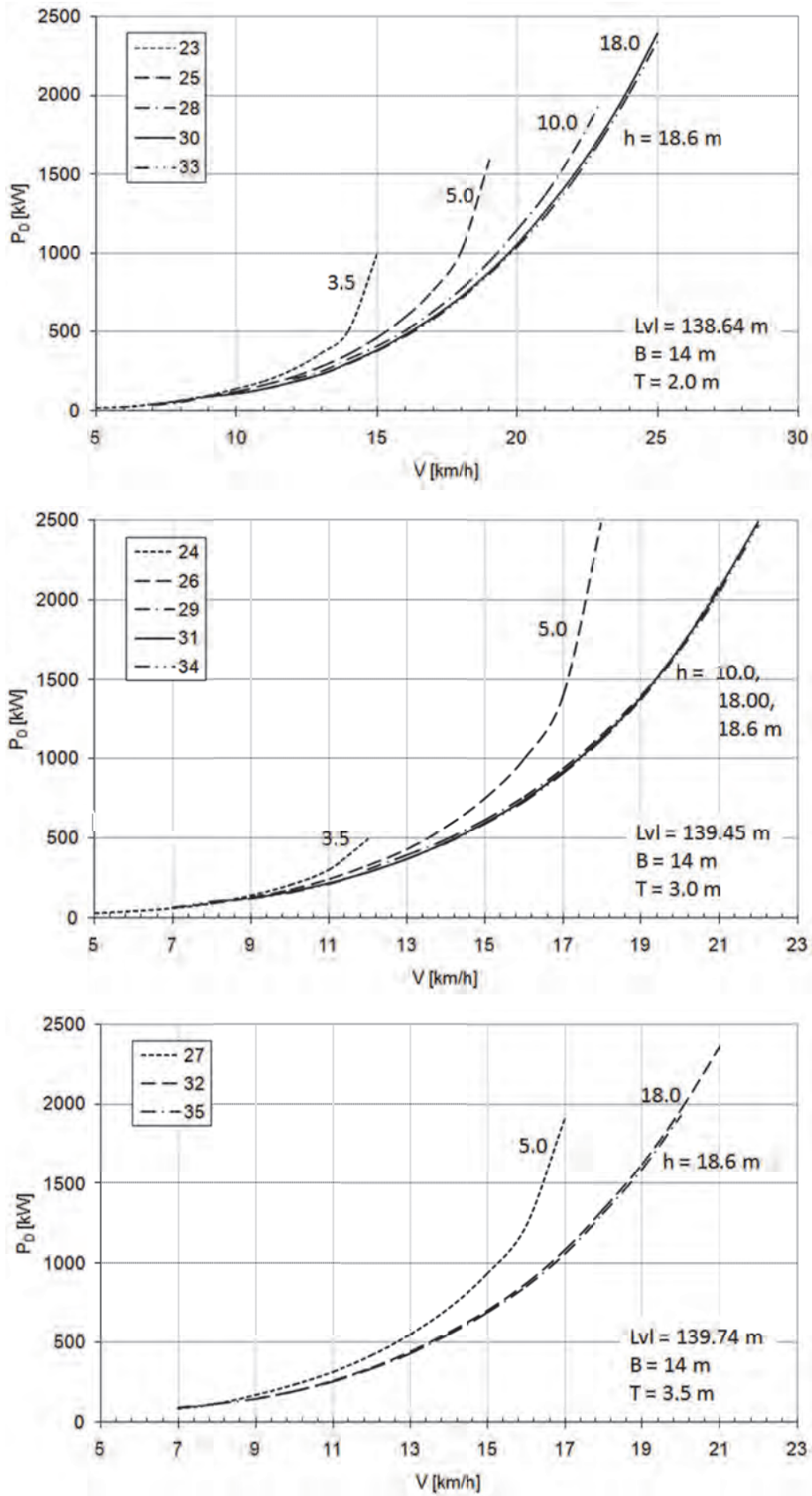
– Група 1 –



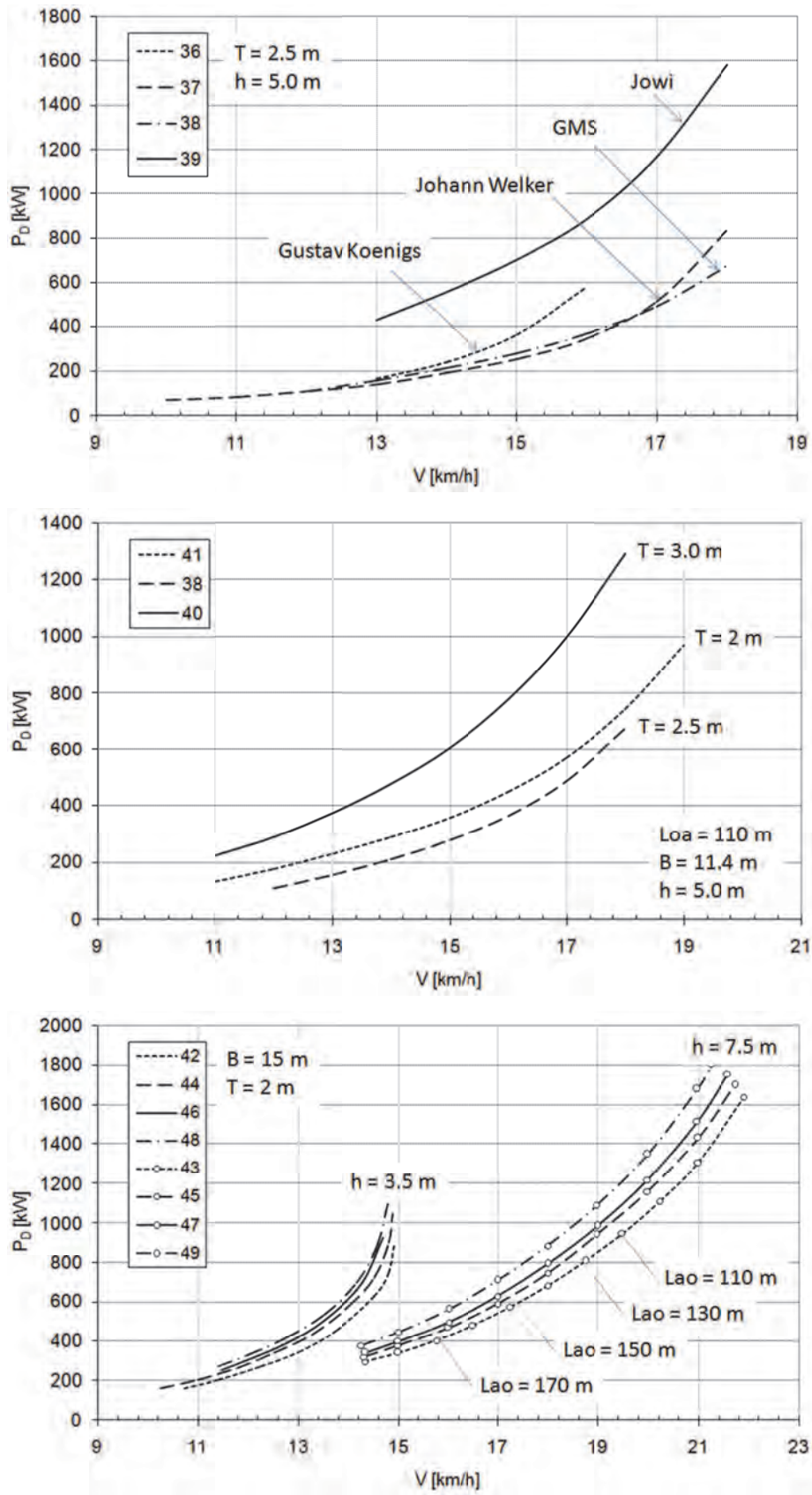
Слика П2.1 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 1 до 11 (прилог 1, таб. П1.1)



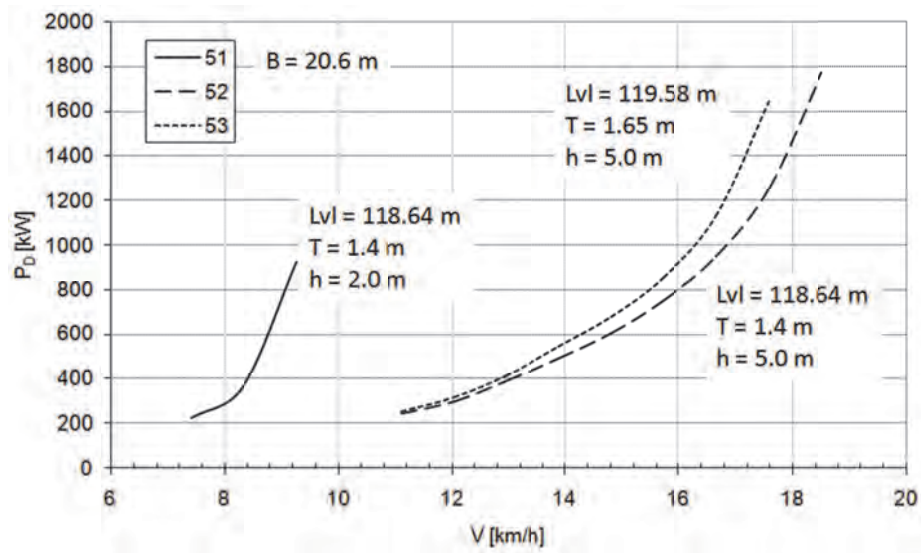
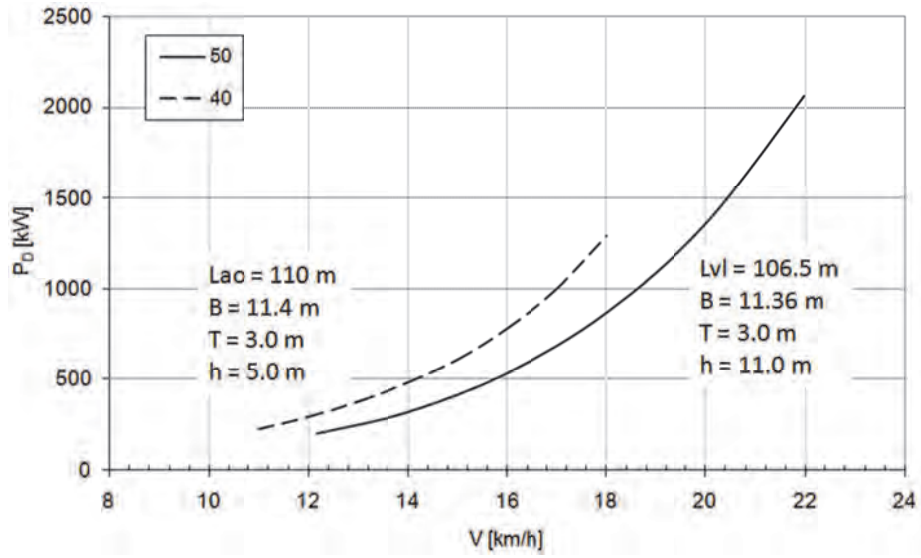
Слика П2.2 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 12 до 22 (прилог 1, таб. П1.1)



Слика П2.3 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 23 до 35 (прилог 1, таб. П1.1)



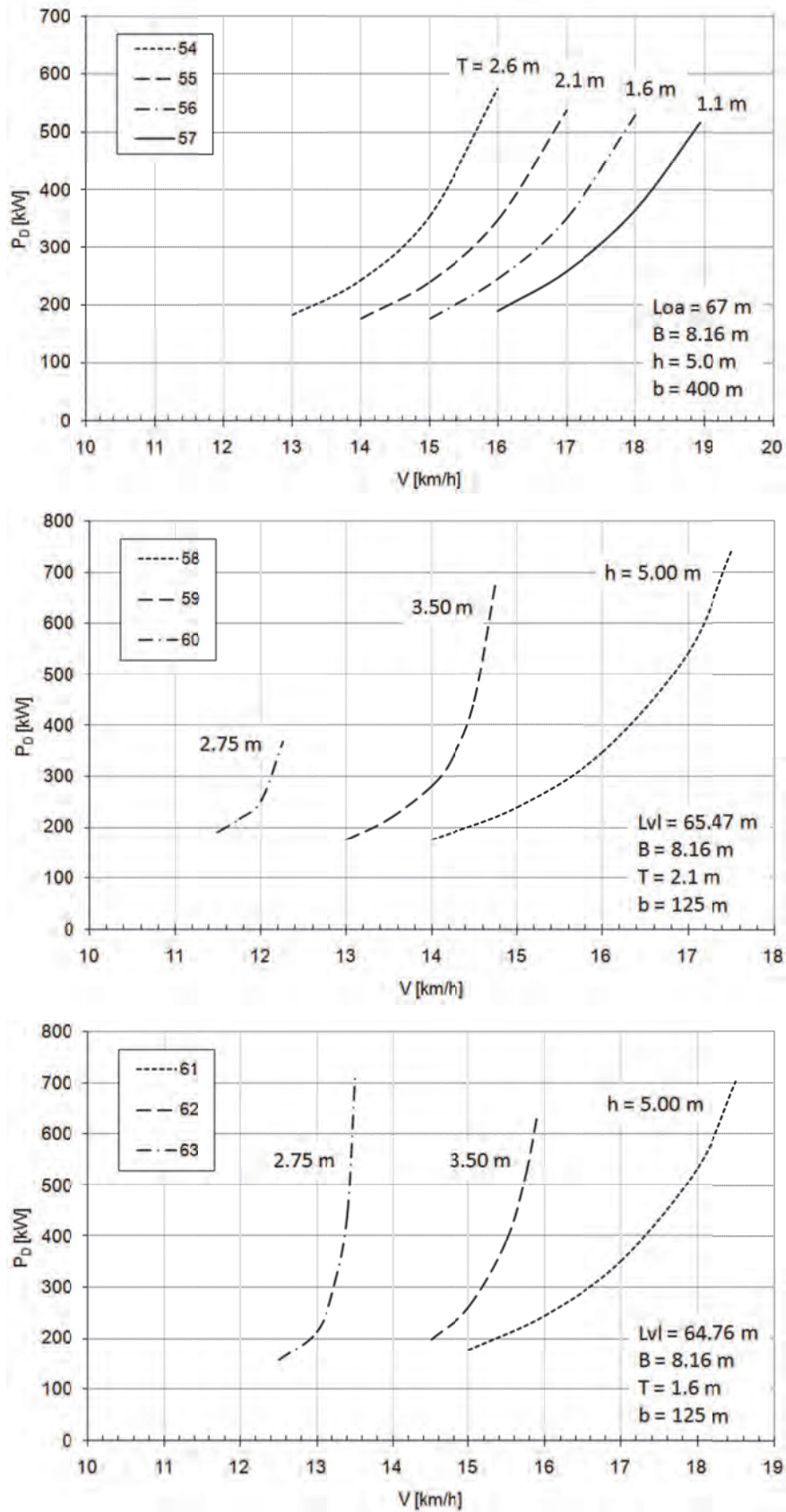
Слика П2.4 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 36 до 49 (прилог 1, таб. П1.1)



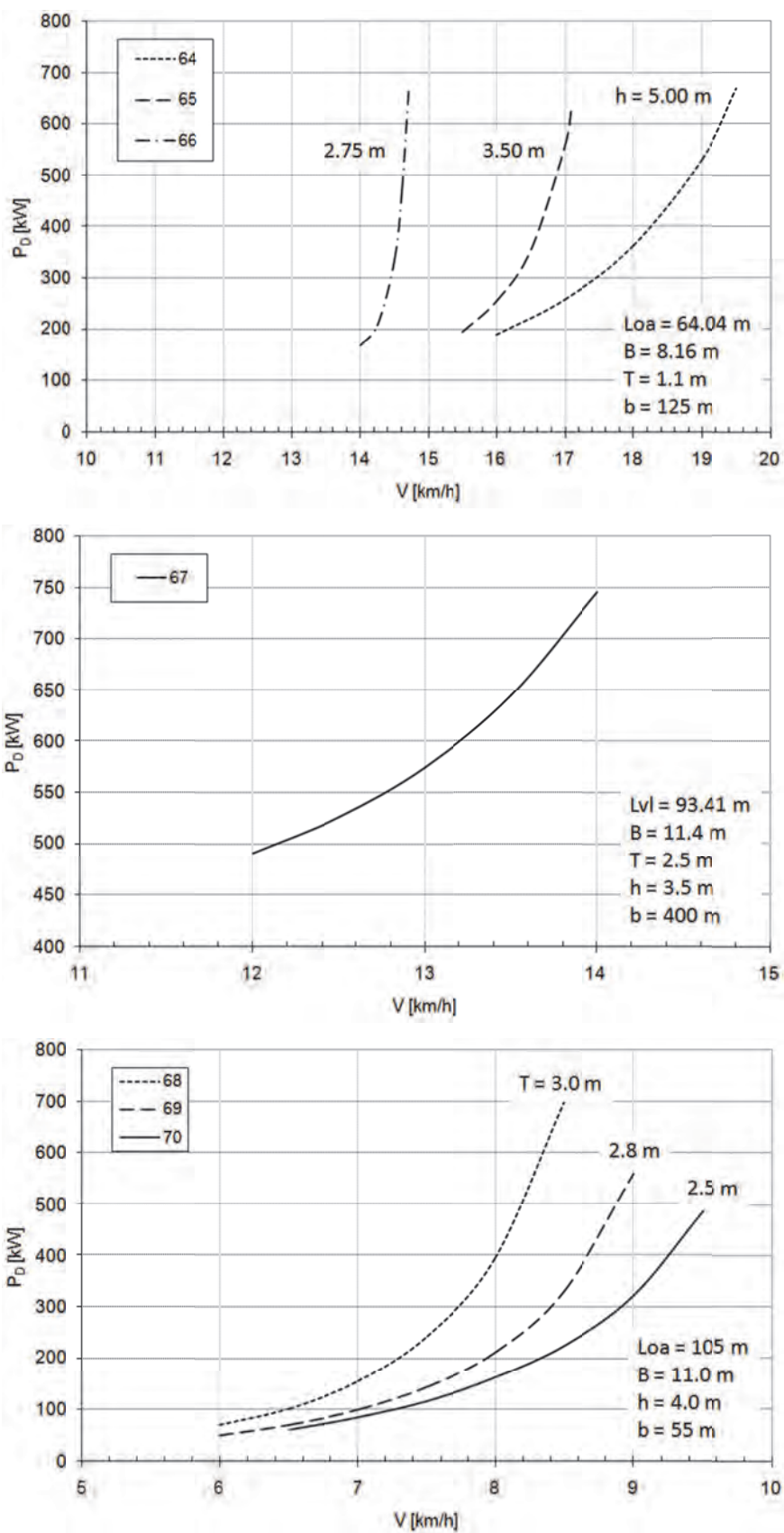
Слика П2.5 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 40 и 50 до 53 (прилог 1, таб. П1.1)

**База резултата испитивања хидродинамичких
карактеристика речних самоходних теретних бродова
– моделска испитивања –**

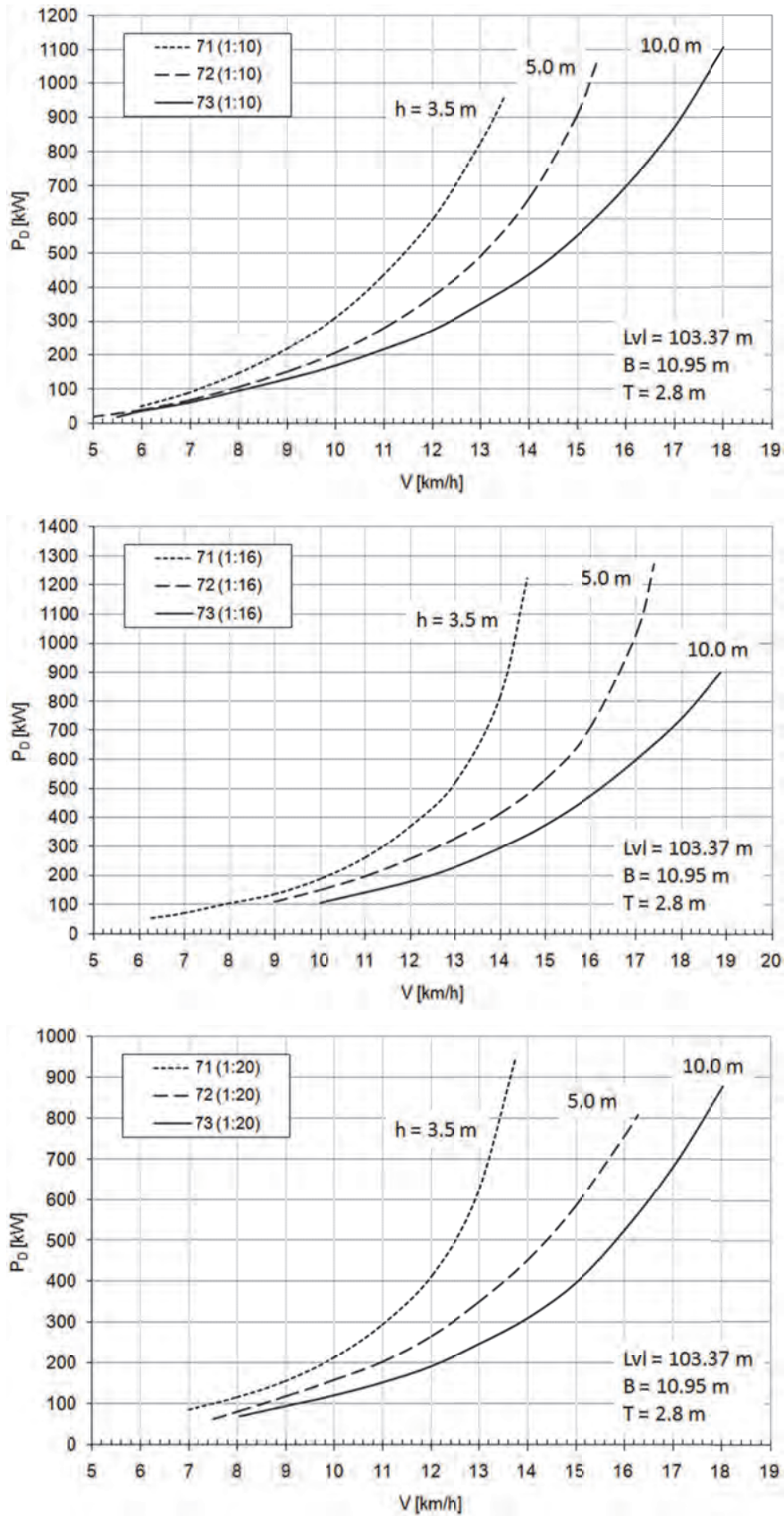
– Група 2 –



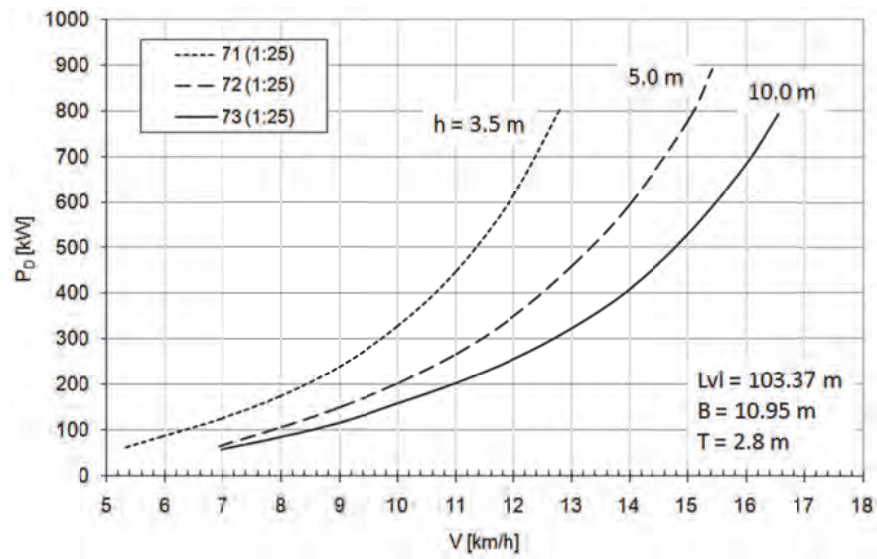
Слика П2.6 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 54 до 63 (прилог 1, таб. П1.2)



Слика П2.7 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 64 до 70 (прилог 1, таб. П1.2)



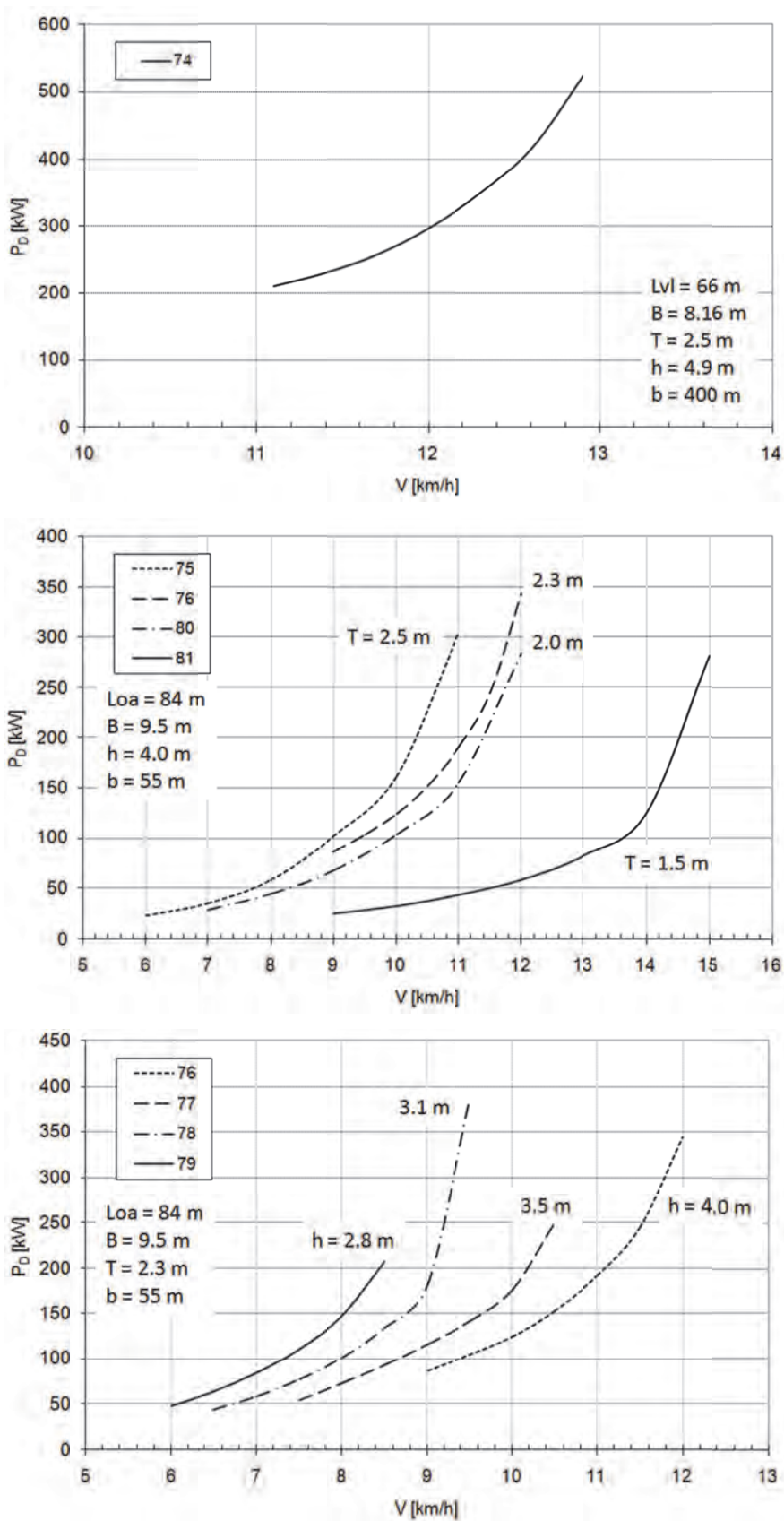
Слика П2.8 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 71 до 72 (прилог 1, таб. П1.2)



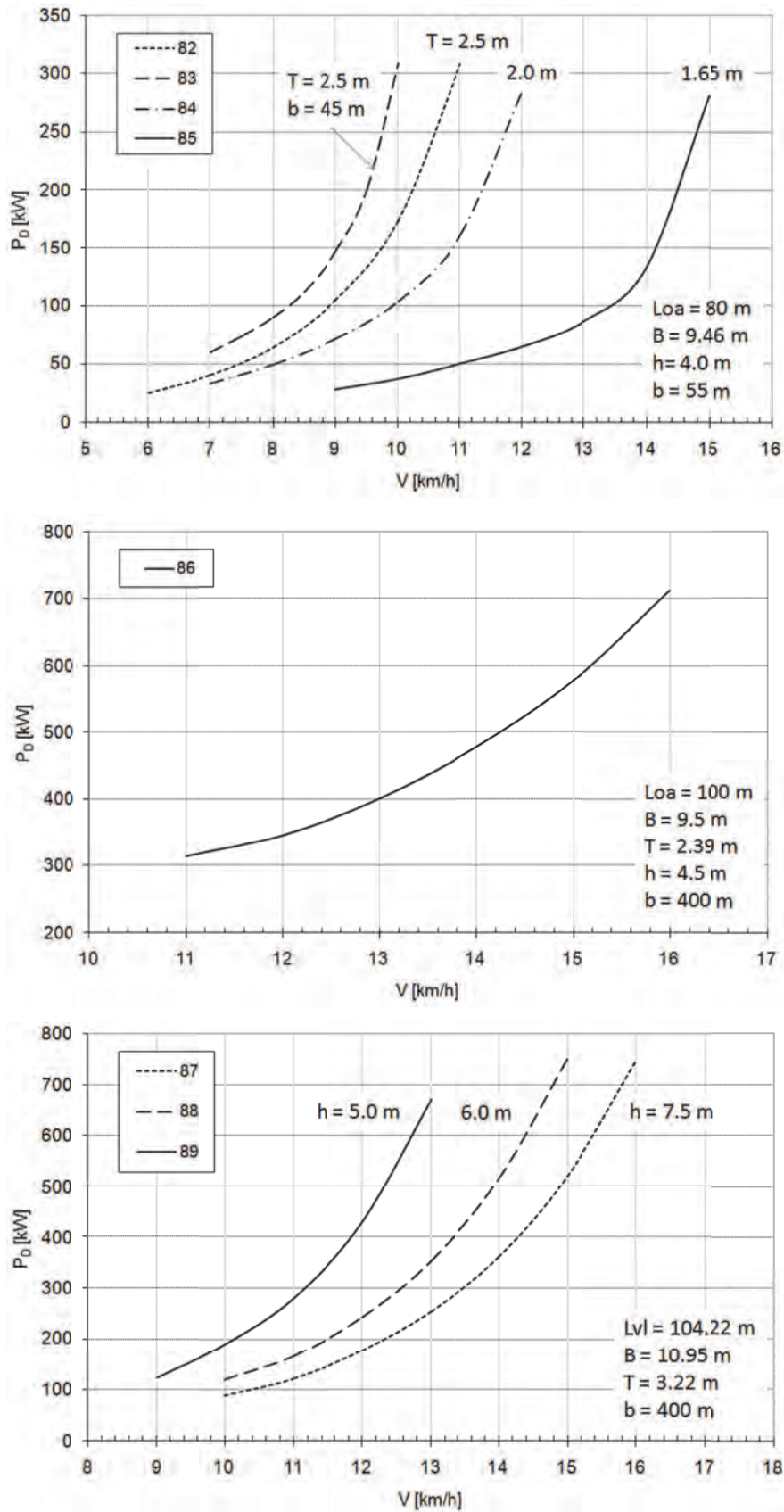
Слика П2.9 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 71 до 72 (прилог 1, таб. П1.2)

**База резултата испитивања хидродинамичких
карактеристика речних самоходних теретних бродова
– испитивања бродова у реалним околностима –**

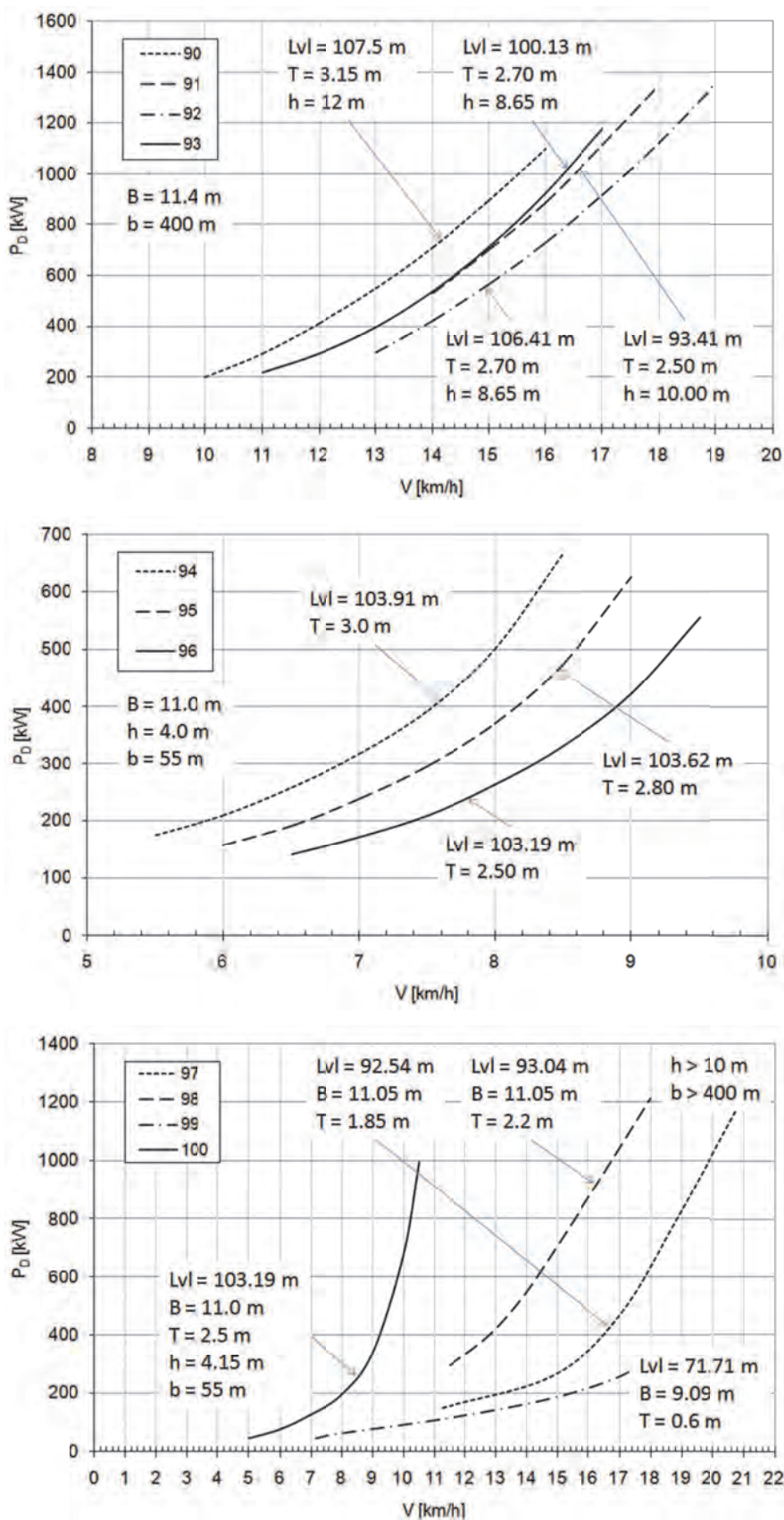
– Група 3 –



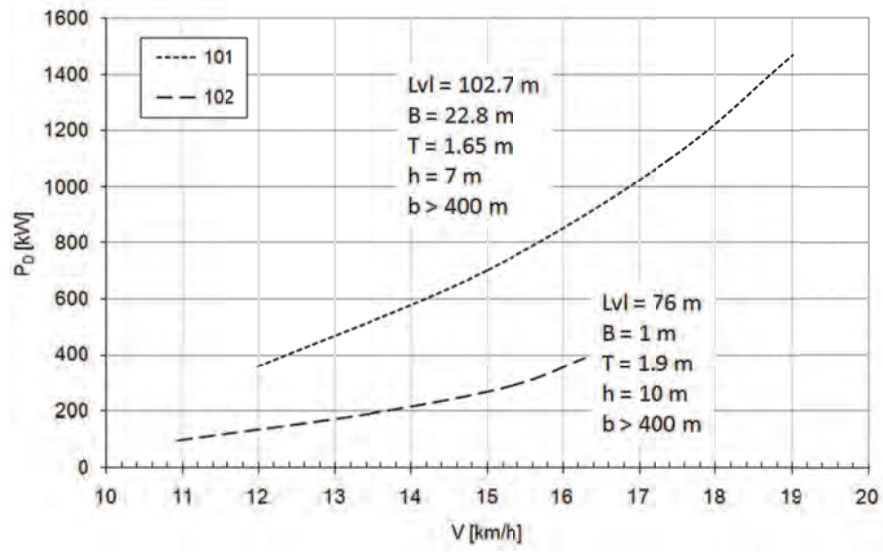
Слика П2.10 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 74 до 81 (пр. 1, таб. П1.3)



Слика П2.11 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 82 до 89 (пр. 1, таб. П1.3)



Слика П2.12 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 90 до 100 (пр. 1, таб. П1.3)

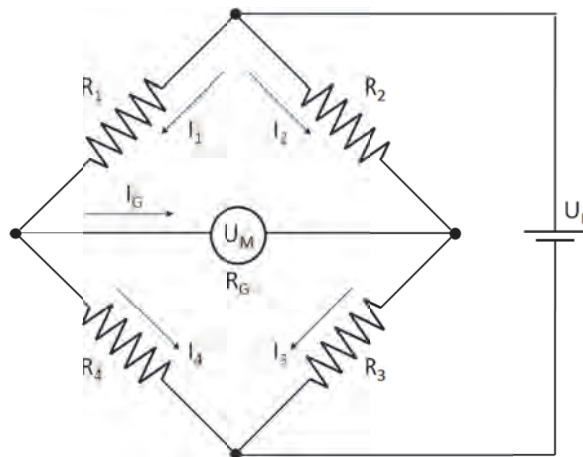


Слика П2.13 – Резултати мерења апсорбоване снаге бродова 101 до 102 (пр. 1, таб. П1.3)

ПРИЛОГ 3

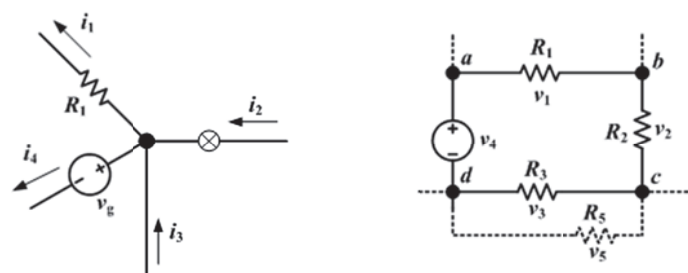
Принцип рада мерне траке

Витстонов мост први пут је применио Самјуел Хантер Кристи 1833. године, а побољшао га је британски научник Чарлс Витстон 1843. године. Овде је заправо реч о четири отпорника који су међусобно везани као што је показано на слици ПЗ.1. Основна намена му је мерење отпора. Уколико су вредности ма која три отпорника у вези познате помоћу Витстоновог моста се са великом тачношћу може одредити отпор четвртог отпорника у колу. Са U_E је означен напон напајања моста, а са U_M напон у мерној грани који се мери помоћу волтметра.



Слика ПЗ.1 – Витстонов мост

Основни принцип рада заснован је на првом и другом Кирхофовом закону.



Слика ПЗ.2 – Први ($\sum i = 0$) и други ($\sum V = 0$) Кирхофов закон

Према првом Кирхофовом закону (Кирхофов струјни закон), збир свих струја које у чвор улазе једнак је збиру свих струја које из истог чвора излазе (слика ПЗ.2, лево). Одавде се може успоставити веза између струја које пролазе гранама Витстоновог моста:

$$I_1 = I_G + I_4$$

$$I_3 = I_G + I_2$$

Према другом Кирхофовом закону (Кирхофовом напонском закону), сума свих напона у затвореном струјном колу једнака је нули (слика П3.2, десно). Ово за случај Витстоновог моста подразумева:

$$R_1 \cdot I_1 + R_4 \cdot I_4 - U_E = 0$$

$$R_1 \cdot I_1 + R_G \cdot I_G - R_2 \cdot I_2 = 0$$

$$R_G \cdot I_G + R_3 \cdot I_3 - R_4 \cdot I_4 = 0$$

Решавањем овог система једначина струје I_1 , I_2 , I_3 и I_4 се могу изразити преко струје I_G , напона ексцитације мерног моста U_E и отпора R_1 , R_2 , R_3 , R_4 и R_G .

$$I_1 = \frac{U_E + R_4 \cdot I_G}{R_1 + R_4}$$

$$I_2 = I_G \cdot \left(\frac{R_G}{R_2} + \frac{R_1 \cdot R_4}{R_2 \cdot (R_1 + R_4)} \right) + U_E \cdot \frac{R_1}{R_2 \cdot (R_1 + R_4)}$$

$$I_3 = I_G \cdot \frac{(R_2 + R_G) \cdot (R_1 + R_4) + R_1 \cdot R_4}{R_2 \cdot (R_1 + R_4)} + U_E \cdot \frac{R_1}{R_2 \cdot (R_1 + R_4)}$$

$$I_4 = I_G \cdot \frac{-R_1}{R_1 + R_4} + U_E \cdot \frac{1}{R_1 + R_4}$$

Одавде се може доћи до израза којим се може одредити струја у мерној грани у зависности од вредности отпорника у колу и напона напајања мерног моста:

$$I_G = \frac{R_4 \cdot R_2 - R_1 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_G \cdot (R_1 + R_4) + R_3 \cdot (R_2 + R_G) \cdot (R_1 + R_4) + R_1 \cdot R_4 \cdot (R_2 + R_3)} \cdot U_E$$

Сада је могуће успоставити везу између напона U_E и напона који се може регистровати у мерној грани U_M :

$$U_M = \lim_{R_G \rightarrow \infty} (I_G \cdot R_G)$$

$$U_M = \lim_{R_G \rightarrow \infty} \left(\frac{(R_4 \cdot R_2 - R_1 \cdot R_3) \cdot U_E \cdot R_G}{R_2 \cdot R_G \cdot (R_1 + R_4) + R_3 \cdot (R_2 + R_G) \cdot (R_1 + R_4) + R_1 \cdot R_4 \cdot (R_2 + R_3)} \right)$$

Решавањем претходног израза долази се до једначине којом се описује принцип рада Витстоновог моста:

$$U_M = \left(\frac{R_4}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \cdot U_E$$

Када је измерени напон $U_M = 0$ тада је мост у равнотежи и тада важи:

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$

Сва четири отпорника на мерној траци у неоптерећеном стању су једнаки (350Ω) и постављени су међусобно под угловима од 90° . Приликом мерења момента на пропелерском вратилу, водећи рачуна о правцу деловања највећих напона смицања, мерна трака се на вратило поставља тако да отпорници буду управо на овим правцима. Према томе, приликом увијања пропелерског вратила два наспрамна отпорника се при деформисању издужују, а преостала два се скраћују. Ово има за последицу да електрични отпор издужених отпорника расте, а скраћених опада. Пошто су ове деформације идентичне по интензитету и промене отпора ће бити једнаке:

$$R_1 = R_3 = R - \Delta R$$

$$R_2 = R_4 = R + \Delta R$$

Одавде следи:

$$U_M = \left(\frac{R + \Delta R}{R - \Delta R + R + \Delta R} - \frac{R - \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} \right) \cdot U_E = \left(\frac{R + \Delta R}{2 \cdot R} - \frac{R - \Delta R}{2 \cdot R} \right) \cdot U_E$$

односно:

$$U_M = \frac{\Delta R}{R} \cdot U_E$$

Како је промена електричне отпорности мерне траке пропорционална деформацији ε :

$$\Delta R = \varepsilon \cdot R \cdot k$$

следи веза између јединичне деформације и излазног напона мерне траке:

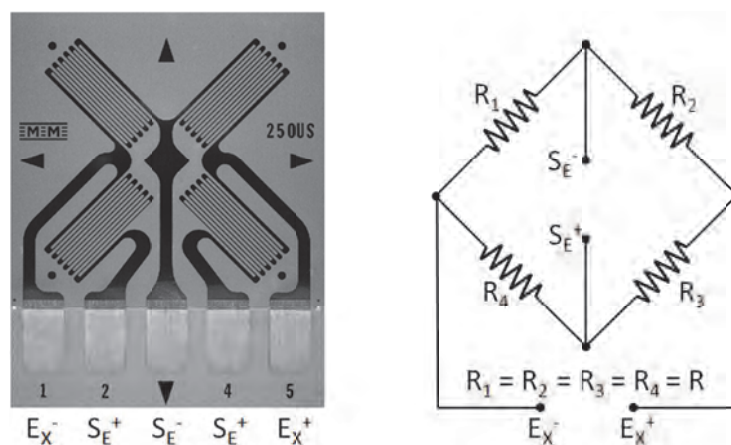
$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{U_M}{U_E}$$

Према томе уколико је познат напон напајања мерне траке U_E , њена карактеристика k и излазни напон U_M , могуће је израчунати деформацију вратила ε .

Калибрација мерне траке

Поступак калибрације мерне траке методом шантовања подразумева додавање спољашњег отпорника (R_C) у коло Витстоновог моста, у циљу изазивања промене електричне отпорности мерне траке, која је еквивалентна промени електричне отпорности која би била изазвана деловањем познатог момента на пропелерско вратило. У том смислу, мора се одредити тачна вредност потребног калибрационог отпорника која одговара одређеном моменту.

На слици ПЗ.3 приказана је типична мерна трака (пун Витстонов мост) каква се користи за мерење момента на пропелерском вратилу са означеним контактима за напајање (E_X^- и E_X^+) и контактима за мерење одзивног сигнала (S_E^- и S_E^+).



Слика ПЗ.3 – Мерна трака која се користи за мерење момента (лево) и њен шематски приказ са одговарајућим ознакама (десно)

Додавањем отпорника R_C , како је то на слици ПЗ.4 показано мења се отпорност мерне траке за ΔR .

Да би промена отпорности мерне траке била еквивалентна промени отпорности до које би дошло услед оптерећења пропелерског вратила моментом Q , имајући у виду да је промена отпорности пропорционална јединичној деформацији мерне траке:

$$\Delta R = \varepsilon \cdot R \cdot k$$

као и да ова деформација зависи од специфичности вратила (G и D) и момента Q , у складу са следећим изразом:

$$Q = \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot G \cdot D^3 \cdot \varepsilon$$

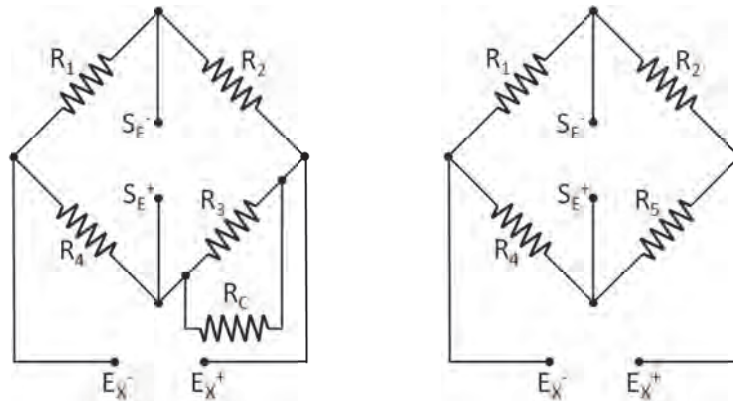
може се закључити да се потребна промена отпорности мерне траке може одредити из следећег израза:

$$\Delta R = \frac{8 \cdot Q \cdot k \cdot R}{\pi \cdot G \cdot D^3}$$

Према томе, потребно је одредити вредност отпорности R_C , чијим би додавањем колу мерне траке била иницирана промена електричне отпорности која се може одредити изведеним изразом.

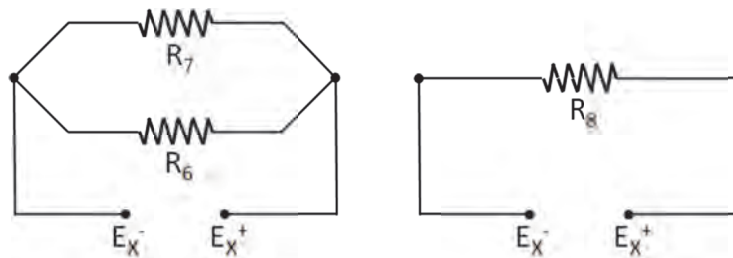
Са слике ПЗ.4 може се уочити да су отпорници R_3 и R_C паралелно везани, те се шема може упростити, што је показано на слици ПЗ.4 десно, увођењем отпорника R_5 чија се отпорност може одредити на следећи начин:

$$R_5 = \frac{R_3 \cdot R_C}{R_3 + R_C} = \frac{R \cdot R_C}{R + R_C}$$



Слика П3.4 – Начин додавања спољашњег отпорника приликом калибрације мерне траке

Даљим упрошћавањем, коло мерне траке се може свести на случај који је показан на слици П3.5 (лево), где су редне везе отпорника R_1 и R_2 , односно R_4 и R_5 замењене еквивалентним отпорима R_6 односно R_7 .



Слика П3.5 – Упрошћена шема кола мерне траке

$$R_6 = R_4 + R_5 = R + \frac{R \cdot R_C}{R + R_C}, \quad R_7 = R_1 + R_2 = 2 \cdot R$$

Сада се може одредити укупна отпорност мерне траке након увођења калибрационог отпорника на описани начин. Пошто су отпорници R_6 и R_7 паралелно везани:

$$R_8 = \frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7} = \frac{\left(R + \frac{R \cdot R_C}{R + R_C}\right) \cdot 2 \cdot R}{R + \frac{R \cdot R_C}{R + R_C} + 2 \cdot R} = R - \frac{R^2}{3 \cdot R + 4 \cdot R_C}$$

Како важи да је:

$$R_8 = R - \Delta R$$

следи да се промена електричне отпорности, до које је дошло увођењем калибрационог отпорника у коло, може одредити из израза:

$$\Delta R = \frac{R^2}{3 \cdot R + 4 \cdot R_c}$$

Уколико се овај израз изједначи са потребном променом отпорности мерне траке, којом се симулира жељено оптерећење пропелерског вратила,

$$\frac{R^2}{3 \cdot R + 4 \cdot R_c} = \frac{8 \cdot Q \cdot k \cdot R}{\pi \cdot G \cdot D^3}$$

долази се до израза из кога је могуће одредити отпорност калибрационог отпорника:

$$R_c = \frac{R}{4} \cdot \left(\frac{\pi \cdot G \cdot D^3}{8 \cdot Q \cdot k} - 3 \right)$$

Није неопходно да калибрациони отпорник буде колу додат као што је то овде показано, али се у том случају мења његова вредност.

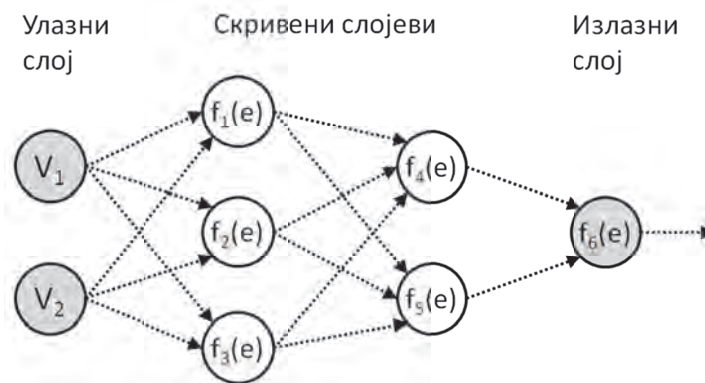
При извођењу калибрационог отпора није разматран утицај електричног отпора проводника који преносе сигнал између мерне траке и мобилне јединице опреме за мерења, јер су услед начина монтаже опреме ови каблови довољно кратки да се овај утицај може занемарити.

ПРИЛОГ 4

Уопштено о *ANN* методи

Имајући у виду широку примену, данас постоји више модела вештачких неуронских мрежа, од којих је овде усвојен тзв. *feed-forward, back-propagation* модел. Општа структура овог типа вештачке неуронске мреже са нпр. две независне (улазне) променљиве, једном зависном (излазном) променљивом и два скривена слоја приказана је на слици 5.1 и састоји се од:

- коначног броја тзв. неурона – блокова које примају одређене информације и обрађују их према унапред задатој математичкој законитости,
- међусобних веза између неурона којима се остварује комуникација између њих, при чему су тежинским коефицијентима одређени значаји појединих веза.



Слика П4.1 – Општа структура вештачке неуронске мреже

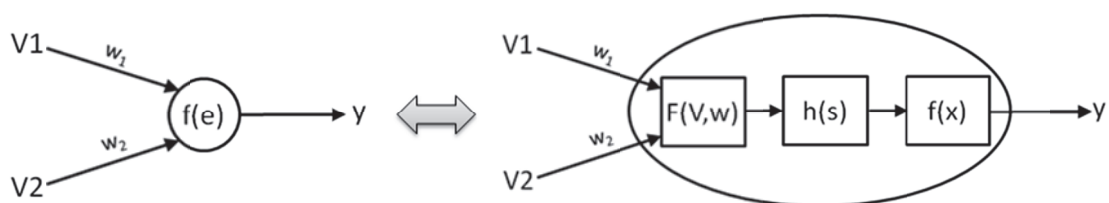
Неурони су у неуронској мрежи организовани у слојевима, од којих први садржи улазне параметре, а последњи представља излаз из мреже – резултат. Између улазног и излазног слоја неурона се налазе тзв. скривени слојеви којих може бити више и који се могу састојати од већег броја неурона. Сваки неурон се састоји од три елемента (слика 5.2):

- улазног оператора $F(V,w)$ који на основу свих улазних вредности (V - *варијабла*) и тежинских односа (w) формира јединствену вредност која се упућује на преносну функцију,

$$s = F(V, w) = \sum V_i \cdot w_i$$

- функције преноса $h(s)$ која обрађује излаз са улазног оператора и прослеђује га даље; у неким случајевима се излаз са улазног оператора прослеђује директно без додатне обраде,
- активационе функције $f(x)$ која даље обрађује излаз функције преноса и генерише излаз из неурона; облик активационе функције који се показао као најподеснији за обраду резултата мерења апсорбоване снаге је сигмоидни:

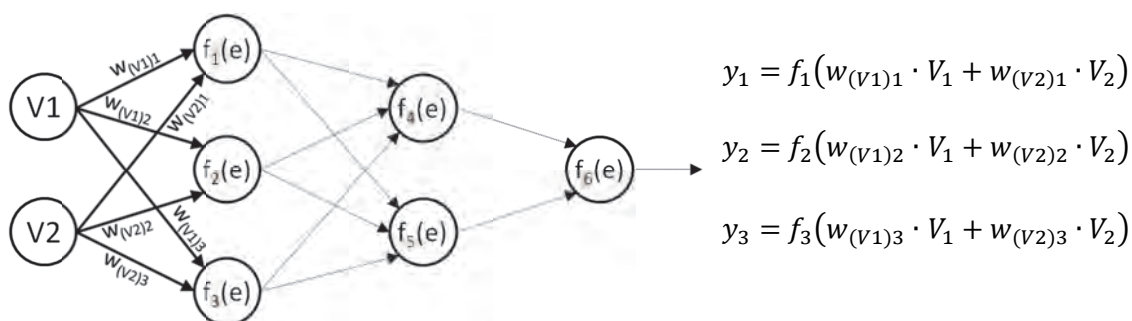
$$y = f(x) = \frac{1}{1 + e^{tx}}$$



Слика П4.2 – Шематски приказ типичног неурона

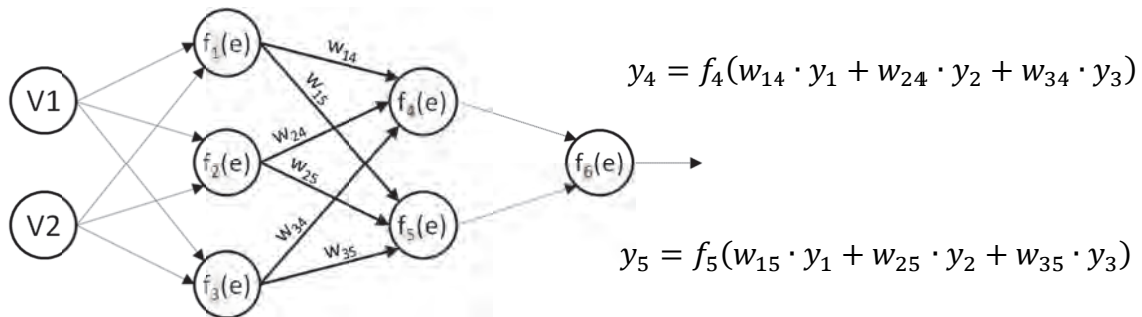
Основни принцип функционисања усвојеног модела неуронске мреже може се лакше разумети уколико се рашчлани на поједине кораке.

1. У првом кораку се на основу вредности усвојених независних променљивих (V_i) и претпостављених вредности тежинских односа (w_{ij}) израчунавају излази из неурона првог скривеног слоја. Са f_i је означена активациона функција.



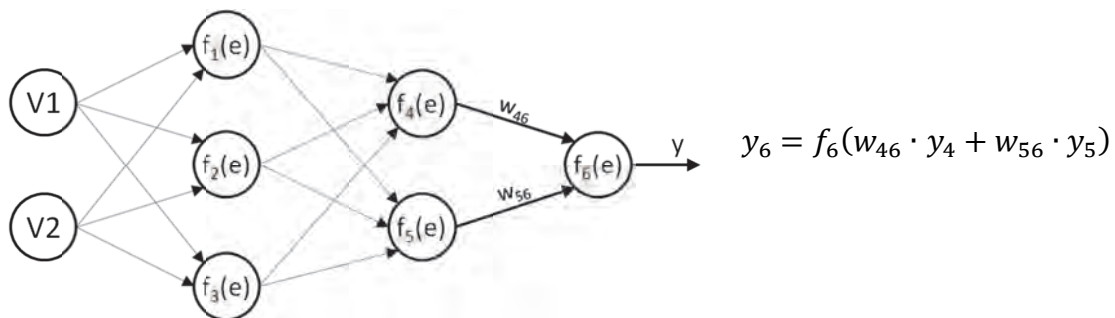
Слика П4.3 – Одређивање излазних вредности неурона првог скривеног слоја

2. У другом кораку се на основу излаза из неурона првог скривеног слоја и претпостављених тежинских односа између првог и другог слоја одређују излазне вредности из неурона другог скривеног слоја.



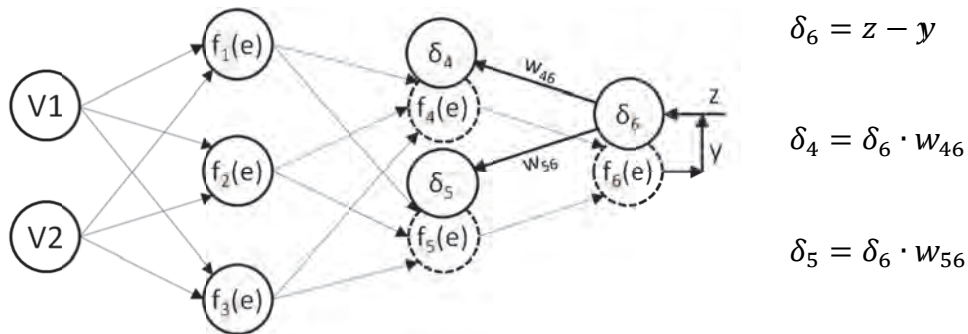
Слика П4.4 – Одређивање излазних вредности неурона другог скривеног слоја

3. У трећем кораку се, по истом принципу, одређује излазна вредност усвојене вештачке неуронске мреже.



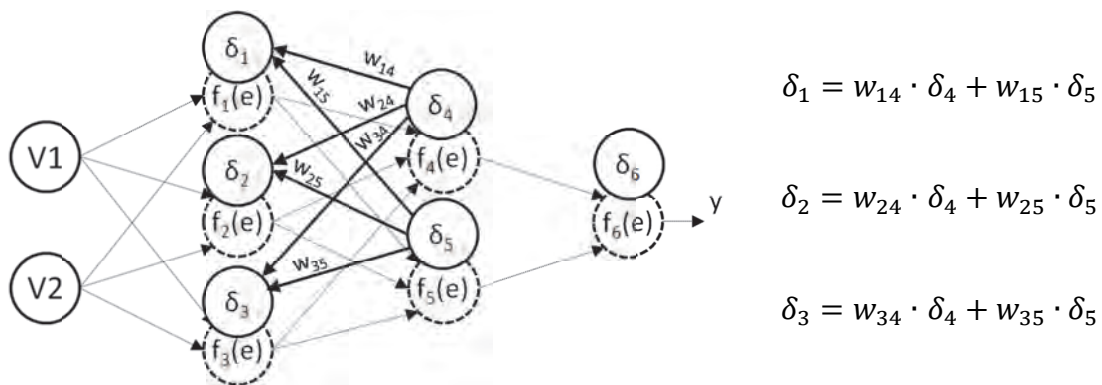
Слика П4.5 – Одређивање излазних вредности последњег неурона

4. У четвртном кораку се добијени резултат пореди са задатом тачном вредношћу зависне променљиве (z) и одређује се добијено одступање, односно грешка. Уколико је грешка довољно мала поступак се обуставља, а тежински односи представљају тражене коефицијенте добијеног математичког модела. Уколико постигнута тачност није прихватљива у овом кораку се на основу вредности тежинских односа који су усвојени у претходном пролазу информација о одступању истим путем враћа на други скривени слој.



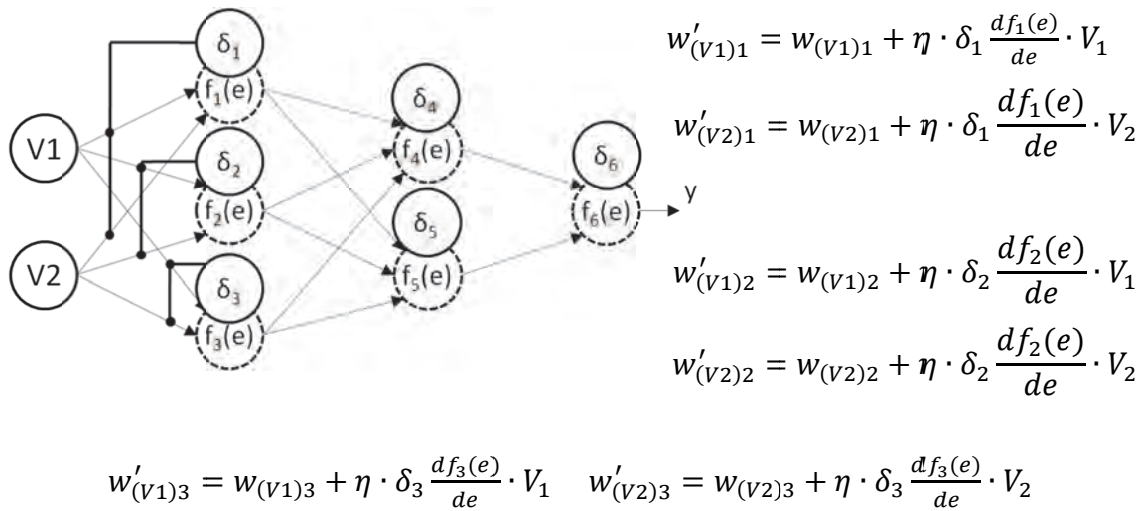
Слика П4.6 – Одређивање грешке и њено слање на други скривени слој

5. У наредном кораку се на већ описани начин грешка враћа на први скривени слој.



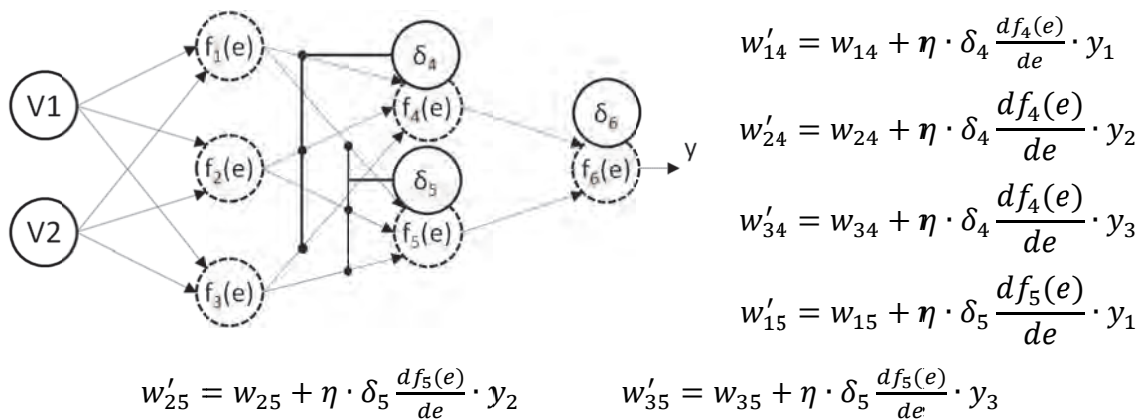
Слика П4.7 – Пренос грешке у први скривени слој

6. Сада се на основу информације о грешци спроводи корекција тежинских односа веза између улазног слоја са задатим независним параметрима и првог скривеног слоја.



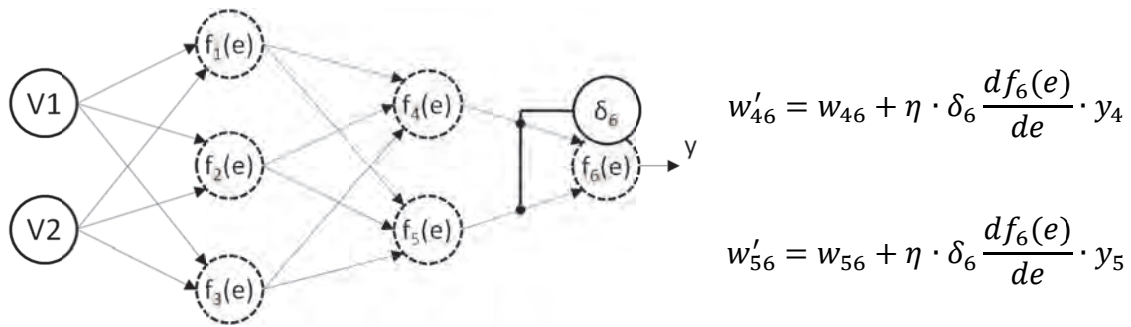
Слика П4.8 – Корекција прве групе тежинских односа

7. Следи корекција тежинских односа између скривених слојева.



Слика П4.9 – Корекција друге групе тежинских односа

8. У последњем кораку прве итерације се коригују тежински односи између последња два слоја.



Слика П4.10 – Корекција последње групе тежинских односа

Сада се читав описани поступак понавља онолико пута колико је потребно да би се на излазу из вештачке неуронске мреже добила вредност која је довољно блиска задатој зависној променљивој.

Коефицијент η представља параметар којим се одређује брзина којом мрежа „учи“. Уколико је вредност овог коефицијента велика процес проналажења најбољег решења је бржи, али постоји могућност да услед карактера промене тражене зависности и присуства локалних екстрема најбоље решење не буде пронађено. У случају мале вредности коефицијента η промене су спорије али је вероватноћа проналажења најбољег решења већа. Најчешће се у процесу „тренирања“ мреже индикатор брзине учења мења и прилагођава у зависности од добијених међурезултата.

Сам поступак није нарочито компликован али захтева велики број понављања те га је немогуће спровести без употребе рачунара. Све се додатно компликује увођењем нових неурона у слојеве или увођењем допунских скривених слојева. За потребе развоја математичког модела у овом истраживању коришћен је програм *aNETka V2.0* [59]. Овај програм није комерцијални, развијен је у LabVIEW окружењу и отвореног је типа што омогућава додатне интервенције на програмском коду уколико за то постоји потреба. Оригинална верзија програма има извесна ограничења међу којима су најзначајнија:

- дозвољен је рад са највише осам слојева неурона – улазни, излазни и шест скривених слојева,

- подржава само три типа активационих функција: линеарну, сигмоидну и хиперболички тангенс.
- једини тип вештачких неуронских мрежа који је подржан је, овде описани, *feed-forward, back-propagation* модел.

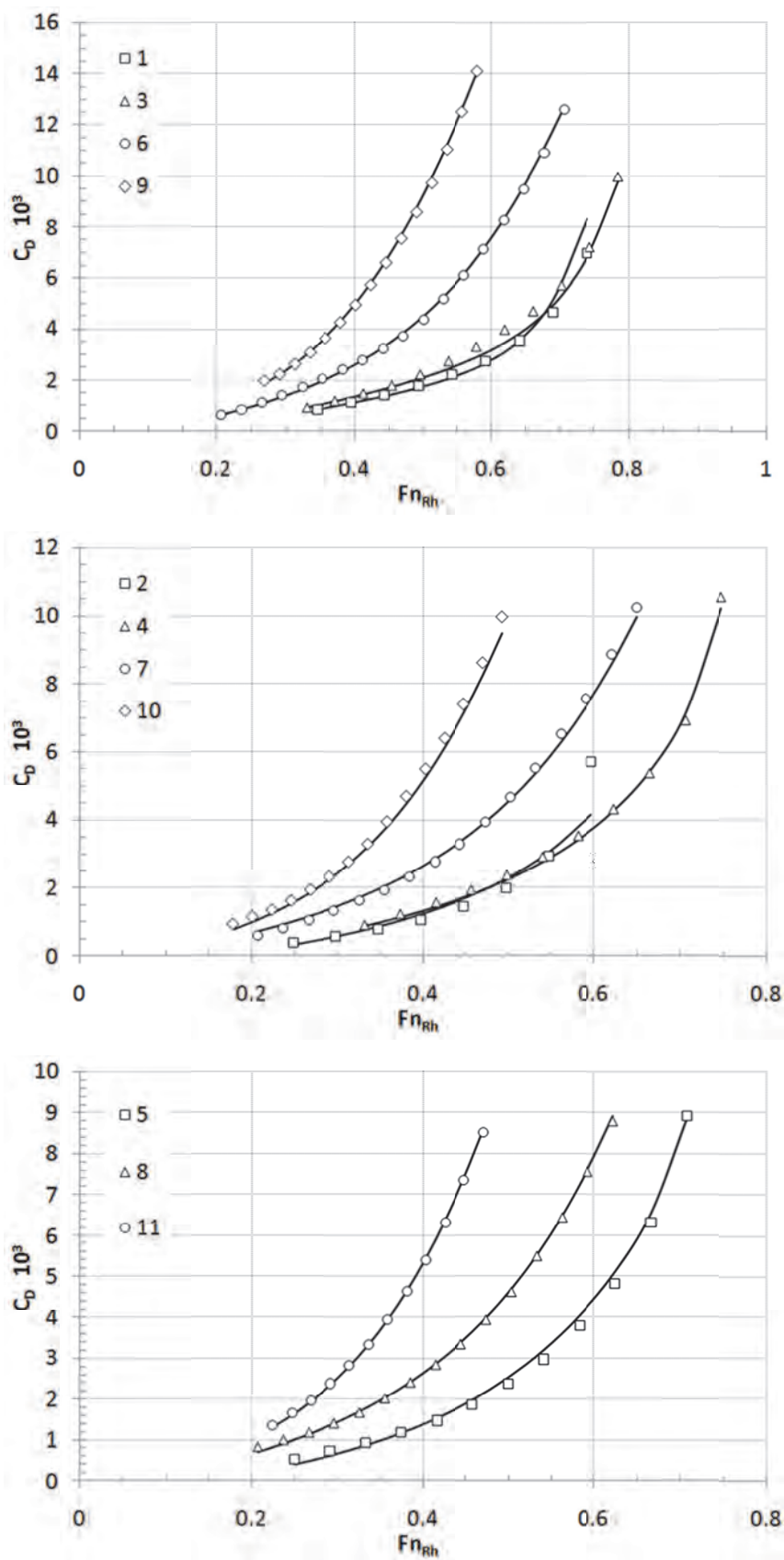
Ипак, како се показало, упркос поменутих ограничења могућности програма су више него довољне за развој тражених математичких модела.

ПРИЛОГ 5

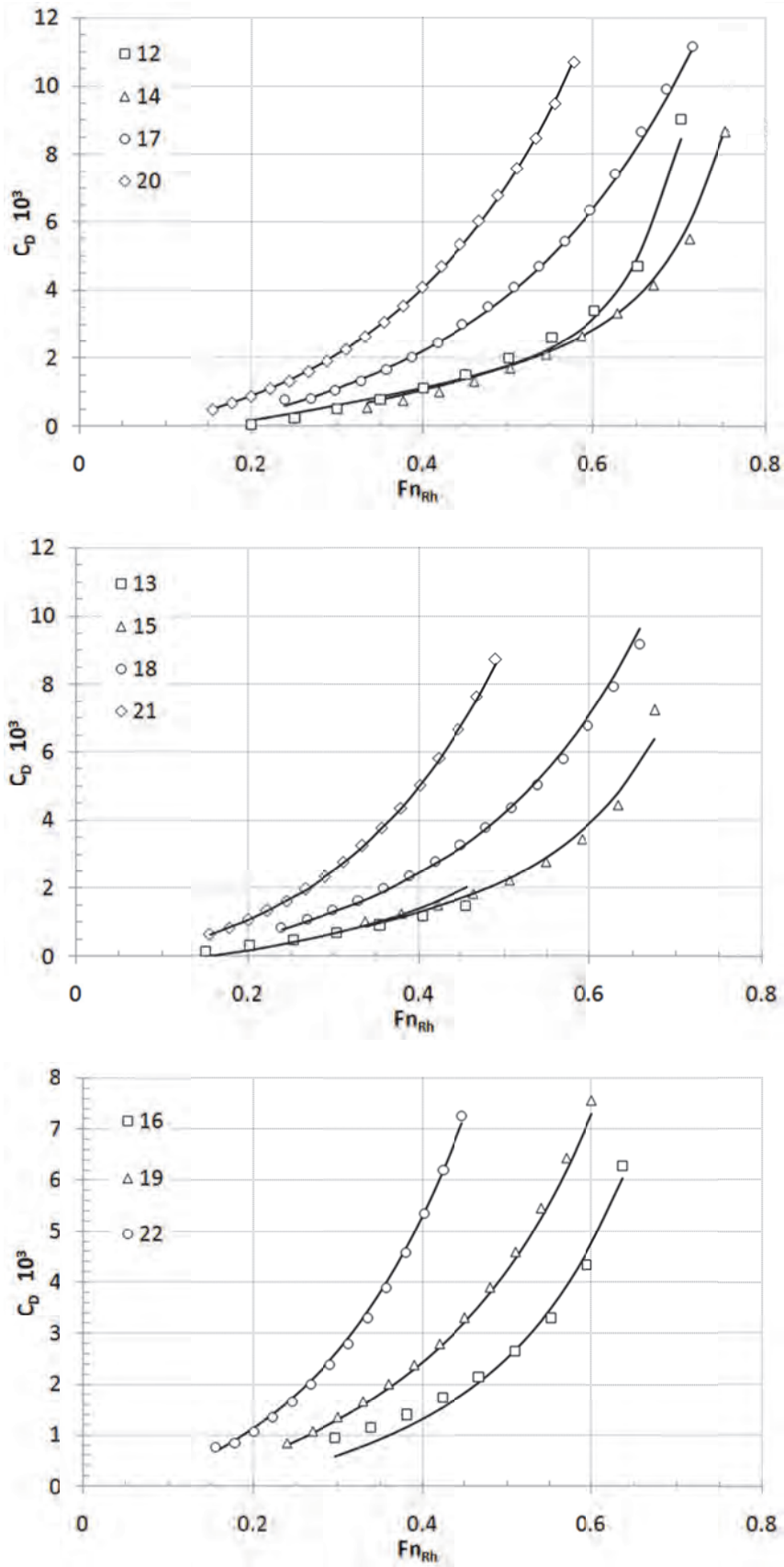
Поређење резултата добијених развијеним математичким моделом са резултатима моделских испитивања

НАПОМЕНА:

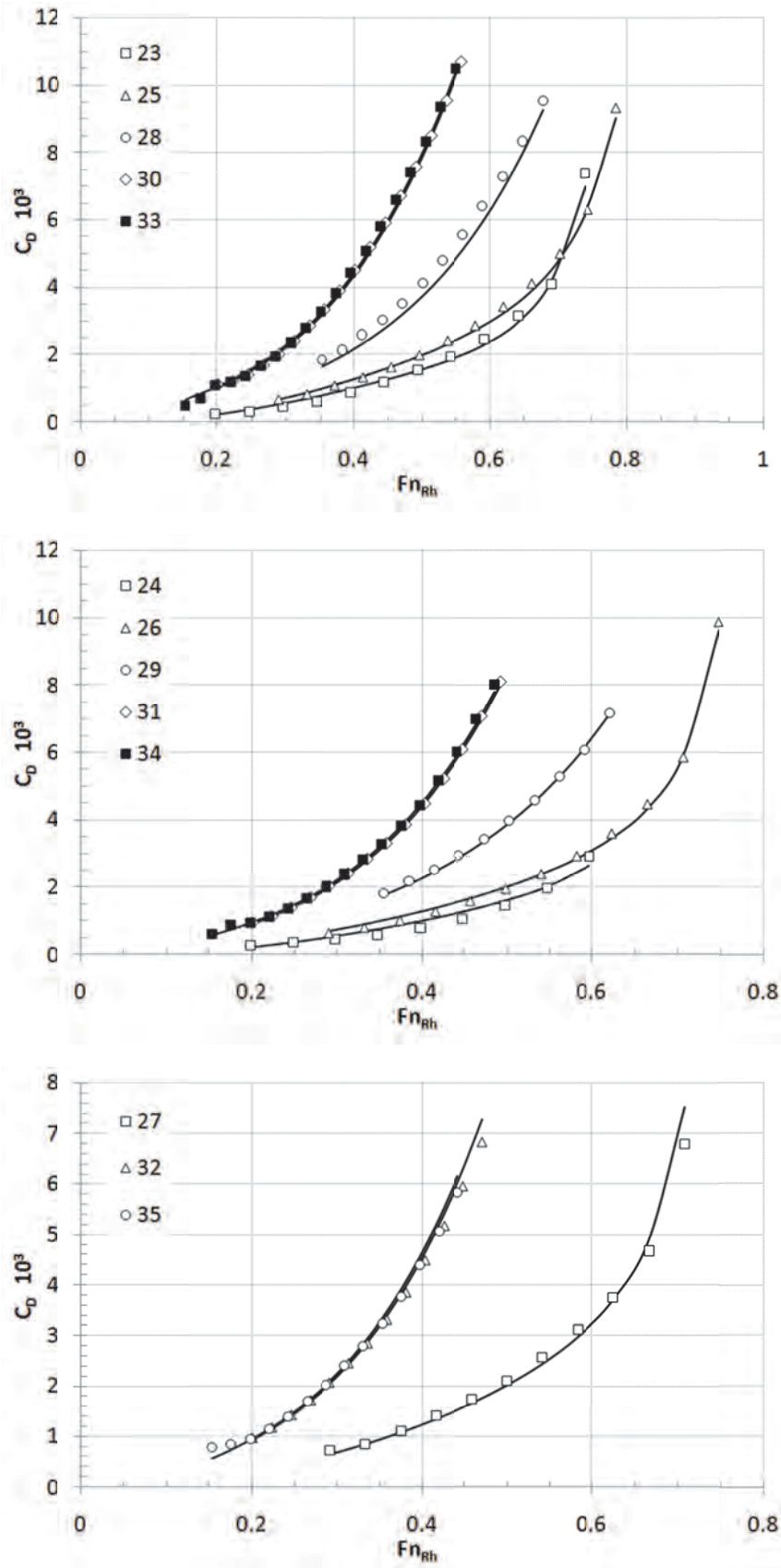
- Тачке представљају измерене вредности
- Пуне линије су добијене применом математичког модела на случајеве који су коришћени при развоју модела
- Испрекидане линије су добијене применом математичког модела на случајеве који нису коришћени приликом развоја модела



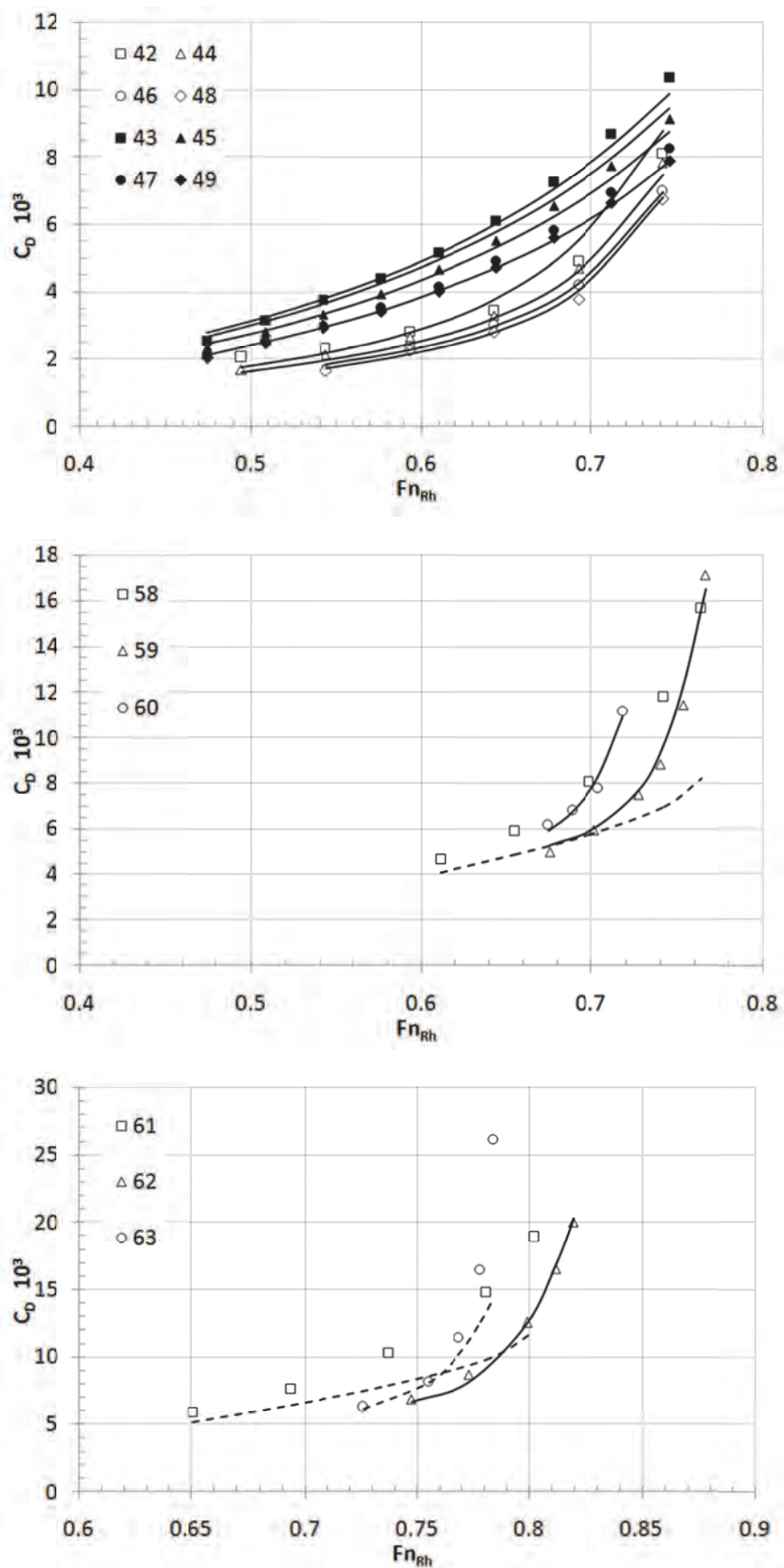
Слика П5.1 – Провера поузданости математичког модела



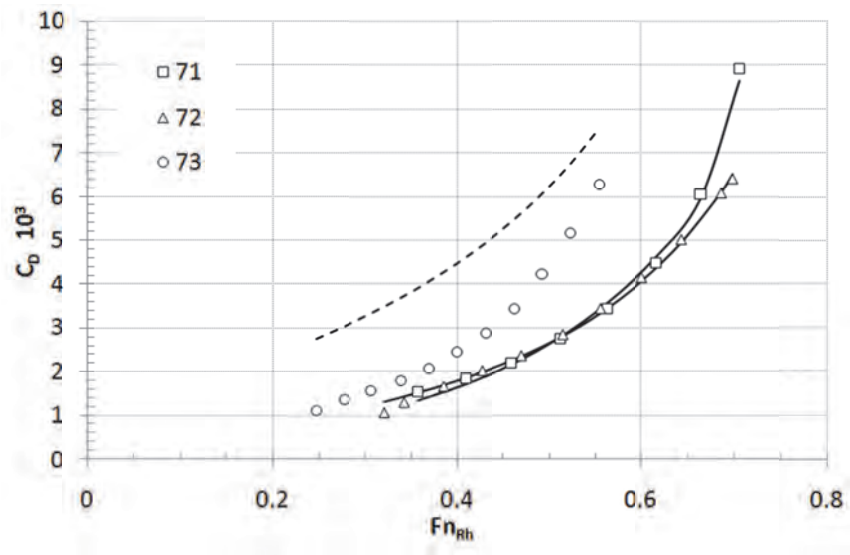
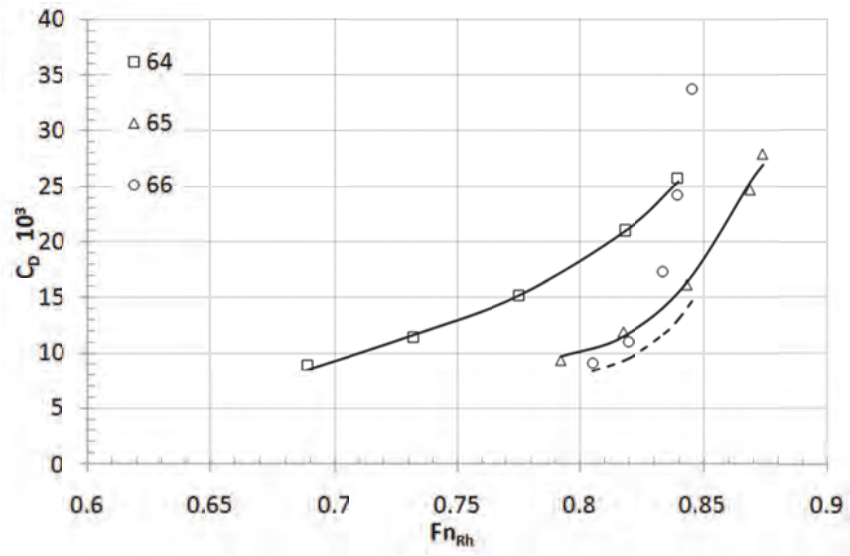
Слика П5.2 – Провера поузданости математичког модела



Слика П5.3 – Провера поузданости математичког модела



Слика П5.4 – Провера поузданости математичког модела



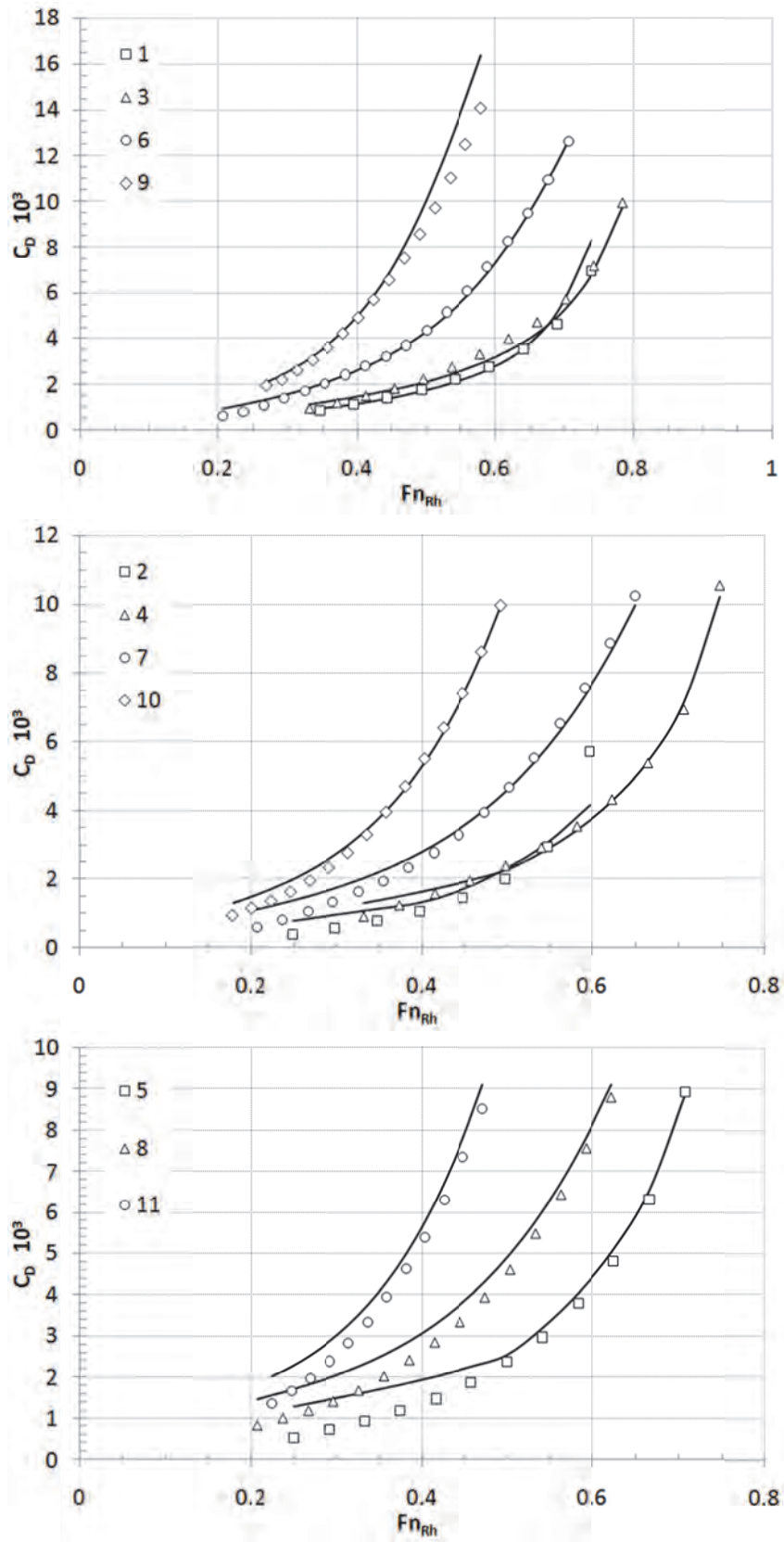
Слика П5.5 – Провера поузданости математичког модела

ПРИЛОГ 6

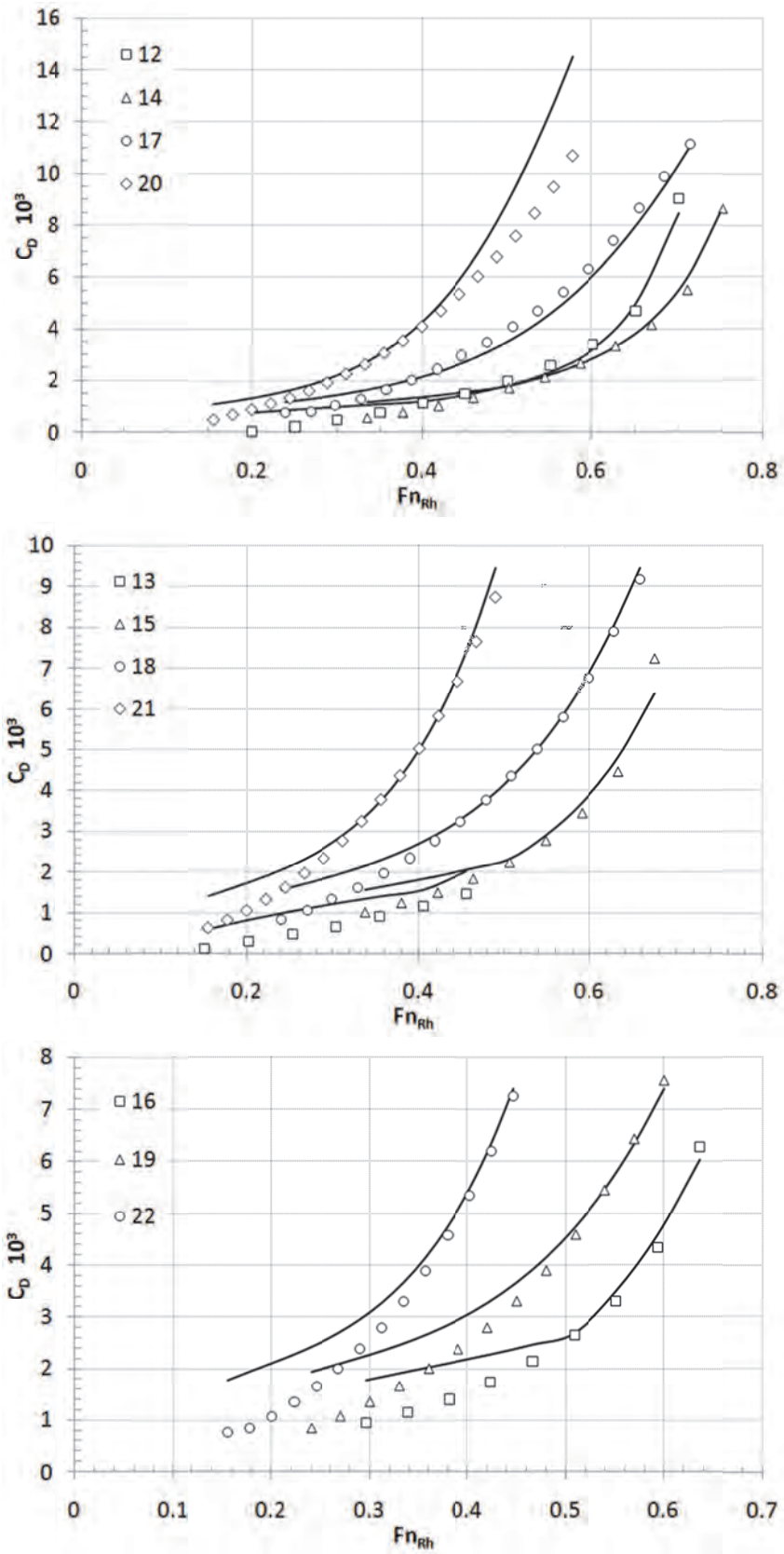
Поређење резултата добијених модификованим математичким моделом са резултатима моделских испитивања

НАПОМЕНА:

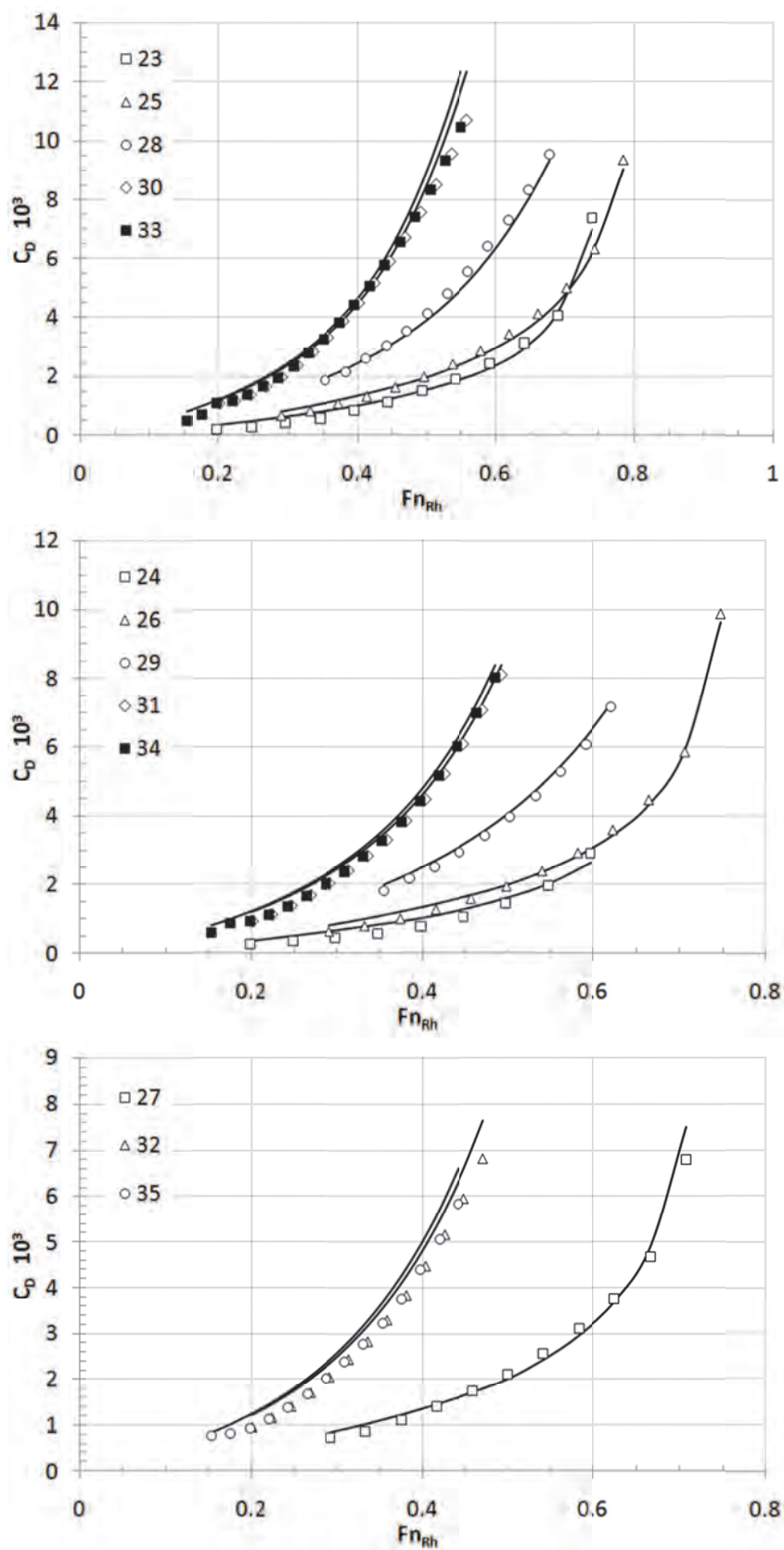
- Тачке представљају измерене вредности
- Пуне линије су добијене применом математичког модела на случајеве који су коришћени при развоју модела
- Испрекидане линије су добијене применом математичког модела на случајеве који нису коришћени приликом развоја модела



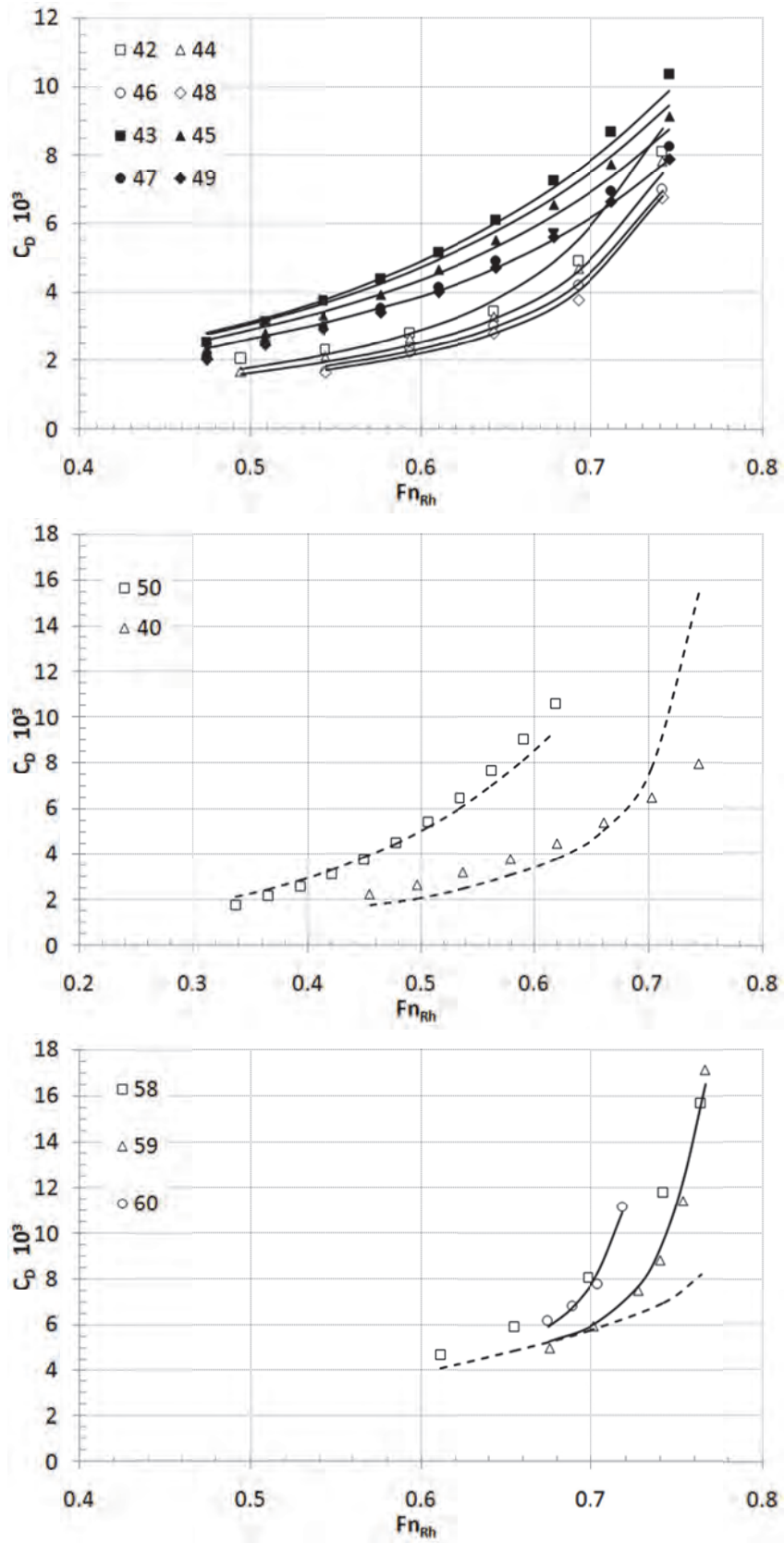
Слика П6.1 – Провера поузданости модификованог математичког модела



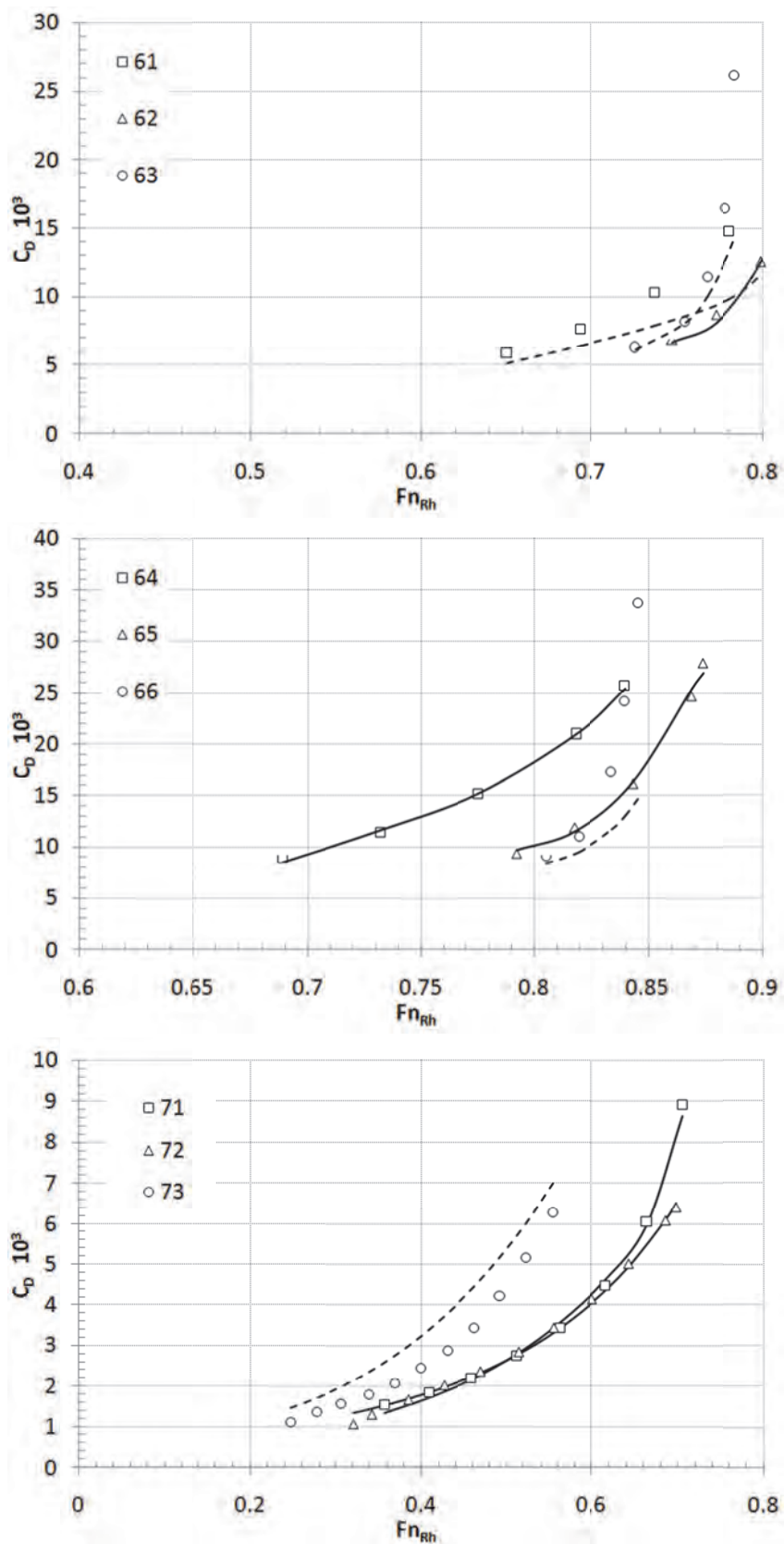
Слика П6.2 – Провера поузданости модификованог математичког модела



Слика П6.3 – Провера поузданости модификованог математичког модела



Слика П6.4 – Провера поузданости модификованог математичког модела



Слика П6.5 – Провера поузданости модификованог математичког модела

ПРИЛОГ 7

Повећање отпора брода услед деловања спољашњих утицаја

Повећање отпора услед ограничења пловног пута

Прорачун је спроведен применом метода које су описане у поглављу 6.4.1. Како би се стекла боља слика о коришћеним методама приложени су резултати који се добијају њиховом применом без обзира на специфичности ограничења пловних путева. О овоме је посебно вођено рачуна при даљој анализи добијених резултата.

Табела П7.1 – Смањење брзине брода 97

F_n	[-]	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
V	[m/s]	1.81	2.41	3.01	3.62	4.22	4.82	5.42
V	[km/h]	6.51	8.68	10.85	13.02	15.19	17.35	19.52
R_{TAP}	[kN]	6.18	10.75	17.37	27.97	45.35	72.33	111.17
$V_{Lakenbi}$	[km/h]	6.45	8.60	10.75	12.89	15.04	17.19	19.34
$V_{Landveber}$	[km/h]	6.44	8.58	10.73	12.88	15.03	17.18	19.32

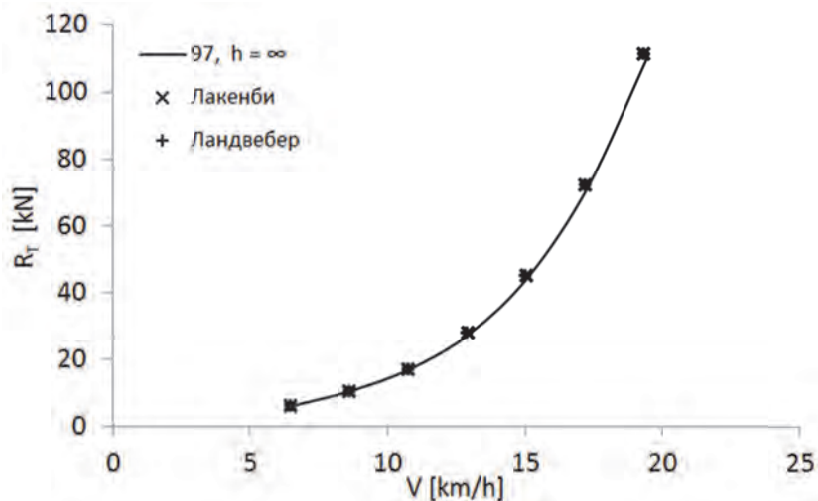
Табела П7.2 – Смањење брзине брода 89

F_n	[-]	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
V	[m/s]	1.92	2.56	3.20	3.84	4.48	5.12	5.76
V	[km/h]	6.91	9.21	11.51	13.81	16.12	18.42	20.72
R_{TAP}	[kN]	9.29	16.02	24.97	37.83	57.92	89.59	137.34
$V_{Lakenbi}$	[km/h]	5.75	7.66	9.58	11.47	13.29	14.89	16.19
$V_{Landveber}$	[km/h]	5.88	7.84	9.81	11.74	13.59	15.28	16.73

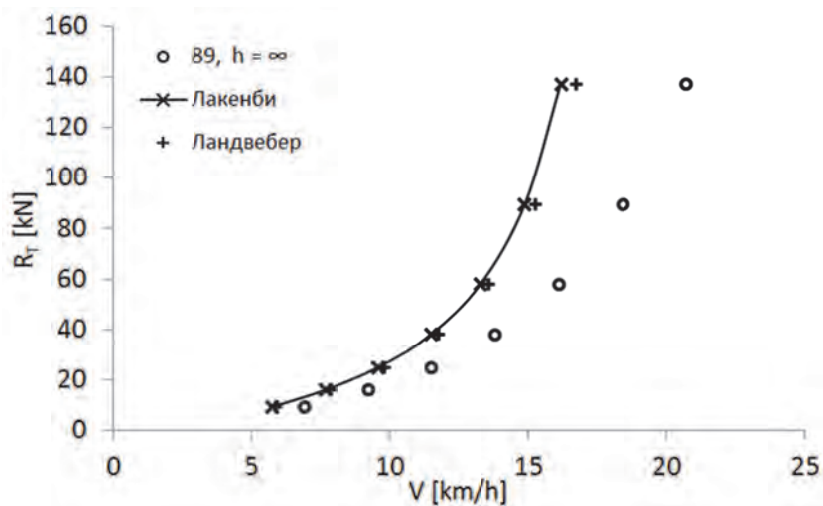
Табела П7.3 – Смањење брзине брода 96

F_n	[-]	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
V	[m/s]	1.91	2.55	3.18	3.82	4.45	5.09	5.73
V	[km/h]	6.87	9.16	11.45	13.74	16.04	18.33	20.62
R_{TAP}	[kN]	8.20	14.19	22.44	34.83	54.31	84.22	127.44
$V_{Lakenbi}$	[km/h]	5.46	7.27	9.09	10.85	12.43	13.68	14.56
$V_{Landveber}$	[km/h]	4.77	6.36	7.95	9.48	10.89	12.10	13.04

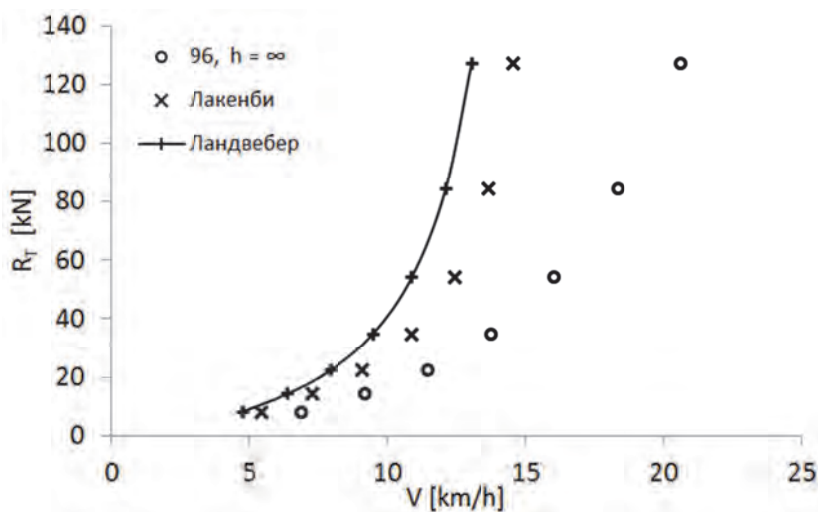
На следећим дијаграмима су добијени резултати представљени графички.



Слика П7.1 – Утицај ограничења пловног пута у случају брода 97



Слика П7.2 – Утицај ограничења пловног пута у случају брода 89



Слика П7.3 – Утицај ограничења пловног пута у случају брода 96

Повећање отпора услед кормиларења

Прорачун је спроведен у складу са препорукама које су дате у [56] и које су објашњене у поглављу 7.4.2. Додатни подаци који су потребни за прорачун су дати у следећој табели:

Табела П7.4 – Основне димензије разматраних бродова

C_B	$1-t_R$	S_k	B_k	λ_R	A_R	P	$(1-w)_m$
(-)	(-)	(m)	(m)	(-)	(m ²)	(m)	(-)
0.811	0.782	1.8	1.6	0.89	2.88	1.76	0.7
0.895	0.830	2.3	1.6	0.70	3.68	1.48	0.7
0.888	0.826	2.3	1.6	0.70	3.68	1.48	0.7

Начин на који су процењене вредности коефицијента смањеног потиска, коефицијента суструјања, димензије кормила и кораци пропелера је објашњен у поглављу 7.4.2.

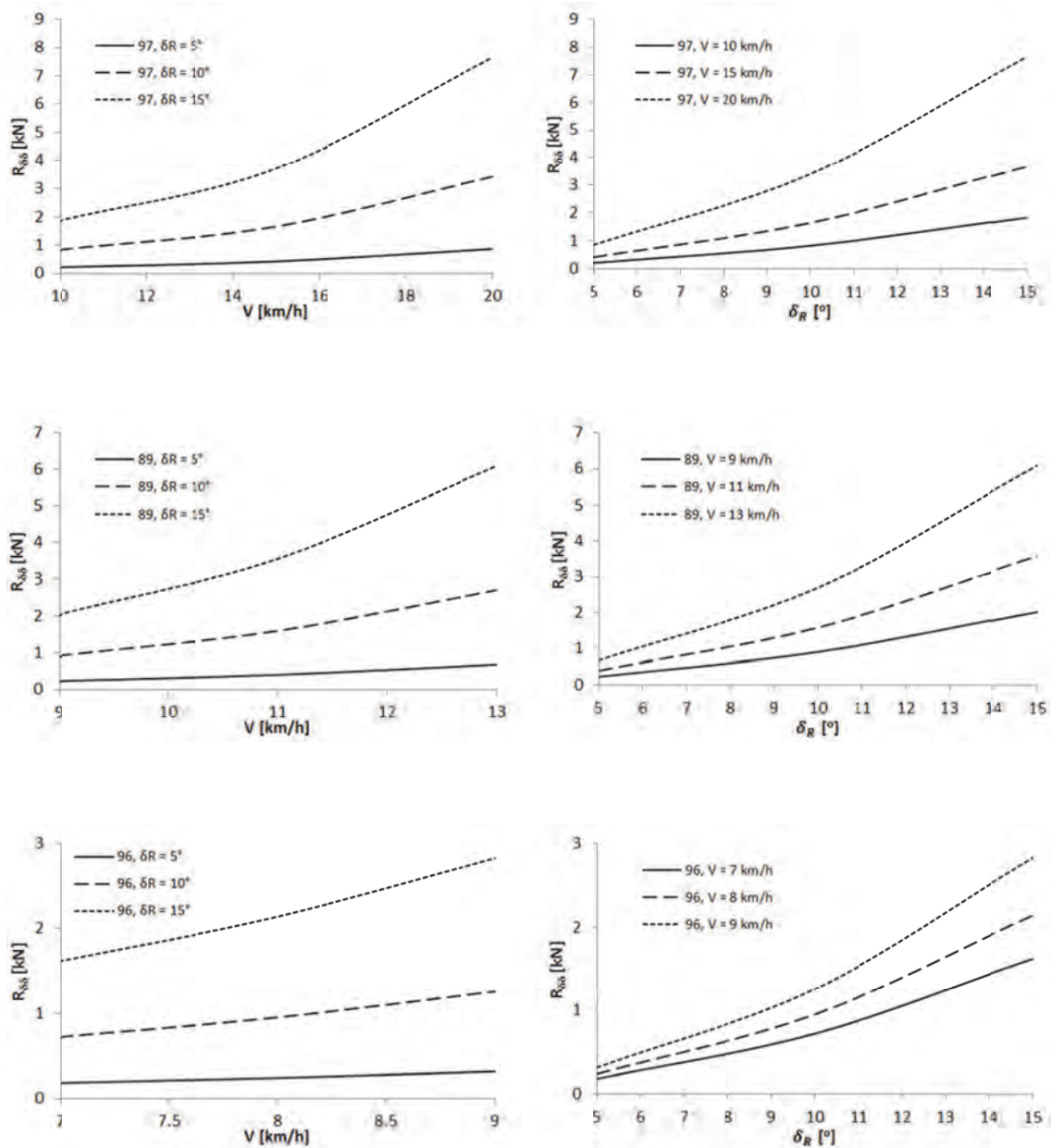
Резултати који су добијени су дати у следећој табели:

Табела П7.5 – Повећање отпора услед утицаја отклона кормила и угла заношења брода

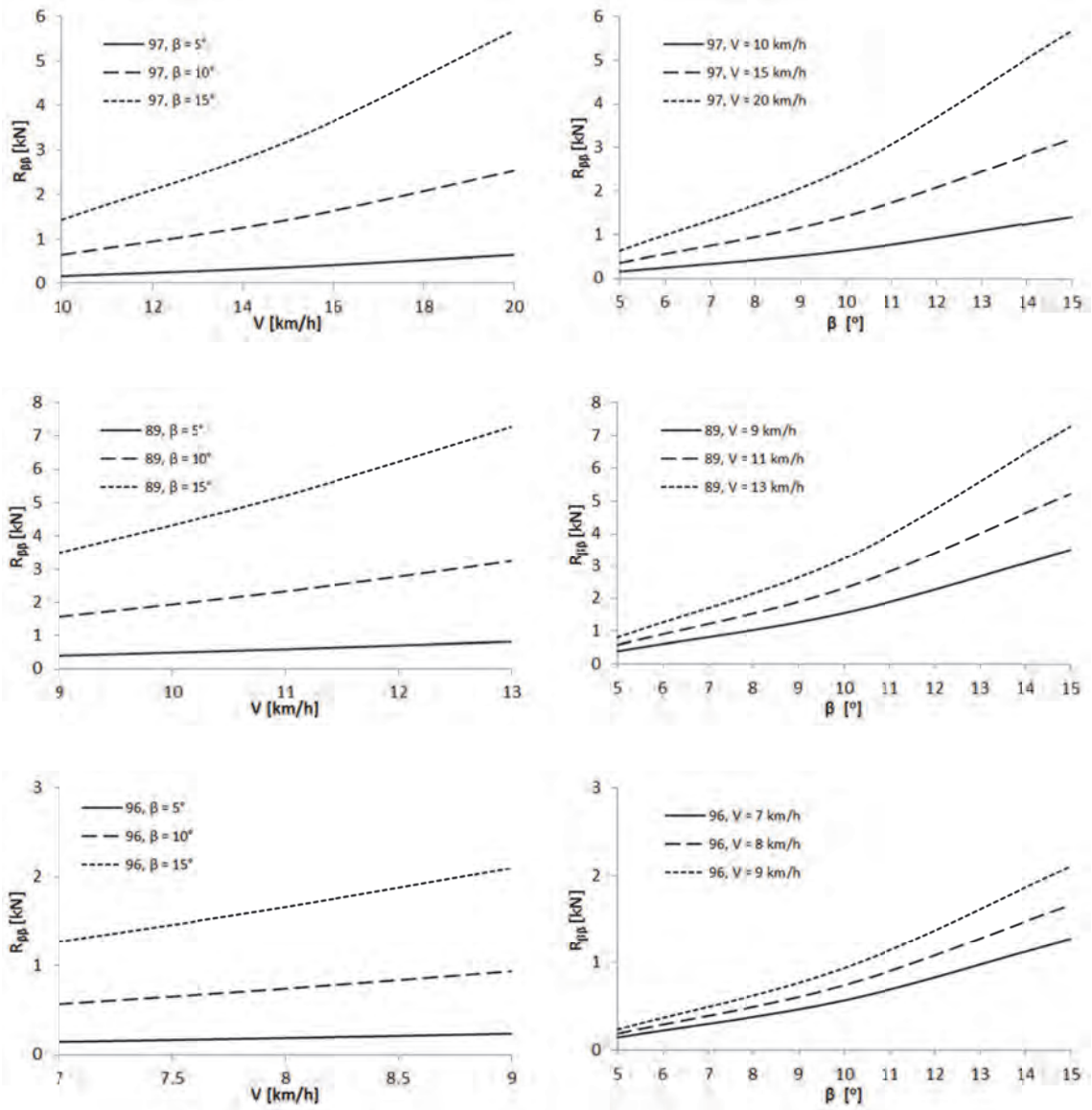
Брод	V	n	S_k	c_1	c_2	V_{eff}	R_{GG} [kN]			R_{GG} [kN]		
	[km/h]	[rpm]	(-)	(-)	(-)	[m/s]	$\delta_R = 5^\circ$	$\delta_R = 10^\circ$	$\delta_R = 15^\circ$	$\beta = 5^\circ$	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 15^\circ$
97	10	159	0.583	1	0.56	3.71	0.21	0.82	1.85	0.16	0.63	1.42
	15	220	0.548	1	0.56	5.25	0.41	1.64	3.69	0.36	1.42	3.20
	20	325	0.592	1	0.56	7.56	0.85	3.40	7.65	0.63	2.53	5.69
89	9	192	0.630	1	0.56	3.67	0.23	0.91	2.04	0.39	1.55	3.49
	11	260	0.666	1	0.56	4.86	0.40	1.59	3.57	0.58	2.32	5.21
	13	348	0.706	1	0.56	6.34	0.68	2.71	6.09	0.81	3.23	7.28
96	7	178	0.690	1	0.56	3.28	0.18	0.72	1.62	0.14	0.57	1.27
	8	205	0.692	1	0.56	3.77	0.24	0.95	2.14	0.18	0.74	1.66
	9	237	0.701	1	0.56	4.33	0.31	1.26	2.83	0.23	0.93	2.10

У прорачуну су разматрана по три угла отклона кормила и заношења брода од 5, 10 и 15 степени.

Графички приказ добијених резултата је дат на сликама П7.4 и П7.5.



Слика П7.4 – Повећање отпора брода услед утицаја отклона кормила

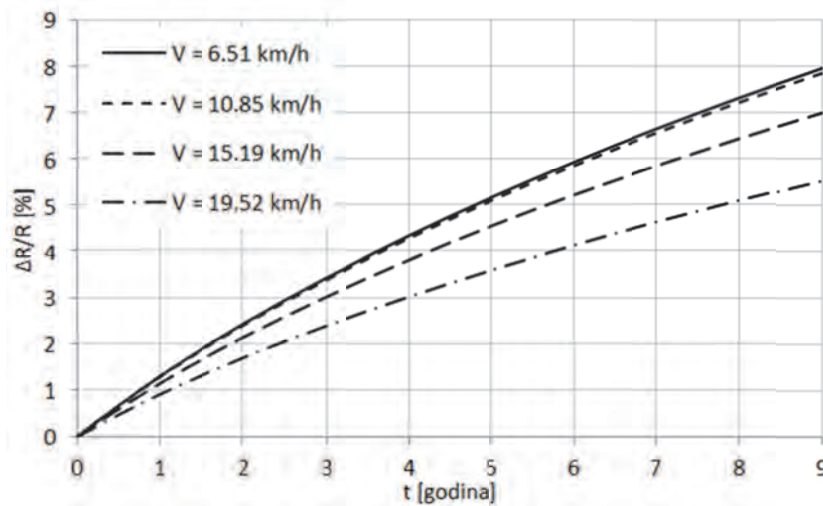


Слика П7.5 – Утицај угла заносења на повећање отпора брода

Повећање отпора услед обраштања оплате брода и пропелера

Табела П7.6 – Повећање отпора брода 97 услед обраштања оплате
(јединица за време је година)

Vreme	k [μm]	$\Delta R/R$ [%]						
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	190	1.30	1.30	1.28	1.23	1.14	1.03	0.90
2	230	2.42	2.43	2.39	2.29	2.13	1.92	1.69
3	270	3.43	3.44	3.38	3.24	3.01	2.72	2.38
4	310	4.33	4.35	4.28	4.09	3.81	3.44	3.01
5	350	5.16	5.19	5.10	4.88	4.54	4.10	3.59
6	390	5.94	5.96	5.86	5.61	5.22	4.71	4.13
7	430	6.66	6.69	6.57	6.29	5.85	5.28	4.63
8	470	7.33	7.37	7.24	6.93	6.45	5.82	5.10
9	510	7.97	8.01	7.87	7.53	7.01	6.33	5.54



Слика П7.6 – Повећање отпора брода 97 услед обраштања оплате

Утицај ветра на отпор брода

Табела П7.7 – Резултати прорачуна утицаја ветра на отпор брода: лева табела - брод за превоз расутог терета, десна табела – контејнерски брод

V_{WR} [km/h]		5	15	25	35
Ψ_{WR} [°]	C_{AA}	R_{AA} [kN]			
0	-0.956	0.045	0.407	1.129	2.213
10	-0.956	0.045	0.406	1.129	2.213
20	-0.965	0.046	0.411	1.141	2.236
30	-0.933	0.044	0.397	1.103	2.161
40	-0.839	0.040	0.357	0.992	1.944
50	-0.688	0.033	0.293	0.813	1.593
60	-0.494	0.023	0.210	0.584	1.145
70	-0.282	0.013	0.120	0.333	0.653
80	-0.073	0.003	0.031	0.086	0.169
90	0.114	-0.005	-0.049	-0.135	-0.264
100	0.268	-0.013	-0.114	-0.316	-0.620
110	0.384	-0.018	-0.163	-0.454	-0.890
120	0.467	-0.022	-0.199	-0.552	-1.082
130	0.526	-0.025	-0.224	-0.622	-1.218
140	0.571	-0.027	-0.243	-0.675	-1.323
150	0.610	-0.029	-0.259	-0.721	-1.413
160	0.639	-0.030	-0.272	-0.755	-1.479
170	0.636	-0.030	-0.270	-0.751	-1.472
180	0.550	-0.026	-0.234	-0.650	-1.273

V_{WR} [km/h]		5	15	25	35
Ψ_{WR} [°]	C_{AA}	R_{AA} [kN]			
0	-0.549	0.065	0.584	1.621	3.177
10	-0.731	0.086	0.777	2.159	4.232
20	-0.745	0.088	0.792	2.200	4.313
30	-0.667	0.079	0.710	1.971	3.864
40	-0.551	0.065	0.586	1.629	3.193
50	-0.431	0.051	0.458	1.272	2.493
60	-0.322	0.038	0.342	0.951	1.863
70	-0.230	0.027	0.244	0.678	1.329
80	-0.149	0.018	0.158	0.440	0.862
90	-0.069	0.008	0.074	0.205	0.401
100	0.022	-0.003	-0.023	-0.064	-0.126
110	0.136	-0.016	-0.144	-0.400	-0.785
120	0.278	-0.033	-0.296	-0.822	-1.610
130	0.447	-0.053	-0.476	-1.321	-2.589
140	0.628	-0.074	-0.668	-1.856	-3.637
150	0.791	-0.093	-0.841	-2.337	-4.580
160	0.887	-0.105	-0.943	-2.619	-5.133
170	0.843	-0.100	-0.896	-2.489	-4.879
180	0.561	-0.066	-0.597	-1.658	-3.249

Утицај таласа на отпор брода

Табела П7.8 – Резултати прорачуна утицаја таласа на отпор брода

ξ_W [m]	0.5	1.0	1.5
α [°]	ΔR_W [kN]		
0	1.68	6.72	15.12
10	1.67	6.69	15.05
20	1.65	6.59	14.82
30	1.61	6.42	14.45
40	1.55	6.20	13.94
50	1.48	5.92	13.32
60	1.40	5.60	12.60
70	1.31	5.25	11.81
80	1.22	4.87	10.96
90	1.12	4.48	10.09
100	1.02	4.09	9.21
110	0.93	3.72	8.36
120	0.84	3.36	7.57
130	0.76	3.04	6.85
140	0.69	2.77	6.23
150	0.64	2.54	5.73
160	0.59	2.38	5.35
170	0.57	2.28	5.13
180	0.56	2.24	5.05

ξ_W [m]	ΔR_W [kN]
0.00	0.00
0.20	0.27
0.40	1.08
0.60	2.42
0.80	4.30
1.00	6.72
1.20	9.68
1.40	13.17
1.60	17.21
1.80	21.78
2.00	26.88

Утицај температуре воде на отпор брода

Табела П7.9 – Прорачун ефективне снаге брода 97 при температурама воде од 5 и 30 °C

F_n	[-]	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
V	[m/s]	1.81	2.41	3.01	3.62	4.22	4.82	5.42
V	[km/h]	6.51	8.68	10.85	13.02	15.19	17.35	19.52
T = 5° c								
R _n 10 ⁻⁹	[-]	1.1026	1.4702	1.8377	2.2053	2.5728	2.9404	3.3079
C _F 10 ³	[-]	2.0542	1.9718	1.9113	1.8638	1.8251	1.7925	1.7645
R _F	[kN]	4.12	7.04	10.66	14.97	19.95	25.59	31.88
R _w	[kN]	0.00	0.14	1.17	4.97	14.21	31.60	59.30
R _A	[kN]	0.80	1.43	2.23	3.21	4.37	5.71	7.23
R _T	[kN]	6.10	10.59	17.07	27.38	44.16	70.13	107.41
P _{E BH}	[kW]	11.02	25.53	51.43	98.98	186.29	338.06	582.52
T = 30° c								
R _n 10 ⁻⁹	[-]	2.0887	2.7849	3.4811	4.1774	4.8736	5.5698	6.2660
C _F 10 ³	[-]	1.8778	1.8057	1.7526	1.7109	1.6768	1.6481	1.6234
R _F	[kN]	3.75	6.42	9.73	13.68	18.25	23.43	29.21
R _w	[kN]	0.00	0.14	1.17	4.95	14.15	31.47	59.05
R _A	[kN]	0.80	1.42	2.22	3.20	4.35	5.69	7.20
R _T	[kN]	5.62	9.79	15.87	25.69	41.90	67.19	103.69
P _{E BH}	[kW]	10.2	23.6	47.8	92.9	176.8	323.9	562.4

Биографија

Име и презиме: Александар Симић
Датум рођења: 08. Јули 1972.
Место рођења: Београд
Породично стање: Ожењен, двоје деце

Школовање

1979 – 1987. Основна школа „Алекса Шантић“ у Београду
1987 – 1991. Шеста београдска гимназија
1991 – 1998. Студије на Машинском факултету у Београду, Катедра за бродоградњу
08.07.1998. Одбрањен дипломски рад из предмета *Пројектовање брода* са темом „Анализа основних параметара савремених вишенаменских теретних бродова“
1998. – 2000. Постдипломске студије на Машинском факултету у Београду на Катедри за бродоградњу
17.05.2005. Одбрањен магистарски рад са темом „Методe за одређивање својстава управљивости“

Кретање у послу

1998 – 1999. Сарадник у настави на Катедри за бродоградњу финансиран од стране завода за тржиште рада
1999 – 2005. Асистент приправник на Катедри за бродоградњу
2005 – Асистент на Катедри за бродоградњу

Изјава о ауторству

Потписани Александар Симић

број уписа -

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Енергетска ефикасност речних самоходних теретних бродова

- 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 докторанта

У Београду, септембар 2012.

Александар Симић

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Александар Симић
Број уписа: -
Студијски програм: -
Наслов рада: **Енергетска ефикасности речних самоходних
теретних бродова**
Ментор: проф др. Милан Хофман

Потписани Александар Симић

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

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

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

Потпис докторанта

У Београду, септембар 2012.

А. Симић

Изјава о коришћењу

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

Енергетска ефикасност речних самоходних теретних бродова

која је моје ауторско дело.

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

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

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

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

У Београду, септембар 2012.



Потпис докторанта

А. Симић