

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Aleksandar N. Radonjić

**PRILOG ISTRAŽIVANJU ANALITIČKIH
METODA ZA PRORAČUN TEHNIČKO-
EKSPLOATACIONIH POKAZATELJA
BRODOVA DUNAVSKE PLOVNE MREŽE
U CILJU POBOLJŠANJA PLOVIDBE**

doktorska disertacija

Beograd, 2014

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Aleksandar N. Radonjić

**PRILOG ISTRAŽIVANJU ANALITIČKIH
METODA ZA PRORAČUN TEHNIČKO-
EKSPLOATACIONIH POKAZATELJA
BRODOVA DUNAVSKE PLOVNE MREŽE
U CILJU POBOLJŠANJA PLOVIDBE**

doktorska disertacija

Beograd, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Aleksandar N. Radonjić

**ANALYTICAL METHODS FOR
CALCULATION OF DANUBIAN
VESSELS' PERFORMANCE
CHARACTERISTICS IN ORDER TO
IMPROVE NAVIGATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

Mentor:

Prof. dr Katarina Vukadinović, dipl. inž. saob., redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Saobraćajnog fakulteta

Članovi Komisije:

Prof. dr Zlatko Hrle, dipl. inž. saob., redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Saobraćajnog fakulteta,

Prof. dr Dragutin Kostić, dipl. inž. el., redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Saobraćajnog fakulteta,

Prof. dr Milan Hofman, dipl. inž. maš., redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Mašinskog fakulteta, u penziji

Prof. dr Vladimir Škiljaica, dipl. inž. saob., redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, u penziji

Datum odbrane:

IZJAVA ZAHVALNOSTI

Doktorska disertacija je nastala kao rezultat zalaganja više ljudi i pojedinaca koji su svoje vreme i znanje uložili da ona postane stvarnost.

Veliku zahvalnost (za uloženi napor i rad) dugujem i od sveg srca je upućujem Mentoru prof. dr Katarini Vukadinović. Želim posebno da se zahvalim prof. dr Vladeti Čoliću na korisnim predlozima kako bi disertacija dobila svoj konačan oblik i kako bi imala praktičnu primenu.

Svim članovima Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije zahvaljujem na pruženim savetima, uloženom vremenu, podršci i pomoći tokom izrade doktorske disertacije.

Zahvaljujem se kolegama sa vodnog Odseka koji su me hrabрили i kritikovali zarad mog napretka.

Na kraju, zahvalnost dugujem i mojoj porodici zbog pažnje i vremena koje sam im uskratio i zbog prihvatanja da se prilagođavaju mojim potrebama tokom izrade doktorske disertacije.

PRILOG ISTRAŽIVANJU ANALITIČKIH METODA ZA PRORAČUN TEHNIČKO- EKSPLOATACIONIH POKAZATELJA BRODOVA DUNAVSKE PLOVNE MREŽE U CILJU POBOLJŠANJA PLOVIDBE

Rezime

Predmet istraživanja ovog doktorskog rada je snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Istraživanje se zasniva na izvršenim eksperimentalnim ispitivanjima brodova-potiskivača koji su bili u potiskivanim sklopovima tokom ispitivanja. Eksperimentalna ispitivanja brodova-potiskivača su obavljena na dunavskoj plovnoj mreži. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja brodova-potiskivača pokazali su da se dobijaju prihvatljive vrednosti za snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača.

Istraživanjem različitih analitičkih metoda zaključeno je da se ne mogu dobiti dovoljno precizne vrednosti snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Zbog toga je razvijen matematički model za proračun snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača kao izlazne vrednosti iz modela. Matematičkim modelom omogućeno je modeliranje preslikavanja vrednosti ulaznih u vrednosti izlazne promenljive (snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača). Predložen je model jedne veštačke neuronske mreže za proračun snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Kako ni ova metodologija nije dala rezultate očekivane tačnosti, usvojen je model skupa veštačkih neuronskih mreža (“Ensemble Neural Networks“). Veštačke neuronske mreže su odabrane zbog tačnosti i jednostavnosti modeliranja preslikavanja vrednosti ulaznih u vrednosti izlazne promenljive.

Po određivanju metodologije za modeliranje preslikavanja vrednosti ulaznih u vrednosti izlazne promenljive za ulazne veličine uzete su brzine plovidbe potiskivanih sklopova u mirnoj vodi, glavne dimenzije ispitivanih potiskivanih sklopova i deplasman potiskivanih sklopova. Određena je i jedna izlazna promenljiva i ona je snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Glavni cilj disertacije je da se odredi funkcionalna veza između pomenutih ulaznih i jedne izlazne promenljive čime se zahtevi za eksperimentalnim ispitivanjima brodova-potiskivača smanjuju.

Osnovni skup podataka sa eksperimentalnih ispitivanja je podeljen na skup podataka za obučavanje i skup podataka za testiranje. Pre obučavanja i testiranja veštačkih neuronskih mreža usvojena je konfiguracija neuronske mreže na osnovu Akaike informacionog kriterijuma. Po obučavanju i testiranju veštačkih neuronskih mreža izvršen je proračun izlaznih rezultata, sprovedena je analiza izlaznih rezultata i određene su granice primene modela skupa VNM.

Na osnovu obučavanja VNM napravljen je originalni model skupa VNM koji se predlaže za proračun potrebne snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača u zavisnosti od brzine plovidbe sklopa u mirnoj vodi, glavnih dimenzija sklopa i deplasmana sklopa. Model je primenljiv na različite sklopove potiskivanih teretnjaka koji su učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima.

Takođe, model skupa VNM je ispitan i primenjen na potiskivane sklopove koji nisu učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima. Napravljeno je nekoliko ekstrapolacionih krivih za brzine plovidbe sklopova i dimenzije sklopova koji nisu učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima. Ekstrapolacione krive su pokazale da je model skupa VNM moguće praktično primeniti za potrebe brodarstava.

Na osnovu dobijene funkcionalne veze zapovednici i posade brodova dobiće neophodne podatke o operativnim karakteristikama rada određenih potiskivanih sklopova. Doprinosi doktorske disertacije su sledeći:

- Prepoznavanje potrebe da se modeliraju tehničko-eksploatacioni pokazatelji brodova;
- Uspostavljanje veza između snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača, brzine plovidbe sklopa u mirnoj vodi, deplasmana potiskivanog sklopa i glavnih dimenzija potiskivanog sklopa;
- Predlog da se analitičke metode i model jedne veštačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unapred zamene modelom skupa VNM koji ima bolje performanse;
- Jednostavnost modeliranja podataka predloženom metodologijom i mogućnost uključivanja novih podataka sa eksperimentalnih ispitivanja u model;
- Razvijanje originalnog modela skupa VNM pomoću Akaike informacionog kriterijuma za potrebe rešavanja različitih problema u oblasti određivanja snage glavnog pogonskog motora broda;
- U odnosu na prethodne primenjivane metodologije određivanja snaga na propelerskim vratilima brodova, primenjena metodologija u doktorskoj disertaciji predstavlja novu i

unapređenu metodologiju koja može imati široku primenu pri rešavanju različitih problema u oblasti vodnog saobraćaja;

- Proračunavanje veoma preciznih izlaznih rezultata pomoću modela skupa VNM za parove podataka koji se nalaze u skupu podataka za obučavanje i za ostale parove podataka koji pripadaju skupu podataka za testiranje;
- Smanjenje potrebe za sprovođenjem eksperimentalnih ispitivanja potiskivanih sklopova čije su forme i dimenzije slične razmatranim potiskivanim sklopovima upotrebom razvijenog modela skupa VNM;
- Demonstracija primene modela za potrebe proračuna snaga brodova-potiskivača koji nisu učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima (nisu bili deo baze podataka). U tu svrhu je definisano nekoliko varijanti rešenja koje su pokazale da je većina izlaznih vrednosti na nivou onih koje se javljaju u praksi pri stvarnoj plovidbi.
- Povećanje tačnosti izlaznih vrednosti proračuna snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača upotrebom modela skupa VNM u odnosu na analitičke modele i pojedinačne modele veštačkih neuronskih mreža;
- Rezultati istraživanja i predložen model skupa VNM mogu da se koriste u praksi za potrebe rešavanja različitih problema koji se javljaju u brodarskim preduzećima.
- Korišćenje predloženog modela moglo bi da utiče na dalji razvoj i inovacije kod modeliranja različitih vrsta podataka u oblasti unutrašnjeg vodnog saobraćaja.

Ključne reči: snaga na propelerskim vratilima broda, brzina plovidbe potiskivanog sklopa u mirnoj vodi, eksperimentalna ispitivanja plovidbenih osobina brodova, veštačke neuronske mreže, skupovi neuronskih mreža, model skupa veštačkih neuronskih mreža, *AIC* kriterijum

Naučna oblast: Saobraćajno inženjerstvo

Uža naučna oblast: Plovna sredstva

UDK: 656.6(043.3)

ANALYTICAL METHODS FOR CALCULATION OF DANUBIAN VESSELS' PERFORMANCE CHARACTERISTICS IN ORDER TO IMPROVE NAVIGATION

Abstract

The subject of this doctoral thesis is the towboat shaft power required to propel pushed convoys. The research is based on the performed full-scale trials obtained at the serbian part of the river Danube.

The main aim of the dissertation is to determine the functional relationship between the pushed convoy speeds through water and towboat shaft powers according to main dimensions of pushed convoys. On the basis of functional relationships between pushed convoy speeds through water and towboat shaft powers ship captains and crews will receive the necessary information about the operating characteristics of the certain pushed convoys.

Data modelling was performed by using Artificial neural networks. Data modeling is performed by using artificial neural networks. Artificial neural networks have been chosen as being the most suitable data analytic method with abilities to effectively work with highly nonlinear and multi-dimensional data, their modeling flexibility, their generalization ability, their adaptability and good predictive ability.

Ensembles of neural networks with their component networks were used to predict towboat shaft power. The entire set of experimental data was divided into a training data set and testing data set. Before the training of component artificial neural networks, Akaike information criterion was adopted to rank several configurations of networks. According to their rankings, several component networks with different architectures were selected to make ensemble. Once that training of component networks was finished, the analysis of output results was made and the boundaries of the model of Ensemble of neural network was determined.

In this paper the original model of neural network ensemble is proposed to calculate the required towboat shaft power as well as to select appropriate towboat installed power depending on the pushed convoy speed and main dimensions. The model is applicable to different pushed convoys that were part of full-scale trials.

The model of neural network ensemble is tested and applied to pushed convoys that were not the part of full-scale trials. Several trend lines were made for pushed convoys that were not the part of the full-scale trials. Trend lines showed that this model can be used for the real problems in shipping.

KEYWORDS: towboat shaft power, pushed convoy speed through water, full-scale speed power trials, artificial neural networks, ensembles of neural networks, ensemble neural network model, *AIC* criterium

Scientific discipline: Transport and traffic engineering

Scientific subdiscipline: Vessels

UDK: 656.6(043.3)

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. POTISKIVANI SKLOPOVI U SAVREMENOM VODNOM TRANSPORTU.....	8
2.1. PLOVIDBA REKOM DUNAV.....	10
2.2. OSOBENOSTI SISTEMA POTISKIVANIH SKLOPOVA.....	12
2.2.1. Potiskivani teretnjaci.....	13
2.2.2. Brodovi-potiskivači.....	15
3. OPŠTA RAZMATRANJA O EKSPERIMENTALNIM ISPITIVANJIMA PLOVIDBENIH OSOBINA IZGRAĐENIH BRODOVA I NUMERIČKIM METODAMA ZA PRORAČUN SNAGE GLAVNOG POGONSKOG MOTORA. 16	
3.1. ISPITIVANJE MODELA BRODOVA U ISTRAŽIVAČKIM BAZENIMA.....	16
3.1.1. Opšti pojmovi.....	16
3.1.2. Principi modeliranja.....	18
3.2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA IZGRAĐENIH BRODOVA NA PLOVNOM PUTU.....	19
3.2.1. Eksperimentalna ispitivanja potiskivanih sklopova na unutrašnjim plovnim putevima.....	22
3.2.1.1 Pravila koja se odnose na brodove unutrašnje plovidbe Ruskog registra brodova koji obavljaju plovidbu na Dunavu.....	23
3.2.1.2 Preporuke Dunavske komisije koje se odnose na plovidbene osobine potiskivačkih sastava	24
3.2.1.3 Pravila o načinu obavljanja probne vožnje brodova i zonama plovidbe na delu plovnih puteva Dunava, Save i Tise u Republici Srbiji.....	27
3.2.2. Eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova.....	28
3.2.2.1 Priprema eksperimentalnih ispitivanja.....	30
3.2.2.2 Veličine koje se očitavaju tokom samog merenja.....	33
3.2.2.3 Prirodni režim plovnog toka i stanje broskog kompleksa tokom eksperimentalnih ispitivanja.....	36
3.2.2.4 Procedura eksperimentalnih ispitivanja.....	38
3.2.3. Pouzdanost eksperimentalnih ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova.....	40
3.3. NUMERIČKE METODE ZA PRORAČUN SNAGE GLAVNOG POGONSKOG MOTORA.....	42
4. PREGLED ISPITIVANJA IZGRAĐENIH BRODOVA-POTISKIVAČA (PODACI DOBIJENI NA OSNOVU EKSPERIMENTALNIH MERENJA).....	60
4.1. PREGLED ISPITIVANJA BRODOVA POTISKIVAČA.....	61
4.2. ISPITIVANJE BRZINE PLOVIDBE POTISKIVANIH SKLOPOVA U ZAVISNOSTI OD SNAGE POGONSKIH MOTORA BRODA-POTISKIVAČA.....	63
4.3. PRIKAZ DOSADAŠNJIH ISPITIVANJA IZGRAĐENIH BRODOVA-POTISKIVAČA.....	64

5. NAČINI MERENJA BRZINE PLOVIDBE, BRZINE REČNOG TOKA I SNAGE NA PROPELERSKIM VRATILIMA BRODA	74
5.1. MERENJE BRZINE REČNOG TOKA I BRZINE BRODA U ODNOSU NA VODU	74
5.1.1. Hidrometrijsko krilo	74
5.1.2. Elektronski uređaj za merenje brzine rečnog toka (strujanja vode), odnosno brzine plovidbe broda u odnosu na vodu.....	77
5.1.2.1 Merenje brzine rečnog toka	79
5.1.2.2 Merenje brzine plovidbe broda u odnosu na vodu	79
5.1.2.3 Mogućnost očitavanja podataka sa ekrana PC računara	79
5.2. MERENJE BRZINE PLOVIDBE BRODA U ODNOSU NA OBALU (TEHNIČKA BRZINA).....	81
5.2.1. Merenje brzine na mernom kilometru.....	81
5.2.2. Merenje brzine globalnim pozicionim sistemom (GPS).....	82
5.3. MERENJE BROJA OBRTAJA PROPELERSKIH VRATILA	83
5.4. MERENJE SNAGE NA PROPELERSKOM VRATILU	84
5.4.1. Torziometarsko merenje snage	85
5.4.2. Merenja momenta i snage na propellerskim vratilima pomoću merne trake	88
6. PREDLOG MODELA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA ZA PRORAČUN SNAGE MOTORNIH POTISKIVAČA.....	90
6.1. NEURON.....	90
6.2. GLAVNE OSOBINE VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA	95
6.3. TOPOLOGIJA (ARHITEKTURA) VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA.....	96
6.3.1. Veštačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unapred	98
6.3.2. Šum.....	100
6.4. OBUČAVANJE VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE	102
6.4.1. Algoritam za obučavanje perceptrona.....	102
6.4.2. Algoritam povratnog prostiranja greške	103
6.4.3. Uticaj različitih činilaca na algoritam povratnog prostiranja greške.....	107
6.4.3.1 Početne vrednosti težina grana mreže.....	107
6.4.3.2 Normalizacija (standardizacija) podataka.....	109
6.4.3.3 Koeficijent obučavanja (η)	112
6.4.3.4 Funkcija cilja	113
6.4.3.5 Inercija (momentum član ili faktor).....	113
6.4.3.6 Pravila korekcija vrednosti težina grana mreže	114
6.5. METODE OBUČAVANJA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA SA UČITELJEM	119
6.6. BROJ ČVOROVA U SKRIVENOM SLOJU.....	122
6.6.1. Primena Akaike informacionog kriterijuma kod usvajanja arhitekture veštačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unapred	124
6.7. SKUPOVI VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA	125

6.7.1. Formiranje modela skupa VNM na osnovu Akaike informacionog kriterijuma.....	128
7. PRIMENA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA NA PRORAČUN TEHNIČKO- EKSPLOATACIONOG POKAZATELJA SNAGE NA PROPELERSKIM VRATILIMA BRODOVA-POTISKIVAČA	131
7.1. OCENA MODELA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA SA PROSTIRANJEM SIGNALA UNAPRED	132
7.2. MODELIRANJE PRESLIKAVANJA VREDNOSTI ULAZNIH PROMENLJIVIH U VREDNOSTI IZLAZNE PROMENLJIVE VEŠTAČKIM NEURONSKIM MREŽAMA SA PROSTIRANJEM SIGNALA UNAPRED	133
7.3. PRORAČUN SNAGE NA PROPELERSKIM VRATILIMA BRODOVA- POTISKIVAČA PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA SA PROSTIRANJEM SIGNALA UNAPRED	135
7.3.1. Značaj razmatranja odnosa snage broda-potiskivača i brzine plovidbe sastava potiskivanih teretnjaka (opis problema).....	135
7.3.2. Sakupljanje podataka sa eksperimentalnih ispitivanja brodova-potiskivača.....	135
7.3.3. Izdvajanje ulaznih i izlaznih podataka od celokupnog skupa podataka.....	136
7.3.4. Predloženo rešenje problema proračuna snage motornih potiskivača.....	137
7.3.5. Konfiguracija veštačkih neuronskih mreža sa prostiranjem signala unapred	140
7.3.6. Numerički primer, proračun i tumačenje rezultata	141
7.3.7. Analiza rešenja dobijenog modelom skupa VNM	150
7.3.8. Primena modela skupa VNM za proračun snage motornih potiskivača.....	165
7.4. RAZMATRANJA GRANICA ZA PRIMENU MODELA SKUPA VNM	172
7.5. PRORAČUN SNAGA NA PROPELERSKIM VRATILIMA BRODOVA-POTISKIVAČA KOJE NISU DOBIJENE EKSPERIMENTALNIM ISPITIVANJIMA	180
7.6. PRIMER PRORAČUNA SNAGE NA PROPELERSKIM VRATILIMA NA OSNOVU GLAVNIH DIMENZIJA POTISKIVANIH SASTAVA I BRZINE SKLOPA U MIRNOJ VODI	210
7.7. ZAKLJUČAK	213
8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA	215
LITERATURA.....	220
BIOGRAFIJA AUTORA	233

Spisak tabela

Tabela 2.1. Plovna prevozna sredstva na unutrašnjim plovnim putevima Republike Srbije, kraj 2010. godine (Izvor: Republički zavod za statistiku, 2010.).....	11
Tabela 2.2. Rad i iskorišćenost plovnih prevoznih sredstava preduzeća saobraćaja na unutrašnjim plovnim putevima, 2010, Republika Srbija (Izvor: Republički zavod za statistiku, 2010.).....	11
Tabela 2.3. Osnovni podaci o savremenim potiskivanim teretnjacima (potisnicama)...	14
Tabela 2.4. Osnovni podaci o savremenim dunavskim motornim potiskivačima.....	15
Tabela 3.1. Merne deonice na kojima se obavljaju eksperimentalna ispitivanja na plovnim putevima Republike Srbije (Pravilnik o načinu obavljanja probne vožnje brodova i zonama plovidbe, 2012).....	27
Tabela 3.2. Primer rasporeda eksperimentalnih ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova (Izvor: International Towing Tank Conference (ITTC), 2002).....	32
Tabela 3.3. Primarne merne veličine (Izvor: Van Den Boom i dr., 2006).....	33
Tabela 3.4. Sekundarne merne veličine (Izvor: Van Den Boom i dr., 2006).....	34
Tabela 3.5. Preporuke dužine prilaza mernoj stazi i vremena plovidbe za morske brodove (Izvor: Van Den Boom i dr., 2006).....	39
Tabela 3.6. Ograničenja geometrijskih veličina kod metode Holtropa i Menena (Izvor: Holtrop Mennen, 1982).....	48
Tabela 3.7. Ograničenja geometrijskih veličina kod Harvaldove metode (Izvor: Harvald, 1983).....	48
Tabela 4.1. Pregled ispitivanja izgrađenih rečnih brodova potiskivača od strane Laboratorije za ispitivanje brodova i plovnih puteva Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu (Izvor: Čolić, 2006).....	62
Tabela 4.2. Osnovne dimenzije ispitivanih sklopova sa izmerenim brzinama plovidbe u mirnoj vodi i snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača (Izvor: Čolić, 2006).....	65
Tabela 4.3. Osnovne dimenzije ispitivanih sklopova, brzine plovidbe u mirnoj vodi i snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača po rednom broju iz skupa rednih brojeva merenja (S_r).....	69
Tabela 5.1. Pregled merenja brzine rečnog toka hidrometrijskim krilom (reka Sava, km 14÷15).....	76
Tabela 5.2. Pregled brzina plovidbe u odnosu na vodu hidrobusa „Negotin“ merene hidrometrijskim krilom (reka Sava km 14÷15).....	76
Tabela 5.3. Pregled informacija koje izdaje VHW linija.....	81
Tabela 5.4. Pregled merenja brzine plovidbe u odnosu na obalu, v_b , hidrobusa „Negotin“ (reka Sava km 14÷15).....	81
Tabela 5.5. RMC poruka i njeni parametri.....	82
Tabela 7.1. Vrednosti težina grana svake sastavne mreže (W_I).....	143
Tabela 7.2. Vrednosti težina grana sastavnih mreža modela skupa VNM.....	143
Tabela 7.3. Ulazno/izlazni podaci u prvom numeričkom primeru.....	145
Tabela 7.4. Izmeritelji uopštavanja stečenog znanja modela skupa VNM.....	152
Tabela 7.5. Apsolutne i relativne frekvencije apsolutnih grešaka izračunatih na skupu za obučavanje i skupu za testiranje.....	155
Tabela 7.6. Rangiranje grešaka prema minimalnim vrednostima (skup za obučavanje).....	158
Tabela 7.7. Rangiranje grešaka prema minimalnim vrednostima (skup za testiranje).....	161

Tabela 7.8. Apsolutne i relativne frekvencije relativnih grešaka izračunatih na skupu za obučavanje i skupu za testiranje.....	163
Tabela 7.9. Ukupna izmerena snaga na oba vratila broda-potiskivača „Bukovik“ u zavisnosti od režima rada motora	168
Tabela 7.10. Ukupna izmerena snaga na oba vratila broda-potiskivača „Bukovik“ u zavisnosti od režima rada motora	171
Tabela 7.11. Opseg ulaznih i izlaznih podataka dobijenih tokom eksperimentalnih ispitivanja iskorišćenih za obučavanje i testiranje VNM iz modela skupa VNM.....	172
Tabela 7.12. Granice za primenu modela skupa VNM.....	174
Tabela 7.13. Proračun snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača „Pinki“ i „Kladovo“ na osnovu granica za primenu modela skupa VNM.....	177
Tabela 7.14. Ulazne vrednosti podataka u model skupa VNM za proračun snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ koji se ne zasnivaju na granicama za primenu modela skupa VNM.....	183
Tabela 7.15. Usvojene snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ prema prvoj metodologiji	187
Tabela 7.16. Usvojene snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ prema drugoj metodologiji.....	189
Tabela 7.17. Usvojene snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ prema trećoj metodologiji	192
Tabela 7.18. Usvojene snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ prema trećoj metodologiji	194
Tabela 7.19. Usvojene snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača „Kadinjača“ u sklopu sa „2+2“ ($i_{sast} = 1$) potiskivana teretnjaka prema trećoj metodologiji.....	202
Tabela 7.20. Usvojene snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača „Kladovo“ u sklopu sa „2+2“ ($i_{sast} = 2$) potiskivana teretnjaka prema trećoj metodologiji	204
Tabela 7.21. Usvojene snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača „Kladovo“ u sklopu sa „2+2+2“ ($i_{sast} = 3$) potiskivana teretnjaka prema prvoj metodologiji.....	206
Tabela 7.22. Usvojene snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača „Kladovo“ u sklopu sa „3+3“ ($i_{sast} = 4$) potiskivana teretnjaka prema trećoj metodologiji.....	208
Tabela 7.23. Glavne osobenosti nesimetričnih potiskivanih teretnjaka.....	211
Tabela 7.24. Dimenzije sastava potiskivanih teretnjaka	211
Tabela 7.25. Dimenzije potiskivanih sklopova	212

Spisak slika

Slika 2.1. Transportna flota i tipovi plovila na unutrašnjim plovnim putevima.....	9
Slika 2.2. Najčešći potiskivani sklopovi na Gornjem Dunavu (Izvor: Via Donau, 2013)13	13
Slika 2.3. Osnovni vidovi sastava potiskivanih teretnjaka	13
Slika 3.1. Primer dela sertifikata o izvršenim eksperimentalnim ispitivanjima sklopova (Izvor: Economic commission for Europe, 2006).....	26
Slika 3.2. Putanja broda tokom eksperimentalnih ispitivanja propulzionih osobenosti broda (Izvor: Van Den Boom i dr., 2006).....	31
Slika 4.1. Uobičajeni način za označavanje sastava potiskivanih teretnjaka	62
Slika 5.1. Sistem merenja brzine plovidbe u odnosu na vodu pomoću elektronskih merača.....	78
Slika 5.2. Blok dijagram sistema za merenje ugaone brzine propelerskog vratila.....	83
Slika 5.3. Prikaz kompletnog sistema za telemetrijsko merenje momenta	89
Slika 6.1. Struktura biološkog neurona	91
Slika 6.2. Struktura veštačkog neurona sa 4 ulaza i jednim izlazom	92
Slika 6.3. Veštački neuron (procesni element) sa težinama povezanosti neurona i aktivacionom funkcijom	93
Slika 6.4. Tri različita tipa aktivacionih funkcija – odskočna, sigmoidna i linearna.....	94
Slika 6.5. Perceptron sa prostiranjem signala unapred.....	97
Slika 6.6. Višeslojna veštačka neuronska mreža sa jednim skrivenim slojem i sa prostiranjem signala unapred.....	99
Slika 6.7. Veštačka neuronska mreža sa jednim ulazom i jednim izlaznim čvorom.....	100
Slika 6.8. Oblik aktivacione funkcije izlazne promenljive za različite promene težine w_1	101
Slika 6.9. Prikaz promene oblika aktivacione funkcije izlazne promenljive sa šumom. 101	101
Slika 6.10. Višeslojna veštačka neuronska mreža sa više skrivenih slojeva.....	104
Slika 6.11. Ukupna greška (E) i greška koju proizvode podaci iz skupa za validaciju u zavisnosti od broja iteracija ili vremena obučavanja (Priddy i Keller, 2005)	121
Slika 6.12. Broj čvorova u skrivenom sloju koji se usvaja na osnovu AIC metode i koristi za obučavanje VNM	125
Slika 6.13. Arhitektura skupa veštačkih neuronskih mreža	126
Slika 7.1. AIC vrednosti veštačkih neuronskih mreža iz početnog skupa.....	142
Slika 7.2. Apsolutne greške ($\Delta N_{vr}^{(k)}$) podataka za obučavanje ($k = 1, 2, \dots, r$)	153
Slika 7.3. Apsolutne greške ($\Delta N_{vr}^{(k')}$) podataka za testiranje ($k' = 1, 2, \dots, r'$).....	153
Slika 7.4. Histogram relativnih frekvencija apsolutnih grešaka	156
Slika 7.5. Histogram kumulativnih relativnih frekvencija apsolutnih grešaka	156
Slika 7.6. Relativne greške ($G_{re}^{(k)}$) podataka za obučavanje ($k = 1, 2, \dots, r$).....	157
Slika 7.7. Relativne greške ($G_{re}^{(k')}$) podataka za testiranje ($k' = 1, 2, \dots, r'$)	157
Slika 7.8. Histogram kumulativnih relativnih frekvencija relativnih grešaka.....	164
Slika 7.9. Histogram relativnih frekvencija relativnih grešaka.....	164
Slika 7.10. Šematski prikaz broda-potiskivača „Bukovik“ u sastavu od „2+2“ potiskivana teretnjaka	168
Slika 7.11. Šematski prikaz uporednih glavnih osobenosti sastava potiskivanih teretnjaka u oznaci „3+3“ i sklopa u kome se nalazi brod-potiskivač „Deligrad“ i pomenuti sastav.....	181

TUMAČ POJMOVA I SKRAĆENICA

Skraćenica	Naziv
AIC	Vrednost Akaike informacionog kriterijuma
AIC_k	Korigovana vrednost Akaike informacionog kriterijuma
$\beta_{M'}$	Konstanta
B	Širina broda (m)
B_a	Najveća širina broda (širina preko svega) (m)
B_{KVL}	Širina brodskog trupa merena na glavnom rebru između vertikala spuštenih iz preseka linije KVL i spoljne ivice bočne oplata (m)
B_{max}	Najveća širina sastava potiskivanih teretnjaka (m)
B_{pot}	Širina potiskivača na konstrukcionoj vodnoj liniji (KVL) (m)
B_{sast}	Širina sastava potiskivanih teretnjaka (m)
B_{skl}	Širina sklopa broda potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka (m)
B_{ter}	Širina potiskivanog teretnjaka na konstrukcionoj vodnoj liniji (KVL) (m)
δ	Prostiranje greške unazad kroz veštačku neuronsku mrežu
δ	Koeficijent punoće istisnine
δ_o	Kavitacioni broj propelera
$(\Delta_{I'})$	$delta_AIC$ vrednost mreže
$(\Delta_m)_{I'}$	modifikovane $delta_AIC$ vrednosti mreže
Δ	Korekciona vrednost u RPROP algoritmu
Δ_{min}	Minimalni korak obučavanja u RPROP algoritmu
Δ_{max}	Maksimalni korak obučavanja u RPROP algoritmu
ΔN_{vr}	Skup apsolutnih grešaka dobijen od vrednosti snaga koje pripadaju skupu parova podataka za obučavanje (kW)
$\Delta N''_{vr}$	Skup apsolutnih grešaka dobijen od vrednosti snaga koje pripadaju skupu parova podataka za testiranje (kW)
D	Skup izlaznih podataka koji služe za obučavanje VNM
D'	Celokupan skup izlaznih podataka
D'_{norm}	Normalizovani celokupan skup izlaznih podataka
D''	Skup izlaznih podataka koji služe za testiranje VNM
d_{int}	Veličina grupnog intervala
D_m	Deplasman broda (t)
D_{mpot}	Deplasman punog broda-potiskivača (t)

Skraćenica	Naziv
D_{msast}	Deplasman sastava potiskivanih teretnjaka (t)
D_{mskl}	Deplasman sklopa broda potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka (t)
D_{mter}	Deplasman potiskivanog teretnjaka (t)
D_p	Prečnik propelera, (m)
E	Ukupna greška mreže za ceo skup podataka za obučavanje
ε^+	Parametar uvećanja u RPROP algoritmu
ε^-	Parametar smanjenja u RPROP algoritmu
\mathcal{E}_{FS}	Deformacija vratila ($^{cm}/_{cm}$)
η_p	Koeficijent korisnog dejstva propelera
f	Aktivaciona funkcija
f_{aps}	Apsolutna frekvencija apsolutnih grešaka ili relativnih grešaka (skup podataka za obučavanje)
F_{aps}	Kumulativna relativna frekvencija apsolutnih grešaka ili relativnih grešaka (skup podataka za obučavanje)
f''_{aps}	Apsolutna frekvencija apsolutnih grešaka ili relativnih grešaka (skup podataka za testiranje)
F''_{aps}	Kumulativna relativna frekvencija apsolutnih grešaka ili relativnih grešaka (skup podataka za testiranje)
F_o	Razvijena (stvarna) površina propelera, (m ²)
F_r	Frudov broj
G	Modul klizanja u zavisnosti od materijala vratila (kg/cm ²)
$G_{re}^{(k)}$	Relativna greška proračunata za sve vrednosti snage na propelerskim vratilima
GPS	Globalni pozicioni sistem
h	Dubina vode (m)
H_l	Broj čvorova u skrivenom sloju
H_k	Konstrukciona visina broskog trupa (m)
H_p	Ušpon, hod ili korak propelera (m)
l	Skriveni sloj u veštačkoj neuronskoj mreži
η_{pot}	Stepen iskorišćenja potisne snage
η_{pp}	Koeficijent potpune propulzije
φ_v	Ugao uvijanja propelerskog vratila (rad)
i	Redni broj ulaznog čvora u veštačku neuronsku mrežu
I	Redni broj veštačkih neuronskih mreža koje su ušle u skup
I'	Redni broj veštačkih neuronskih mreža koje se nalaze u modelu skupa veštačkih neuronskih mreža

Skraćenica	Naziv
i_{pot}	Redni broj potiskivača prilikom eksperimentalnih ispitivanja potiskivanih sklopova
i_{sast}	Redni broj sastava prilikom eksperimentalnih ispitivanja potiskivanih sklopova
j	Redni broj izlaznog čvora iz veštačke neuronske mreže
J	Polarni moment inercije na mestu propelerskog vratila gde se vrši merenje (cm ⁴)
κ	faktor merne trake (propisuje proizvođača)
k	Redni broj elemenata skupa brojeva merenja za obučavanje VNM
k'	Element skupa rednih brojeva merenja
k''	Redni broj elemenata skupa brojeva merenja za testiranje VNM
k'''	Redni broj elemenata skupa brojeva merenja za validaciju VNM
k^{iv}	Redni broj prethodnih promena vrednosti težina grana, odnosno opseg ili obim podataka koji su iz skupa za obučavanje
$\mathcal{K}_{sast}^{i_{pot}}$	Redni broj snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača koja je proračunata modelom skupa VNM, a koja se ne nalazi u okviru ukupnog skupa parova podataka
$k_{sast}^{i_{pot}}$	Redni broj merenja snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača koji je učestvovao u eksperimentalnim ispitivanjima kao deo potiskivanog sklopa – uzima vrednosti elemenata skupa rednih brojeva merenja i zavisi od redosleda ispitivanja režima rada motora
$\dot{k}_{sast}^{i_{pot}}$	Redni broj režima rada glavnog motora broda-potiskivača pod rednim brojem i_{pot} vezanog za sastav potiskivanih teretnjaka pod rednim brojem i_{sast} – po redosledu ispitivanja režima rada motora
$k_{sast}^{i_{pot} \max}$	Redni broj merenja snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača u ukupnom broju merenja, koji se odnosi na poslednje merenje snage u sklopu, odnosno, po redosledu ispitivanja režima rada motora
$k_{sast}^{i_{pot} \min}$	Redni broj merenja snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača u ukupnom broju merenja, koji se odnosi na prvo merenje snage u sklopu, odnosno, po redosledu ispitivanja režima rada motora
$\dot{k}_{sast}^{i_{pot} \max}$	Redni broj režima rada glavnog motora broda-potiskivača u sklopu vezanog za sastav potiskivanih teretnjaka (i_{pot} , i_{sast}) koji odgovara poslednjem rednom broju ispitivanja po redosledu ispitivanja režima rada motora
$\dot{k}_{sast}^{i_{pot} \min}$	Redni broj režima rada glavnog motora broda-potiskivača u sklopu vezanog za sastav potiskivanih teretnjaka (i_{pot} , i_{sast}) koji odgovara prvom rednom broju ispitivanja po redosledu ispitivanja režima rada motora
K_m	Koeficijent momenta propelera
K_s	Koeficijent potisne sile propelera
λ	Stepen napredovanja
L_a	Najveća dužina broda (dužina preko svega) (m)

Skraćenica	Naziv
L_{KVL}	Dužina broskog trupa merena između vertikala spuštenih iz preseka konstrukcione vodne linije (KVL) i spoljnih ivica pramčane i krmene statve (m)
L_{max}	Najveća dužina sastava potiskivanih teretnjaka (m)
L_{pp}	Dužina između perpendikulara (m)
L_{pot}	Dužina potiskivača na konstrukcionoj vodnoj liniji (KVL) (m)
L_{pr}	Razmak između prstenova na propelerskom vratilu (cm)
L_{ps}	Dužina paralelne sredine broda (m)
L_{sast}	Dužina sastava potiskivanih teretnjaka (m)
L_{skl}	Dužina sklopa broda-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka (m)
L_{ter}	Dužina potiskivanog teretnjaka na konstrukcionoj vodnoj liniji (KVL) (m)
$\hat{\mu}$	Srednja apsolutna greška proračunata za sve vrednosti snage na propelerskim vratilima iz skupa za obučavanje
$\hat{\mu}''$	Srednja apsolutna greška proračunata za sve vrednosti snage na propelerskim vratilima iz skupa za testiranje
$\hat{\mu}_G$	Srednja relativna greška proračunata za sve vrednosti snage na propelerskim vratilima iz skupa za obučavanje
$\hat{\mu}_G''$	Srednja relativna greška proračunata za sve vrednosti snage na propelerskim vratilima iz skupa za testiranje
m	Ukupan broj čvorova u ulaznom sloju veštačke neuronske mreže
M	Ukupan broj veštačkih neuronskih mreža koje su ušle u skup
M'	Ukupan broj veštačkih neuronskih mreža koje se nalaze u modelu skupa veštačkih neuronskih mreža
M_o	Obrtni moment propelerskog vratila (Nm)
η	Koeficijent obučavanja veštačke neuronske mreže
n	Ukupan broj čvorova u izlaznom sloju veštačke neuronske mreže
n_{20}	20 obrtaja propelera \times određen broj ciklusa zujanja (broj signala), (ob)
NET	Ponderisani zbir ulaznih signala u čvor veštačke neuronske mreže
N_{inst}	Instalisana snaga pogonskih motora broda potiskivača (kW)
N_{nm}	Broj parametara veštačke neuronske mreže
n_{sr}	Srednji broj obrtaja propelerskih vratila broda-potiskivača (ob/min)
N_{vr}	Izmerena snaga na propelerskim vratilima broda-potiskivača (kW)
\hat{N}_{vr}	Snaga na propelerskim vratilima broda-potiskivača proračunata na osnovu modela veštačkih neuronskih mreža (kW)
\check{N}_{vr}	Snaga na propelerskim vratilima proračunata primenom modela jednostavne krivolinijske regresije (kW)
n_{vr}	Broj obrtaja propelerskih vratila (ob/min)

Skraćenica	Naziv
n_{vrhm}	Brzina obrtaja propelera hidrometrijskog krila (ob/s)
P_{aps}	Relativna frekvencija apsolutnih grešaka ili relativnih grešaka (skup podataka za obučavanje)
P''_{aps}	Relativna frekvencija apsolutnih grešaka ili relativnih grešaka (skup podataka za testiranje)
q	Broj skrivenih slojeva veštačke neuronske mreže
Q_e	Eksploataciona nosivost teretnjaka u sastavu (t)
Q_r	Registrovana nosivost teretnjaka u sastavu (t)
r	Ukupan broj elemenata skupa za obučavanje
r'	Ukupan broj podataka
r''	Ukupan broj elemenata skupa za testiranje
r'''	Ukupan broj elemenata skupa za validaciju
r^{iv}	Ukupan broj prethodnih promena vrednosti težina grana, odnosno opseg ili obim podataka koji su iz skupa za obučavanje
R	Otpor broda (N)
r_{int}	Ukupan broj podintervala
ΔR_{el}	Promena električnog otpora merne trake usled deformacije (Ω)
R_{elor}	Deklarisani otpor merne trake (propisuje proizvođač) (Ω)
σ_{X_i}	Standardno odstupanje skupa podataka koji služe za obučavanje mreže
$\hat{\sigma}^2$	Srednja kvadratna greška modela veštačke neuronske mreže
$\hat{\sigma}$	Koren srednje kvadratne apsolutne greške proračunat za sve vrednosti snage na propelerskim vratilima iz skupa za obučavanje
$\hat{\sigma}''$	Koren srednje kvadratne apsolutne greške proračunat za sve vrednosti snage na propelerskim vratilima iz skupa za testiranje
s	Broj prethodnih promena težina grana veštačke neuronske mreže
S	Skup veštačkih neuronskih mreža
s_G	Standardno odstupanje relativne greške proračunatih snaga na propelerskim vratilima na osnovu obučavanja VNM, a koje pripadaju skupu za obučavanje
s''_G	Standardno odstupanje relativne greške proračunatih snaga na propelerskim vratilima na osnovu obučavanja VNM, a koje pripadaju skupu za testiranje
$s_{I'}$	Standardno odstupanje proračunatih izlaznih vrednosti na osnovu obučavanja sastavne mreže I' , a koje pripadaju skupu za obučavanje
s_{min}	Maksimalno od svih standardnih odstupanja proračunatih izlaznih vrednosti na osnovu obučavanja jedne sastavne mreže, a koje pripadaju skupu za obučavanje
s_{max}	Maksimalno od svih standardnih odstupanja proračunatih izlaznih vrednosti na osnovu obučavanja jedne sastavne mreže, a koje pripadaju skupu za obučavanje

Skraćenica	Naziv
S_r	Skup brojeva merenja za obučavanje VNM
$S_{r'}$	Celokupan skup rednih brojeva merenja
$S_{r''}$	Skup brojeva merenja za testiranje VNM
$S_{r'''}$	Skup brojeva merenja za validaciju VNM
$(S_r^{(X,D)})$	Skup parova podataka za obučavanje
$(S_{r'}^{(X,D)})$	Ukupan skup parova (ulaz, izlaz) podataka
$(S_{r''}^{(X,D)})$	Skup parova podataka za testiranje
$(S_{r'''}^{(X,D)})$	Skup parova podataka za validaciju
T	Gaženje broda (m)
t	Vreme (s)
T_{FS}	Torzioni moment (N·m)
T_{km}	Najveće konstrukciono gaženje (m)
T_{ko}	Najmanje konstrukciono gaženje (m)
T_{pot}	Najveće konstrukciono gaženje potiskivača (m)
T_{sast}	Gaženje sastava potiskivanih teretnjaka (m)
T_{skl}	Gaženje potiskivanog sklopa (m)
T_{ter}	Gaženje potiskivanog teretnjaka (m)
V	Istisnina broda (m ³)
V_{skl}	Istisnina sklopa broda potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka (m ³)
$\downarrow v$	Brzina plovidbe u odnosu na vodu ukoliko se brod kreće nizvodno (km/h)
Δv	Brzina rečnog toka (km/h)
$\uparrow v$	Brzina plovidbe u odnosu na vodu ukoliko se brod kreće uzvodno (km/h)
v_{pt}	Brzina plovidbe potiskivanog sklopa u mirnoj vodi (km/h)
v_t	Tehnička brzina plovidbe broda (km/h)
$\downarrow v_t$	Nizvodna tehnička brzina plovidbe (km/h)
$\uparrow v_t$	Uzvodna tehnička brzina plovidbe (km/h)
φ	Koeficijent finoće istisnine broskog trupa
w	Vrednost težine grane u veštačkoj neuronskoj mreži
W	Vrednost težine svake pojedinačne veštačke neuronske mreže u skupu veštačkih neuronskih mreža (<i>eng. component network weight</i>)
X	Skup ulaznih podataka koji služe za obučavanje VNM
X'	Celokupan skup ulaznih podataka

Skraćenica	Naziv
X'_{norm}	Normalizovani celokupan skup ulaznih podataka
X''	Skup ulaznih podataka koji služe za testiranje VNM
Y	Skup izlaznih podataka čiji su elementi dobijeni proračunom elemenata skupa ulaznih podataka koji služe za obučavanje VNM
Y'	Celokupan skup izlaznih podataka čiji su elementi dobijeni proračunom pomoću modela skupa VNM
Y'_{norm}	Normalizovani celokupnog skupa izlaznih podataka čiji su elementi dobijeni proračunom elemenata celokupnog skupa ulaznih podataka
Y''	Skup izlaznih podataka čiji su elementi dobijeni proračunom elemenata skupa ulaznih podataka koji služe za testiranje VNM
Z	Broj krila propelera

1. Uvod

Snaga glavnog pogonskog motora predstavlja suštinski deo procesa izgradnje jednog broda. Po izgradnji broda snaga njegovog glavnog pogonskog motora morala bi da odgovara onoj snazi koja je preuzeta iz ugovora o izgradnji broda. Takva snaga se najčešće vezuje za glavne dimenzije broda, najveću brzinu plovidbe i odgovarajuće gaženje broda koji se ugovaraju pre same izgradnje broda. Ipak, tokom eksploatacije jednog broda u dužem vremenskom intervalu moguće je pojavljivanje određenih promena na oplati brodskog trupa i glavnom pogonskom motoru. Ove promene neizbežno utiču na promene odnosa vrednosti rezultata eksperimentalnih ispitivanja (npr. potrošnja goriva i brzina plovidbe broda) pomoću kojih se dobijaju tehničko-eksploatacioni pokazatelji prevoza tereta (prevozni učinak, jedinični prevozni učinak i statičko opterećenje snage).

Sa povećanjem godina eksploatacije broda, potrošnja goriva se povećava iako snaga na propelerskim vratilima ostaje ista. Međutim, brzina plovidbe broda se smanjuje za istu snagu na propelerskim vratilima broda što je posledica promena koje se pojavljuju na propeleru. Na taj način brod postaje sve sporiji sa povećanjem godina eksploatacije, a potrošnja goriva se sve više povećava. Jedini način da se brzina plovidbe broda održi na nivou brzine plovidbe tek izgrađenog broda jeste da se snaga na propelerskim vratilima poveća čime se ubrzava propadanje glavnog pogonskog motora.

Najčešći razlozi za promenu odnosa brzine plovidbe i snage glavnog pogonskog motora, kao i povećane potrošnje goriva su kavitacija propelera¹ i promene na oplati brodskog trupa. Ove promene se dešavaju bez prestanka i mogu se predstaviti opadajućom funkcijom od vremena eksploatacije broda (Pedersen i Larsen, 2009). Zbog toga se tokom određenih vremenskih perioda vrši provera tehničko-eksploatacionih

¹ Pad pritiska vode oko krila propelera na vrednost pritiska pri kojoj tečnost isparava i jedan deo prelazi u zasićenu paru. Time se pravi smeša vode i vodene pare oko krila propelera. Novonastale čestice vodene pare, zatim, klize duž krila propelera prema korenu krila i glavčini propelera u čijem području vlada veći pritisak. U tom području dolazi do nagle kondenzacije mehurića vodene pare, koji pri tome implodiraju i oštećuju krila propelera, često uzrokuju pojavu vibracija i lom krila propelera.

pokazatelja prevoza tereta. Tokom ovih vremenskih perioda posade i zapovednici brodova ostaju bez precizne metodologije o mogućim drugačijim odnosima između vrednosti tehničko-eksploatacionih pokazatelja prevoza tereta.

Važan deo provere tehničko-eksploatacionih pokazatelja prevoza tereta predstavljaju eksperimentalna ispitivanja kojima se određuju snage na propelerskim vratilima i brzine plovidbe u mirnoj vodi. Ova merenja se tradicionalno obavljaju u dubokoj, mirnoj vodi i bez vetra pri određenom naznačenom gaženju broda. Ipak, ovakvi uslovi se vrlo retko sreću tokom eksperimentalnih ispitivanja, te je potrebno izvršiti prave korekcije rezultata po obavljenim merenjima. Pomenutim eksperimentalnim ispitivanjima brodova-potiskivača dobijeni su prihvatljivi rezultati merenja koji su u ovoj disertaciji iskorišćeni za modeliranje.

Pored navedenih najčešćih razloga za promenu odnosa brzine plovidbe, snage glavnog pogonskog motora i povećane potrošnje goriva, u postojećoj literaturi se mogu pronaći i drugi razlozi koji nisu vezani za trajanje eksploatacije broda, već za trenutne hidrološko-meteorološke uslove koji vladaju na plovnom putu. Jednu grupu takvih uslova predstavljaju vremenski uslovi koji vladaju u trenutku plovidbe broda. Nepovoljni vremenski uslovi najviše utiču na visinu talasa koji se javljaju na plovnom putu, a predstavljaju jedan od glavnih problema graditeljima brodova, brodovlasnicima i zapovednicima, odnosno brodomskom osoblju. Da bi prevazišli ovaj problem, graditelji brodova su uložili veliki napor kako bi napravili brodove sa boljim prevoznim učinkom pri različitim vremenskim uslovima. Zapovednici brodova zahtevaju brze i sigurne brodove pri nepovoljnim vremenskim uslovima, dok brodovlasnici žele da naprave najveći mogući profit (Prpić-Oršić i Faltinsen, 2012). Stoga, proračun brzine plovidbe postaje bitan jer se zna da se pri lošim vremenskim uslovima brzina plovidbe smanjuje. Ipak, u ovoj disertaciji neće biti razmatran uticaj vremenskih uslova na brzinu plovidbe i snagu glavnog pogonskog motora. Smatraće se da su vremenski uslovi bili povoljni tokom eksperimentalnih ispitivanja.

Promenu tehničko-eksploatacionih pokazatelja prevoza tereta od svega nekoliko procenata godišnje teško je odrediti tradicionalnim metodama za proračun otpora broda, odnosno snage glavnog pogonskog motora broda koje su prikazane u sledećim radovima: Marchal i dr. (1996), Holtrop i Mennen (1982) i Kreculj i Čolić (1996). Empirijske metode obuhvataju korišćenje iskustvenih obrazaca koji se zasnivaju na izvršenim ispitivanjima već izgrađenih brodova ili njihovih modela. Pošto su ispitivanja vršena pri određenim hidrološko-meteorološkim uslovima na plovnom putu, ali i za

određeno stanje broda ili modela broda, iskustvene metode se primenjuju upravo za takve uslove plovidbe i stanja broda. U eksploataciji brod će ploviti u drugačijim uslovima, kao npr. sa različitim balastom, različitim gaženjem itd. Pošto na rad broda utiču različiti spoljni činioci (vetar, talasi, dubina vode, promena u temperaturi vode itd.) nije teško zaključiti da će brod vrlo retko, ili gotovo nikada ploviti pri istim onim uslovima za koje su empirijske metode napisane. Sa druge strane, činioce koji utiču na otpor broda, odnosno snagu glavnog pogonskog motora vrlo je teško izmeriti precizno, te je gotovo nemoguće zateći istu situaciju u dva različita vremenska perioda. Stoga je jasno da ove metode daju grubu procenu tehničko-eksploatacionih pokazatelja prevoza tereta.

Jedini način kojim se dobijaju precizni podaci o tehničko-eksploatacionim pokazateljima jeste eksperimentalno ispitivanje broda na plovnom putu. Ova ispitivanja se izvode sa ciljem da se odredi funkcionalna veza između brzine plovidbe broda i snage glavnog pogonskog motora. Samim ispitivanjem, zapovednici i posade brodova dobijaju neophodne podatke o operativnim karakteristikama rada brodova.

Odnos snage glavnog pogonskog motora i brzine plovidbe broda može da se odredi i pomoću ispitivanja modela brodova, ali takođe i pomoću metoda koji se baziraju na matematičkoj regresiji. Jedna takva metoda je Holtrop-Mennen metoda (Holtrop i Mennen, 1982). Upotreba matematičke regresije u pronalaženju funkcionalne veze između snage glavnog pogonskog motora i brzine plovidbe broda bila je široko rasprostranjena proteklih nekoliko decenija. Međutim, razvojem Veštačkih neuronskih mreža (VNM) i većom dostupnošću sve bržih algoritama obučavanja mreža dovelo je do sve značajnije primene VNM u rešavanju odnosa snage glavnog pogonskog motora i brzine plovidbe broda.

Postoji mnogo razloga za ovu promenu, a najznačajniji su što VNM daju preciznije rezultate od matematičke regresije, jednostavne su za upotrebu, lako se prilagođavaju dodavanjem novih podataka u celokupan skup i proračunavaju precizne izlazne podatke (Karlaftis i Vlahogianni, 2011). Prilagođavanje novim podacima je značajno jer se u tom slučaju svako novo eksperimentalno ispitivanje (sa novim spoljnim činiocima) na jednostavan način uključuje u celokupnu bazu podataka. Time se postiže veća tačnost izlaznih rezultata i u isto vreme povećava opseg primene određenog matematičkog modela.

Dalje, većina istraživača je poredila matematičku regresiju i VNM na osnovu sledećih osobina (Karlaftis i Vlahogianni, 2011):

1. tačnost modeliranja preslikavanja vrednosti ulaznih promenljivih u vrednosti izlazne promenljive,
2. vreme, trud, veštine i stručnost koji su potrebni za razvoj modela – jednostavnost modeliranja preslikavanja vrednosti ulaznih promenljivih u vrednosti izlazne promenljive i
3. mogućnost primene rezultata na druge naučne oblasti i prilagodljivost na promene.

Iako je primena VNM i matematičke regresije kod određivanja odnosa snage glavnog pogonskog motora i brzine plovidbe broda znatna poslednjih godina, ipak se takva primena kod potiskivanih sklopova vrlo retko sreće. Upravo će potiskivani sklopovi biti predmet razmatranja ove disertacije, a primenjena istraživanja će se odnositi na sistem potiskivanja koji se, na unutrašnjim plovnim putevima, sastoji od sklopa koji čine brod–potiskivač i sastav potiskivanih teretnjaka (potisnica).

U radu će se razmatrati podaci o dunavskim brodovima potiskivačima i sastavima potiskivanih teretnjaka dobijenih tokom eksperimentalnih ispitivanja energetskih i propulzionih osobenosti brodova-potiskivača. Predmet analize biće sledeći tehničko-eksploatacioni pokazatelji prevoza tereta: izmerena snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača, eksploataciona nosivost sastava potiskivanih teretnjaka i brzina plovidbe sklopova (brodova potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka) u mirnoj vodi. Eksploataciona nosivost sastava potiskivanih teretnjaka sadržana je u deplasmanu sklopa. Zbog zakonitosti koja se javlja između glavnih dimenzija sklopa koji čine brod–potiskivač i sastav potiskivanih teretnjaka (u daljem tekstu sklopa) i otpora kretanju sklopa (a samim tim i snage broda–potiskivača) razmatraće se i odnosi glavnih dimenzija sklopova. Koristiće se rezultati eksperimentalnih ispitivanja izgrađenih rečnih brodova-potiskivača i sklopova.

Metodologija, predstavljena u ovoj disertaciji, primenjuje VNM za proračun snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača koje su prethodno bile dobijene na osnovu eksperimentalnih ispitivanja izgrađenih rečnih brodova–potiskivača i sklopova, ali i u slučajevima kada ne postoje empirijski podaci. Veštačkim neuronskim mrežama modelirane su složene, odnosno nelinearne veze između ulaznih promenljivih (brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi i odnosa glavnih dimenzija sklopova) i jedne izlazne promenljive (snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača). Modeliranje veza između ulaznih i izlaznih veličina izvršeno je pomoću skupova VNM (*eng. Ensemble Neural Networks – ENN*). Model skupa VNM bio je merodavan za proračun snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača. Svaka pojedinačna mreža iz skupa VNM je

prvo obučavana na skupu podataka za obučavanje, a zatim i testirana na skupu podataka za testiranje. Pre obučavanja i testiranja VNM usvojena je konfiguracija neuronske mreže na osnovu Akaike informacionog kriterijuma (Akaike, 1973). Po obučavanju i testiranju VNM izvršen je proračun izlaznih rezultata, sprovedena je analiza izlaznih rezultata i određene su granice primene modela skupa VNM.

Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja sklopova napravljena je baza podataka iz koje su izdvojeni skupovi podataka za obučavanje i skupovi podataka za testiranje. Po obučavanju VNM napravljen je originalni model skupa VNM koji se predlaže za proračun potrebne snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača u zavisnosti od brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi i glavnih dimenzija sklopova. Glavni cilj disertacije je da se odredi funkcionalna veza između brzine plovidbe potiskivanog sastava u mirnoj vodi i snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača. Na osnovu dobijene funkcionalne veze zapovednici i posade brodova dobiće neophodne podatke o operativnim karakteristikama rada određenih potiskivanih sklopova.

U ovoj disertaciji predloženo je da 4 VNM čine skup VNM i to na osnovu Akaike informacionog kriterijuma (Zhao i dr., 2008). Pretpostavljeno je da će 4 sastavne mreže biti dovoljno da se dobiju zadovoljavajuće precizni rezultati. Takođe, predložene su tri metodologije proračuna vrednosti snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Sve mreže su obučavane pomoću 5 algoritama obučavanja, te su ovi algoritmi opisani u poglavljima disertacije. Za obučavanje VNM usvojen je jedan od ovih pet algoritama obučavanja.

Model je primenljiv na različite sastave potiskivanih teretnjaka koji su bili zastupljeni tokom eksperimentalnih ispitivanja sklopova. Model je, takođe, primenljiv na brodove-potiskivače čija je dužina oko 35 m, a koji su trenutno najzastupljeniji na dunavskoj plovnoj mreži u Republici Srbiji (Radojčić, 2009). Na osnovu sposobnosti VNM da se lako prilagođavaju dodavanju novih podataka u skup za obučavanje, odnosno, testiranje, biće moguće nadograditi celokupan model novim eksperimentalnim ispitivanjima sklopova.

Napravljeno je nekoliko ekstrapolacionih krivih za brzine plovidbe sklopova i dimenzije sklopova koji nisu učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima. Ekstrapolacione krive su pokazale da je model skupa VNM moguće praktično primeniti.

U prvom, uvodnom poglavlju ukratko je opisan predmet istraživanja i dat sažet prikaz sprovedenih istraživanja odnosa brzine plovidbe sklopa u mirnoj vodi i snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Dato je objašnjenje važnosti

eksperimentalnih ispitivanja brodova za određivanje snage brodova u funkciji od brzine plovidbe u odnosu na vodu. Navedene su analitičke metode za proračun tehničko-eksploatacionih pokazatelja brodova. Pomenut je model skupa veštačkih neuronskih mreža ("Ensemble Neural Networks") koji je u okviru istraživanja predložen za određivanje odnosa brzina i snaga, kao i za proračune snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača za različite ulazne veličine.

U drugom poglavlju opisani su sastavi potiskivanih teretnjaka u savremenom vodnom transportu i karakteristike transporta robe na unutrašnjim plovnim putevima. Napravljen je poseban osvrt na plovidbu rekom Dunav.

U trećem poglavlju navedena su opšta razmatranja o eksperimentalnim ispitivanjima izgrađenih brodova i numeričkim metodama za proračun snage glavnog pogonskog motora broda. Na kraju poglavlja dat je pregled literature koja se bavi numeričkim metodama za proračun snage glavnog pogonskog motora.

U četvrtom poglavlju dat je pregled dosadašnjih ispitivanja izgrađenih brodova-potiskivača, odnosno prikazani su podaci dobijeni eksperimentalnim merenjima. Dat je pregled ispitivanja izgrađenih brodova-potiskivača od strane Laboratorije za ispitivanje brodova i plovnih puteva Odseka za vodni saobraćaj Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu (od 1968. do 2001. godine). Rezultati eksperimentalnih ispitivanja su bili osnov za istraživanja sprovedena u doktorskoj disertaciji.

U petom poglavlju prikazane su metode merenja i obrade podataka primenjene tokom eksperimentalnih ispitivanja. Takođe su navedene nove eksperimentalne metode koje se koriste za određivanje snage propelerskih vratila brodova, broja obrtaja propelerskih vratila i merenje brzine plovidbe u mirnoj vodi i u odnosu na obalu.

U šestom poglavlju opisana je korišćena metodologija: predloženi su modeli veštačkih neuronskih mreža (VNM) za određivanje snage propelerskih vratila brodova-potiskivača. Objasnjena je arhitektura veštačkih neuronskih mreža sa prostiranjem signala unapred, zatim algoritmi obučavanja veštačkih neuronskih mreža, kao i određivanje broja neurona u skrivenim slojevima. Istraživanjem različitih analitičkih metoda zaključeno je da se ne mogu dobiti dovoljno precizni rezultati. Da bi rezultati eksperimentalnih ispitivanja mogli biti iskorišćeni za obučavanje i testiranje, predložen je model veštačke neuronske mreže za proračun snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača. Korišćena je jedna veštačka neuronska mreža sa prostiranjem signala unapred čija je arhitektura prethodno bila usvojena (Radonjić i Vukadinović, 2014). Pošto ni ova metodologija nije dala rezultate očekivane tačnosti, usvojen je

model skupa veštačkih neuronskih mreža (“Ensemble Neural Networks“). Korišćenjem pomenutog modela za određivanje snage propelerskih vratila brodova-potiskivača dobijeni su rezultati dovoljne tačnosti. Model skupa veštačkih neuronskih mreža razvijen je na osnovu Akaike informacionog kriterijuma (*eng. Akaike Information Criterion*) (Radonjić i Vukadinović, 2014).

U sedmom poglavlju primenjen je predloženi model skupa VNM na proračun snage propelerskih vratila brodova-potiskivača. Prvo su predložene ulazne i izlazne promenljive, a zatim konfiguracija veštačkih neuronskih mreža koje su povezane da bi se poboljšale performanse modela. Model skupa VNM poslužio je za proračun snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača. Posle testiranja modela podacima za obučavanje i testiranje, model je testiran na novim podacima. Na kraju poglavlja urađen je primer proračuna snage na propelerskim vratilima brodova za potrebe brodarstava.

U osmom poglavlju izneti su zaključci i doprinosi do kojih se došlo primenom predloženog modela skupa VNM. Date su smernice za dalji rad na unapređivanju dobijenih rezultata.

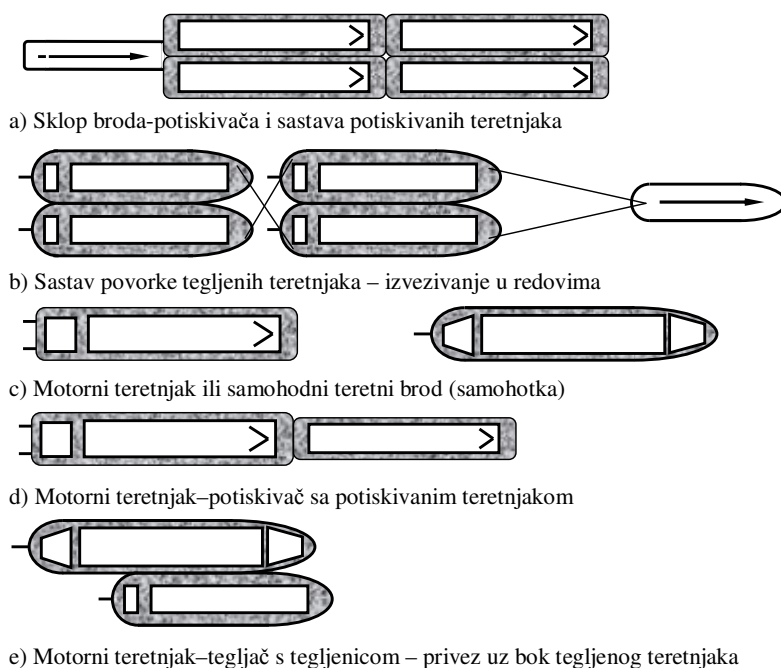
2. Potiskivani sklopovi u savremenom vodnom transportu

U Evropi postoji mnoštvo kanala i reka kojima se svakodnevno prevozi raznovrstan teret, počevši od rasutih i komadnih tereta preko tečnih tereta do kontejnera. Kanali i reke čine 30000 kilometara unutrašnjih plovnih puteva Evrope povezujući tako stotine industrijskih gradova i ključnih područja, od čega se većina nalazi u Srednjoj Evropi. Najvažnije reke Srednje Evrope su Rajna i Dunav i celokupna mreža kanala i manjih pritoka kojima se ostvaruje veza sa manjim industrijskim centrima, ali i sa drugim vidovima transporta.

Plovidba, odnosno prevoz teretnim plovilima na unutrašnjim plovnim putevima vrši se sastavima tegljenih i potiskivanih teretnjaka, motornim teretnjacima ili u kombinaciji ove tri tehnologije transporta. Prevoz robe motornim teretnjacima (samohotkama) je u organizacionom smislu najjednostavniji vid prevoza tereta, jer se ostvaruje unutar krute veze između broskog motora i prostora za terete. Na Slici 2.1 su prikazani transportna flota i tipovi plovila na unutrašnjim plovnim putevima.

Sastavi tegljenih ili potiskivanih teretnjaka su potpuno slični u pogledu organizacije transporta, jer se kod njih ostvaruje elastična veza između pogonske jedinice (potiskivača ili tegljača) i sastava nesamohodnih teretnjaka (potisnica ili tegljenica), kao tovarnog prostora. To znači da (se u unutrašnjem vodnom saobraćaju) treba odlučiti između tri vrste veze pogonske jedinice i teretnjaka koje mogu biti (Hrle, 1996):

1. *Kontinualna (neprekidna) veza* između sastava tegljenih ili potiskivanih teretnjaka i brodova tegljača i potiskivača,
2. *Polukontinualna (poluprekidna) veza* između sastava tegljenih ili potiskivanih teretnjaka i brodova tegljača i potiskivača,
3. *Diskontinualna (prekidna) veza* između sastava tegljenih ili potiskivanih teretnjaka i brodova tegljača i potiskivača.



Slika 2.1. Transportna flota i tipovi plovila na unutrašnjim plovnim putevima

Ovaj tip veza (između sastava tegljenih i potiskivanih teretnjaka i brodova potiskivača ili tegljača) dobija na značaju kada se vrši organizacija prevoza robe u zavisnosti od plovidbenih uslova, raspoloživog stanja flote i robnih tokova. Međutim, kada je reč o otporima broda (snazi glavnog pogonskog motora), postoje pravila koja definišu koji to sastavi potiskivanih ili tegljenih teretnjaka imaju manje ili veće otpore, odnosno za koje to sastave je potrebna manja ili veća snaga glavnog pogonskog motora.

Potiskivačkim sastavima se danas prevoze svi tipovi roba. Potisnice za suvi teret se koriste za prevoz niza različitog tereta, kao što su čelični cilindri, žito i rude. Ova plovila mogu se koristiti gotovo za sve terete, čime smanjuju broj vožnji bez tereta. Tipičan sastav potiskivanih teretnjaka na gornjem Dunavu imao bi dužinu od 193 metra, širinu 22 metra, gaz 2,7 metara i nosivost 7000 tona, dok bi isti takav sastav na Rajni imao dužinu od 193 metra, širinu od 22,8 metara, gaz 3,7 metara i nosivost od 11000 tona (Priručnik za unutrašnju plovidbu u Republici Hrvatskoj, 2006). Kako bi se ostvario veći profit koji dolazi od potiskivanih sklopova, u Holandiji se razmatra konstrukcija većih potiskivanih teretnjaka za prevoz gvozdene rude i uglja između Roterdama i nemačkog Rura. Uobičajeni potiskivani teretnjaci ovog tipa imaju dužinu od 76 metara i nosivost od 2750 tona. Novi potiskivani teretnjaci bi imali dužinu od 110 metara, maksimalnu nosivost 4500 tona i bili bi dobra zamena za trenutne sastave potiskivanih teretnjaka koje, najčešće, čini 6 potiskivanih teretnjaka.

Očekuje se da potiskivani sklopovi za prevoz kontejnera dobiju veću važnost koju trenutno imaju. Na Dunavu se smatra da bi sastavi potiskivanih teretnjaka sa 4 teretnjaka za prevoz kontejnera i nosivosti od 576 TEU bili idealan način za povećanje nosivosti po jednom plovnom objektu, odnosno sklopu. To znači da bi po teretnjaku bilo prevezeno 144 TEU ili tri reda po 48 TEU od po četiri kontejnera dužine 20 stopa i širine 12 stopa.

Potiskivani teretnjaci za tečni teret se koriste za prevoz nafte i naftnih derivata, dizel, teških i lakih lož ulja, hemijskih proizvoda (kiseline, baze, benzol, metanol itd.) i plinova (prevoze se pod pritiskom). Moderna plovila imaju duplo dno čime se sprečava isticanje tereta ukoliko dođe do oštećenja. Unutar tovarnog prostora postoje grejači i ventili koji se koriste kod prevoza tereta koji se lako zamrzava zimi. Većina novijih tank teretnjaka ima pumpe koje mogu direktno istovariti teret. Potiskivani teretnjaci za tečni teret u Srbiji se mogu podeliti na dve grupe u zavisnosti od glavnih dimenzija. Prvu grupu čine nesimetrični potiskivani teretnjaci čija je dužina preko svega 67 metara, širina preko svega 10,23 metara, gaz 2,30 metara i nosivost 1221 tona. Drugu grupu čine nesimetrični potiskivani teretnjaci čija je dužina preko svega 77 metara, širina preko svega 11 metara, gaz 2,50 metara i nosivost 1650 tona (Via Donau, 2013 – videti Tabelu 2.3). Kao i kod prevoza suvih tereta, tako i kod prevoza tečnih tereta na Dunavu najveće učešće imaju potiskivani sklopovi.

2.1. Plovidba rekom Dunav

Na Dunavu plovi oko 5200 brodova sa 4300000 tona nosivosti (Dunavska strategija EU i Srbija, 2013). Takođe, na Dunavu postoji 24 luke u kojima je promet robe veći od 1000000 tona robe. Ukupan prevoz putnika na Dunavu je dostigao 6500000, dok je u Srbiji gotovo zanemarljiv jer nema linijskog prevoza kako u domaćem, tako i u međunarodnom saobraćaju.

Potiskivani sklopovi prevladavaju na Dunavu. Oko 90 % od svih transportnih procesa na Dunavu se izvodi potiskivanim sklopovima, dok se samo 10 % vrši motornim teretnjacima, odnosno individualnim pogonskim brodskim jedinicama. Na području sliva reke Rajne ova srazmera potiskivanih sklopova prema motornim teretnjacima je upravo suprotna (Priručnik za unutrašnju plovidbu u Republici Hrvatskoj, 2006).

Maksimalan broj teretnjaka u sastavu potiskivanih teretnjaka zavisi od deonice Dunava na kojoj se vrši prevoz tereta. Sastavi potiskivanih teretnjaka sa 4 teretnjaka su najčešći tip plovila koji se sreće na Dunavu između Luke Passau u Nemačkoj i mađarsko-slovačke granice pri prirodnom režimu plovnog toka i povoljnim hidrološko-meteorološkim uslovima plovidbe². Na Donjem Dunavu, sastav potiskivanih teretnjaka se može sastojati čak i od 16 teretnjaka (Priručnik za unutrašnju plovidbu u Republici Hrvatskoj, 2006).

Preduzeća u delatnosti saobraćaja unutrašnjim plovnim putevima Srbije raspolagala su krajem 2010. godine sa oko 310 plovnih prevoznih sredstava, raspoložive nosivosti od oko 320000 t i ukupne snage pogonskih motora od oko 50000 kW (videti Tabelu 2.1). Preko 77% čine plovila za prevoz suvog tereta, a ostalo su plovila za prevoz tečnog tereta. Tokom 2010. godine pređeno je preko milion kilometara plovnog puta sa teretom, pri čemu je trajanje saobraćaja iznosilo oko 1,5 miliona časova, dok je zadržavanje iznosilo oko 300 hiljada časova godišnje (videti Tabelu 2.2).

Tabela 2.1. Plovna prevozna sredstva na unutrašnjim plovnim putevima Republike Srbije, kraj 2010. godine (Izvor: Republički zavod za statistiku, 2010.)

	Putnički brodovi	Motorni potiskivači	Motorni tegljači	Motorni teretnjaci i motorni tankovi ³	Tankovi ⁴ i kombi teretnjaci ⁵	Potisnice	Potisnice tankovi ⁶	Tegljnice
Broj	3	24	17	39	28	60	122	18
Snaga (kW)	922	27506	7049	–	–	–	–	–
Putnička mesta	104	–	–	–	–	–	–	–
Nosivost (t)	–	–	–	38594	29121	74753	162934	8145

Tabela 2.2. Rad i iskorišćenost plovnih prevoznih sredstava preduzeća saobraćaja na unutrašnjim plovnim putevima, 2010, Republika Srbija (Izvor: Republički zavod za statistiku, 2010.)

	Ukupno	
	Motorni tegljači i potiskivači	Teretna plovila
Broj objekata – ukupno	41	267
Nosivost (t)	–	313547
Pređeni put (km) – ukupno	257794	1621972
Od toga sa teretom	205819	917104
Put jednog objekta godišnje (km)	6288	6075
Kalendarski fond vremena (časova) – ukupno	273020	1752761
Od toga u saobraćaju (časova)	195672	1446714

² Bez vetra, leda, magle, talasa i pri ustaljenom rečnom toku i ustaljenoj brzini strujanja vode

³ Motorni tank je motorni teretnjak namenjen za prevoz tečnog tereta

⁴ Tank je teretno plovilo bez sopstvenog pogonskog motora namenjeno za prevoz tečnog tereta

⁵ Kombi teretnjak je plovilo bez sopstvenog pogona, koje je jednim delom namenjeno za prevoz čvrstog tereta, a drugim delom za prevoz tečnog tereta

⁶ Tank-potisnica je nesamohodni potiskivani teretnjak koji služi za prevoz tečnog tereta

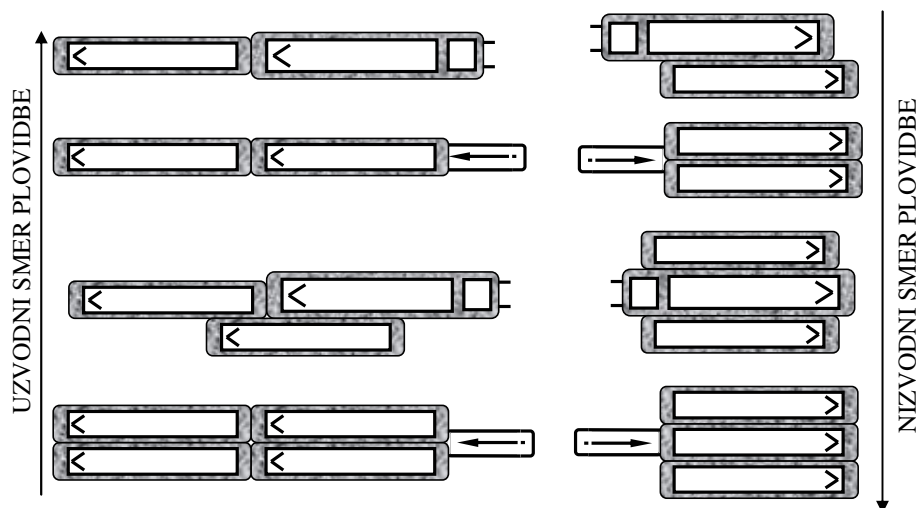
2.2. Osobnosti sistema potiskivanih sklopova

Potiskivani sklopovi se sastoje od broda-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka čineći na taj način jednu plovnu celinu. Oni se mogu smatrati jedinstvenim plovnim telom. Sastav potiskivanih teretnjaka se obično sastoji od 2, 4 ili 6 teretnjaka kojima upravlja brod-potiskivač odgovarajuće snage pogonskog motora. Standardni evropski potiskivani teretnjaci imaju dužinu od 76,5 metara, širinu od 11,0 ili 11,4 metara i nosivost od oko 1650 tona za gaz od 2,5 metra (Via Donau, 2013). Koriste se u velikom broju na celom koridoru Rajna-Majna-Dunav. Sastav potiskivanih teretnjaka od 6 potinica ima dužinu do oko 250 metara (brod-potiskivač i tri potiskivana teretnjaka po dužini – oznaka „2+2+2“). Kada ovakav sastav potiskivanih teretnjaka plovi nizvodno teretnjaci su obično postavljena dva po dužini, i po tri bok uz bok (oznaka „3+3“) u istoj liniji i u ovom slučaju sastav ima sveukupnu širinu do 34,2 metra.

Pre formiranja potiskivanog sklopa vrši se formiranje sastava potiskivanih teretnjaka. Osnovno pravilo za formiranje sastava potiskivanih teretnjaka je da se teretnjaci u formacijama sastava grupišu tako da umanje otpor vode pri kretanju. To se postiže formiranjem osnovnih vidova sastava potiskivanih teretnjaka (Kreculj i Čolić, 1996) - videti Sliku 2.2.

Teretnjaci u potiskivanim sastavima nisu strogo pričvršćeni ako njihove tehničke karakteristike to dozvoljavaju, već imaju fleksibilne spojnice koje im omogućavaju da savladavaju zakrivljenost u područjima plovnih puteva sa malim poluprečnicima krivina. Takođe je moguće kontrolisati stepen savijanja potiskivanih sklopova prilikom zaokreta u krivinama. U ostalim slučajevima, sastav potiskivanih teretnjaka je čeličnim užadima povezan sa brodom-potiskivačem pomoću pritezni vitla.

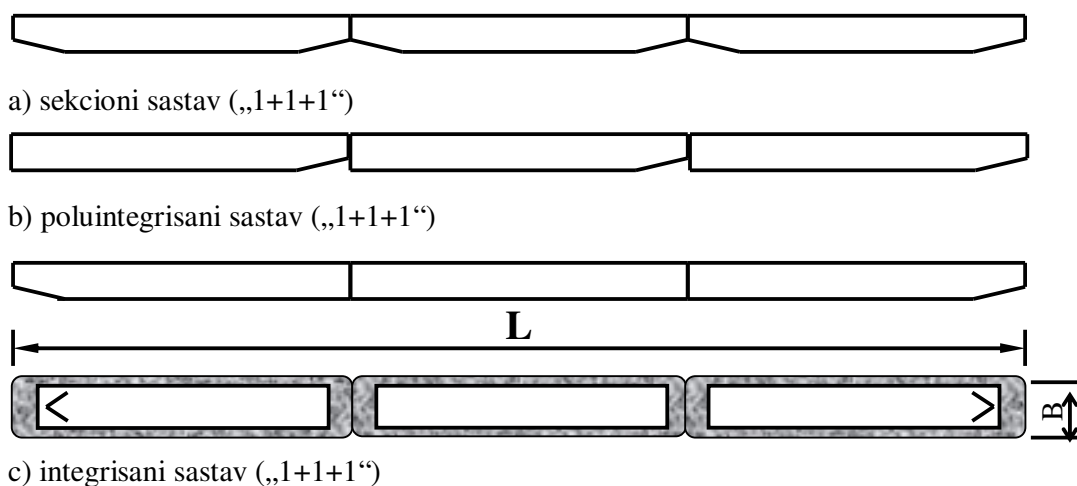
Da bi se dodatno smanjio otpor potiskivanog sklopa, sastavi potiskivanih teretnjaka se prethodno formiraju na osnovu toga da li potiskivani sklop plovi uzvodno ili nizvodno. Prilikom plovidbe uzvodno, potiskivani sklop bi trebao imati što manju širinu (da bi se smanjila potrošnja goriva), zbog čega su teretnjaci raspoređeni jedan iza drugog. Suprotno, teretnjaci su raspoređeni jedan do drugog kod nizvodne plovidbe, čime se i olakšava upravljivost potiskivanog sklopa. Na Slici 2.2 prikazani su najčešći potiskivani sklopovi koji se javljaju na Gornjem Dunavu.



Slika 2.2. Najčešći potiskivani sklopovi na Gornjem Dunavu (Izvor: Via Donau, 2013)

2.2.1. Potiskivani teretnjaci

Sastavi potiskivanih teretnjaka predstavljaju plovnu celinu i mogu se smatrati jedinstvenim plovnim objektom. Potiskivani teretnjaci (potisnice) su prizmatičnog oblika, te obezbeđuju veću prostornost u poređenju sa tzv. „klasičnim teretnjacima” (tegljenicama) istih glavnih dimenzija. Nemaju stambenih prostorija, niti uređaje za krmarenje. Sastavi potiskivanih teretnjaka predstavljaju celinu i mogu se smatrati jedinstvenim plovnim telom. Osnovni vidovi sastava potiskivanih teretnjaka su sekcioni, poluintegrirani (polusjedinjeni) i integrirani (potpuno sjedinjeni) i prikazani su na Slici 2.3 (Kreculj i Čolić, 1996).



Slika 2.3. Osnovni vidovi sastava potiskivanih teretnjaka

Sekcioni sastav se sastoji iz *simetričnih potiskivanih teretnjaka*⁷. Ovakvi oblici teretnjaka koriste se u slučajevima kada se po rasturanju sastava mora posebno manevisati sa pojedinim teretnjacima kao na primer pri radu uz bagere za iskop šljunka (videti Sliku 2.3-a).

Poluintegrirani sastav (videti Sliku 2.3-b) sastoji se iz *nesimetričnih potiskivanih teretnjaka*⁸.

Integrirani sastav (videti Sliku 2.3-c) ima u prvom i poslednjem redu teretnjake čiji je oblik kao kod onih u poluintegrisanom sastavu (nesimetrični potiskivani teretnjaci), dok se u sredini nalaze potpuno prizmatična tela – „sandučare”.

Potiskivani teretnjaci imaju manju nabavnu cenu od tegljenih teretnjaka iste nosivosti, jer im je oblik jednostavniji, a nemaju stambene prostorije i uređaje za krmarenje. I njihovo iskorišćavanje (eksploatacija) je jeftinije, pošto nemaju posade, dok je otpor pravilno formiranih sastava često i povoljniji od otpora povorki tegljenih teretnjaka. U Tabeli 2.3 dati su osnovni podaci o savremenim potiskivanim teretnjacima.

Tabela 2.3. Osnovni podaci o savremenim potiskivanim teretnjacima (potisnicama)

Vrsta teretnjaka	L _{KVL} (m)	B _{KVL} (m)	T _{km} (m)	T _{ko} (m)	D _m (t)	Q _r (t)
Dunavska potisnica	40,23	8,24	2,20	0,35	661,0	565,0
Dunavska potisnica	67,00	10,23	2,30	0,41	1450,0	1217,0
Dunavska potisnica	77,00	11,00	2,50	0,42	1941,0	1599,0
Dunavska potisnica (tank teretnjak)	66,97	10,23	2,30	0,36	1454,0	1221,0
Rajnska potisnica	64,00	9,20	2,75	0,40	1500,0	1295,0
Potisnica tipa Evropa I	70,00	9,50	2,00	0,40	1197,0	1000,0
Potisnica tipa Evropa II	76,5	11,40	2,50	0,40	1962,2	1750,0

⁷ Simetrični potiskivani teretnjak je teretnjak čiji su pramčani i krmeni delovi trupa istog oblika (oblika smičke), a bokovi su paralelni, sa malim bočnim uzvojem pri dnu.

⁸ Nesimetrični potiskivani teretnjak je teretnjak kod koga je krmeni deo trupa potpuno vertikalna površina sa veoma blagim uzvojem pri dnu, dok pramčani deo ima oblik smučke. Bočne stranice su potpuno paralelne, sa malim bočnim uzvojem pri dnu.

2.2.2. Brodovi-potiskivači

Primena potiskivanja sastava nesamohodnih teretnjaka zahteva naročite motorne brodove – potiskivače. Ovakvi se brodovi znatno razlikuju od tegljača. Na prvom mestu kraći su od tegljača istih snaga, kako bi im propeleri radili u zoni sustrujanja sklopa i na taj način postigli veći stepen propulzije. Umesto uređaja za vuču, na pramcu su postavljeni naročiti nasloni („rogovi”) pomoću kojih se sastav potiskivanih teretnjaka potiskuje, dok se na krmi nalaze snažni sidreni uređaji.

Radi postizanja potrebnih manevarskih svojstava pri plovidbi velikih potiskivanih sklopova, brodovi-potiskivači moraju da imaju posebne uređaje za krmilarenje koji se sastoje od dvostrukih bočnih krmernih pera (tzv. flankirajućih krmila). U Tabeli 2.4 prikazane su karakteristike samo nekih od savremenih dunavskih motornih potiskivača.

Tabela 2.4. Osnovni podaci o savremenim dunavskim motornim potiskivačima

Ime broda	N_{inst} (kW)	n ($^{\circ}/_{min}$)	L_a (m)	B_a (m)	H_k (m)	T_{km} (m)	D_m (t)
„Kablar”	2x110	425	22,08	6,00	2,20	1,40	121,3
„Vinodol”	2x380	700	30,04	9,22	2,56	1,70	314,6
„Deligrad”	2x465	750	35,51	9,80	2,55	1,50	354,4
„Sloga”	2x705	305	33,64	10,98	2,63	1,65	393,0
„Kadinjača”	3x810	300	34,29	11,00	2,60	1,80	505,0
„Karlovac”	3x1030	750	40,30	13,03	2,95	2,15	810,0

3. Opšta razmatranja o eksperimentalnim ispitivanjima plovidbenih osobina izgrađenih brodova i numeričkim metodama za proračun snage glavnog pogonskog motora

Eksperimentalno istraživanje tehničko-eksploatacionih osobenosti brodova vrši se metodama probnih ispitivanja na njihovim modelima (u posebnim istraživačkim bazenima) ili sa izgrađenim brodovima (u stvarnim uslovima na plovnom putu). Plovidbene osobine brodova ispituju se eksperimentalnim putem jer teoretske metode još ne mogu dati potpun odgovor na praktična pitanja projektovanja i tehničke eksploatacije brodova.

Prema tome eksperimentalna ispitivanja mogu se obavljati na dva načina:

- ispitivanjem modela brodova u istraživačkim bazenima i
- ispitivanjem izgrađenih brodova na plovnom putu.

3.1. Ispitivanje modela brodova u istraživačkim bazenima

3.1.1. Opšti pojmovi

Modeli se grade potpuno geometrijski slični sa stvarnim brodom čije se tehničko-eksploatacione karakteristike određuju. U današnje vreme se gotovo ne gradi ni jedan veći brod, a da se pre toga ne ispita njegov model. Za predstavnike novih vrsta brodova ispituje se veći broj različitih modela (broda i njegovih propelera) da bi se došlo do najpovoljnijeg rešenja. Isto tako, modeli se ispituju u više istraživačkih zavoda, pa se dobijeni rezultati upoređuju (poznato je, na primer, da je prilikom građenja francuskog preookeanskog broda „Normandija” bilo ispitivano preko 90 različitih modela u francuskim, engleskim i nemačkim zavodima).

Osnovni uređaj za ispitivanje modela je bazen iznad kojeg se kreću kolica ili neka druga naprava, koja tegli model broda, noseći istovremeno merne instrumente.

Bazeni mogu biti opremljeni i sa uređajima za stvaranje talasa, sa pumpama koje stvaraju strujanje vode unutar bazena, kako bi se opisali stvarni uslovi koji vladaju na reci. Merni instrumenti su takođe različiti, od najjednostavnijih mehaničkih vaga i dinamometara do složenih elektronskih uređaja. Široka primena elektronike u mernoj tehnici doprinela je da su merni instrumenti danas znatno usavršeni i visoko precizni, što omogućava da se dobiju pouzdaniji rezultati i tačniji zaključci u odnosu na merenja koja su izvođenja bez primene elektronskih mernih instrumenata.

Bazeni su dužine od 100 do 1000 metara, široki su od 3 do 18 metara i duboki od 1,5 do 8 metara. Sa hidrodinamičkog gledišta poželjan je što veći bazen, dok je sa ekonomskog stanovišta stvar obrnuta.

Materijali gradnje modela su: meko drvo, parafin ili plastika, kako bi se prilikom ispitivanja mogle vršiti ispravke oblika modela.

Dužina modela je obično od 4 do 8 metara. Izbor dužine modela zavisi od više činilaca. Veći model se može tačnije izraditi što omogućuje veću tačnost u merenju. S druge strane, ukoliko je model veći, veći su i troškovi njegove izrade, potrebni su i jači merni uređaji, a to zahteva dugačke i skupe bazene. Kada je za neki bazen model prevelik dolazi do izražaja uticaj zidova i dna bazena na model broda, što, na primer, dovodi do znatno uvećanog izmerenog ukupnog otpora (u slučaju takve vrste ispitivanja).

Smatra se da dužina modela ne bi smela biti veća od dubine vode u bazenu, odnosno ne veća od polovine širine bazena (kako bi se izbegao uticaj zidova bazena na model broda).

Prilikom ispitivanja treba preduzeti mere da duž modela bude turbulentno strujanje. To se rešava prekidanjem laminarnog strujanja nekom rapavošću u blizini pramca. Najčešće se za podsticaj turbulentnog strujanja upotrebljava vrlo tanka žica prečnika 1 mm koja je pričvršćena uz površinu modela.

Pre početka ispitivanja u model se stavlja balast koji se raspoređuje tako da se dostigne potrebna istisnina i da model bude uronjen do predviđene vodne linije.

Modeli koji se obično upotrebljavaju za ispitivanje otpora ne predstavljaju kompletan brodski trup, već se izvode iznad plovne vodne linije tek toliko da voda ne ulazi u model za vreme ispitivanja; nadvođe je malo iz ekonomskih razloga. Nasuprot tome, modeli koji se ispituju na talasima u bazenu, izvode se tako da potpuno predstavljaju kopiju broda.

Naučni osnov ispitivanju modela brodova postavio je engleski istraživač Vilijam Frud (William Froude)⁹. Sredinom XIX veka (1869.g.) V.Frud je razradio svoje poznate zakone sličnosti i pokazao kako se mogu koristiti za određivanje određenih tehničko-eksploatacionih osobenosti broda na osnovu rezultata ispitivanja modela.

U standardna ispitivanja modela broda spadaju:

- Ispitivanje otpora modela broda pri određenoj brzini plovidbe. Zadatak ovog ispitivanja je da se za konkretan slučaj i postavljene zahteve odredi takav oblik broskog trupa, koji će pružiti najmanji otpor za vreme plovidbe broda. Ovo se ispitivanje sprovodi tegljenjem modela broda u bazenu i merenjem otpora modela pomoću posebnih instrumenata.
- Ispitivanje sopstvenog pogona modela broda. Kod ovog ispitivanja model je opremljen sopstvenim pogonskim motorom i kreće se sopstvenom snagom, a instrumenti beleže koliki je utrošak snage pri pojedinim brzinama. Zadatak ovog ispitivanja je da se odredi najbolji sistem: trup broda + propeler, i da se predvidi kolika je potrebna snaga pogonskog motora za traženu brzinu.

Pored nabrojanih standardnih ispitivanja modela postoji niz specifičnih ispitivanja, od kojih su svakako jedno od najvažijih ispitivanja modela propelera u kavitacionom tunelu. Tim ispitivanjima određuju se karakteristike propelera, kako bi on bio otporan ili što manje podložan pojavi kavitacije, jer se usled te pojave smanjuje stepen delovanja propelera, a i uništava sam materijal od kojeg je propeler izrađen.

Važna su i ispitivanja krmilarenja, manevarska svojstva (npr. kružnica okretanja), zatim kojima se određuju optimalne karakteristike krmila i najpovoljniji odnos sistema brod + krmilo, ispitivanja stabiliteta, ispitivanja ponašanja broda na talasima itd.

3.1.2. Principi modeliranja

U savremenim istraživanjima plovibnenih osobina brodova glavnu ulogu imaju modelska istraživanja. U racionalnom planiranju eksperimenata, razradi njihovih rezultata i preračunavanju na već izgrađene brodove, veliku ulogu imaju metode *teorije sličnosti*. Teorija sličnosti omogućava da se reše sledeći zadaci:

⁹ Vilijam Frud (1805. – 1879. g.), engleski inženjer brodogradnje. Sarađivao je na gradnji prvih čeličnih brodova, a zatim se posvetio proučavanju otpora i propulzije. Razradio je teoriju određivanja otpora na osnovu ispitivanja modela. Frudov način određivanja otpora je od epohalnog značaja za brodogradnju.

1. da se odrede uslovi modeliranja fizičkih pojava i procesa, tj. da se ustanove zakoni sličnosti;
2. da se otkriju karakteristične veličine koje određuju osnovne oblike pojave ili procesa, tj. da se ustanove kriterijumi sličnosti;
3. da se odredi struktura zavisnosti koje međusobno povezuju fizičke karakteristike (veličine) pojava ili procesa.

Prilikom razmatranja dva geometrijska tela (geometrijski oblik broda modela i geometrijski oblik već izgrađenog broda) prvi zahtev koji se postavlja za oba geometrijska tela jeste zahtev *geometrijske sličnosti*. Dva geometrijska tela su geometrijski slična ako se sve odgovarajuće linearne dimenzije broskog trupa (kod broda su to dužina, širina, poluprečnici krivine u svim važnim tačkama broskog trupa, kvadratni koreni okvašenih površina broskog trupa, kubni koreni istisnina broskog trupa itd.) u oba oblika nalaze u istoj razmeri.

Za razliku od uslova sličnosti pri ispitivanju otpora broda i karakteristika propelera, pri ispitivanju krmilarenja broda, pored geometrijske sličnosti modela i izgrađenog broda, potrebno je uzeti u obzir hidrodinamičke sile i inerciona svojstva samog broda, tj. njegovu masu, koordinate težišta broda itd. Pretpostavlja se da se model i brod ispituju u istoj tečnosti.

NAPOMENA: Treba imati u vidu da se ispitivanja modela obavljaju pod izuzetno povoljnim hidrolško-meteorološkim uslovima plovidbe i da se ovi uslovi znatno razlikuju od stvarnih uslova na plovnom putu. Zato, pored modelskih ispitivanja, po mogućstvu uvek treba po izgradnji broda obaviti i njegovo ispitivanje na odgovarajućem plovnom putu.

3.2. Eksperimentalna ispitivanja izgrađenih brodova na plovnom putu

Gradnja broda po pravilu se završava posebnim ispitivanjima izgrađenih brodova. Svrha ovih ispitivanja je da se odrede plovidbene osobine broda i da se oceni da li ona potvrđuju projektne račune i da li rezultati ispitivanja ispunjavaju naznačene garancije koje su naručiocu dali projektant i brodogradilište.

Ispitivanja su osnovni izvor podataka o ponašanju brodova na plovnom putu. Ispitivanja izgrađenih brodova na plovnom putu daju najpouzdanije numeričke podatke o plovidbenim osobinama brodova od svih metoda koje se trenutno primenjuju.

Međutim, ona se mogu uraditi samo sa već postojećim brodovima, što isključuje bilo kakvo menjanje pojedinih karakteristika broda. Ova ispitivanja zahtevaju veliku složenost organizacije i izvođenja kao i velike troškove. Zbog ovih razloga, ispitivanja izgrađenih brodova se vrše uglavnom zato da bi se kontrolisala tačnost empirijskih metoda proračuna parametara plovidbenih osobina brodova zasnovanih na modelskim ispitivanjima i da bi se ispravile metode preračunavanja rezultata modelskih ispitivanja u izgrađeni brod (koeficijent korelacije).

Ispitivanje se obavlja na određenom plovnom putu, na tzv. „mernoj stazi” koja mora da ispunjava određene uslove. Pre svega, merna staza se utvrđuje na poznatom plovnom putu ujednačenog uzdužnog i poprečnog profila. Neophodno je poznavanje i svih ostalih meteoroloških i navigacionih uslova. Po mogućstvu merna staza treba da bude u pravcu, a da ne bude izložena dejstvu vetra. U toku samog ispitivanja merna staza se prelazi istom brzinom nekoliko puta (uzvodno i nizvodno), pre svega da bi se dobili što tačniji rezultati, a i u cilju određivanja brzine rečnog toka (Δv) (Kreculj i Čolić, 1996 i SNAME, 1988).

Brzina rečnog toka (Δv) jednaka je:

$$\Delta v = \frac{\downarrow v_t - \uparrow v_t}{2} \text{ (km/h)} \quad (3.1)$$

gde su:

v_t – tehnička brzina broda (brzina odmicanja). To je brzina u odnosu na neku nepokretnu tačku na obali (km/h).

$\downarrow v_t$ – tehnička brzina broda u nizvodnoj plovidbi (nizvodna tehnička brzina) (km/h).

$\uparrow v_t$ – uzvodna tehnička brzina broda (km/h).

Brzina broda u odnosu na vodu približno je jednaka:

- ukoliko se brod kreće uzvodno:

$$\uparrow v = \uparrow v_t - \Delta v \text{ (km/h)} \quad (3.2)$$

- u slučaju da se brod kreće nizvodno:

$$\downarrow v = \downarrow v_t + \Delta v \text{ (km/h)} \quad (3.3)$$

Na osnovu izraza 3.2 i 3.3 proračunava se brzina plovidbe broda u mirnoj vodi (v_{pl}) pomoću sledećeg izraza:

$$v_{pl} = \frac{\uparrow v + \downarrow v}{2} \text{ (km/h)} \quad (3.4)$$

Pri ispitivanju obavezno se obavlja plovidba sa više različitih brzina kako bi se dobile tačke za rekonstrukciju odgovarajućih dijagrama. Pri samom ispitivanju, brod koji se ispituje mora stalno da održava utvrđeni kurs i pravac.

Osnovna ispitivanja plovidbenih osobina brodova mogu se podeliti na: poligonska ispitivanja (ispitivanja brzine, manevarska ispitivanja i ispitivanja plovnosti sa ispitivanjima čvrstoće¹⁰) i eksploataciona ispitivanja.

Ispitivanja brzine imaju za svrhu da se dobiju podaci o maksimalnoj brzini broda u mirnoj vodi i pri neznatnom vetru, uz punu snagu glavnih pogonskih motora, a i uz nekoliko međurežima rada motora koji su okarakterisani progresivnim porastom broja obrtaja propelera. Ta se ispitivanja obično vrše u dubokoj vodi, da bi se isključio uticaj plitke vode na otpor vode kretanju broda. Ako treba ispitati taj uticaj, tada se propulziona ispitivanja vrše na različitim dubinama vode.

Manevarska ispitivanja daju podatke o karakteristikama okretljivosti broda pri različitim uglovima skretanja krmila, uz najveću brzinu i nekoliko međubrзина; o stalnosti broda na kursu; o vremenu i dužini napredovanja broda pri vožnji krmom, i o nizu drugih elemenata značajnih za ocenu manevarskih svojstava broda.

Ispitivanja plovnosti broda se vrše da bi se odredila i ocenila sposobnost broda da se pod dejstvom spoljnih sila (pre svih talasa i vetra) može održavati na vodi. Osnovno mesto u tim istraživanjima zauzimaju istraživanja o valjanjima broda¹¹ (uglavnom kod morskih brodova), jer ona bitno utiču na sve ostale osobine plovnosti broda. Ispituje se pod različitim okolnostima određenom snagom vetra i talasa, brzinom kojom brod napreduje i smerom kojim se kreće u odnosu na pramčane talase. Pored toga, meri se naprezanje, ubrzanje i pritisak vode u raznim tačkama trupa broda.

Eksploataciona ispitivanja vrše se dugoročno (višegodišnje) za prikupljanje brodskih podataka o održivoj brzini i kursu, snazi pogonskih motora i broju obrtaja propelera i o drugim podacima pri uobičajenim hidrološko-meteorološkim uslovima plovidbe broda (vetar, talasi, utovarenost broda itd.). Ta se ispitivanja obično vrše pri plovidbi broda na određenoj mernoj stazi. Po pravilu se ova ispitivanja vrše pomoću instrumenata, ali je vredno i samo vizuelno osmatranje; rezultati se unose u poseban dnevnik broda. Pored modelskih i poligonskih ispitivanja, eksploataciona ispitivanja su treći član bez kojeg se ne može rešavati korelacija model-brod.

¹⁰ Sposobnost broskog trupa da se pod dejstvom spoljnih sila (težinskih sila i sila potiska) trajno ne deformiše, tj. ne prelomi

¹¹ Pod valjanjem broda se podrazumeva opšti izraz za istovremeno ljuljanje (naginjanje broda s boka na bok) i posrtanje broda (naginjanje broda po pramcu i krmu).

Ispituje se obično na mernom kilometru koji predočava tačno poznatu dužinu koja ne može biti veća od jednog kilometra. Ta dužina je jasno obeležena upadljivim vizirima na kopnu (kilometarski stubovi na obali reke). Pažljivo se registruje vreme potrebno za prolaz merne deonice, zajedno sa maksimalnim brojem obrtaja propelerskih vratila. Da bi se smanjio uticaj na povećanje otpora, krmilo se za vreme plovidbe upotrebljava što je moguće manje.

Ispitivanje se ponavlja pri različitim snagama pogonskog motora, sve do maksimalne vrednosti snage. Pri svakoj snazi plovi se najmanje dvaput u suprotnim smerovima, čime se otklanja učinak rečnog toka. Ako se plovi u jednakim vremenskim intervalima, računa se srednja brzina, tj. osrednjuje se svaki par vrednosti uzastopnih brzina koje su dobijene uzvodnom i nizvodnom plovidbom. Ukoliko je izvršeno više uzvodnih i nizvodnih plovidbi, onda se pronalazi srednja vrednosti njihovih osrednjenih vrednosti.

3.2.1. Eksperimentalna ispitivanja potiskivanih sklopova na unutrašnjim plovnim putevima

Eksperimentalna ispitivanja izgrađenih brodova unutrašnje plovidbe na plovnom putu predstavljaju osnovni izvor podataka o plovidbenim, prevoznim, energetskim i propulzionim osobenostima takvih tipova brodova. Plovnost i manevarske osobine brodova se takođe određuju istraživanjem plovidbenih svojstava brodova. Kada je reč o brodovima-potiskivačima, ovim ispitivanjima se, osim o navedenim osobenostima, istražuju i propulziona-potisne osobenosti.

Sve plovidbene, prevozne, energetske i propulzione osobenosti brodova unutrašnje plovidbe se određuju eksperimentalnim putem. Numeričke metode za proračun pomenutih osobenosti brodova još ne mogu dati potpuni odgovor na hidrodinamičke pojave koje se menjaju sa mestom plovidbe i tipom plovnog sredstva koje se koristi tokom plovidbe. Osim toga, numeričke metode daju grešku i one nikada ne mogu dati 100% tačan izlazni rezultat, čak i kada brod plovi pri istim hidrološko-meteorološkim uslovima plovidbe.

Danas se eksperimentalna ispitivanja plovidbenih osobina izgrađenih brodova unutrašnje plovidbe mogu podeliti na propulziona ispitivanja i manevarska ispitivanja. Propulziona ispitivanja obuhvataju ispitivanja brzine plovidbe, potisno-vučna ispitivanja i vučno-dinamometrijska ispitivanja, dok manevarska ispitivanja obuhvataju manevar

zaustavljanja broda pri plovidbi broda pramcem, manevar plovidbe broda krmom, manevar „cik-cak“ i manevar „kružnica okretanja“.

Eksperimentalna ispitivanja plovidbenih osobina izgrađenih brodova unutrašnje plovidbe se izvode na područjima plovnih puteva koja su posebno odredile nadležne institucije. Ova ispitivanja trebalo bi da se odvijaju na deonicama plovnih puteva dužine najmanje 2 km (Pravilnik o načinu obavljanja probne vožnje brodova i zonama plovidbe, 2012). Širina takvih deonica trebalo bi da bude dovoljna da plovilo koje se ispituje može da obavi plovidbu u jednom smeru i to bez ometanja plovidbe brodova koji dolaze iz suprotnog smera. Trenutak ispitivanja se podešava tako da voda na mernoj deonici bude mirna, odnosno bez talasa. Deonica za ispitivanje mora da poseduje precizne oznake na plovnom putu kojima se lako utvrđuje pozicija plovila. Ovakvim pristupom se omogućava nadležnim institucijama za kontrolu ispitivanja da lako iscertaju hidrološke podatke kao što su dubina vode, širina plovnog puta i srednja brzina strujanja vode na mernoj deonici u funkciji nivoa vode (Economic commission for Europe, 2006).

Tokom eksperimentalnih ispitivanja, plovila i sastavi plovila na unutrašnjim plovnim putevima su opterećeni do vodne linije koja se prethodno ugovara posebnim ugovorom sa brodarstvom. Međutim, plovila su najčešće natovarena do konstrukcione vodne linije. Sva oprema koja se nalazi u krmilarnici i kojom se upravlja plovilima može da se koristi tokom ispitivanja.

3.2.1.1 Pravila koja se odnose na brodove unutrašnje plovidbe Ruskog registra brodova koji obavljaju plovidbu na Dunavu

Ova pravila se odnose na samohodne motorne teretnjake najmanje dužine 40 metara i putničke brodove čija je najmanja dužina 20 metara, a ne odnose se na potiskivane i tegljene sastave. Eksperimentalna ispitivanja plovidbenih osobina pomenutih brodova se primenjuju na:

1. modele brodova
2. izgrađene brodove
3. brodove koji su remontovani i modernizovani tako da su im promenjene plovidbene osobine.

Odstupanja od gaženja plovila tokom eksperimentalnih ispitivanja mogu biti najviše 10%. Ispitivanja se obavljaju na deonicama plovnih puteva dovoljne dubine i

širine i bez talasa. Dubina vode treba da bude veća tri puta u odnosu na gaženje plovila koje se ispituje, dok brzina vetra ne treba da prelazi 3-4 m/s.

3.2.1.2 Preporuke Dunavske komisije koje se odnose na plovibne osobine potiskivačkih sastava

Pravila su napravljena tako da odrede plovibne osobine ispitanih potiskivanih sklopova kako bi se povećala bezbednost plovibne na unutrašnjim plovim putevima. Brodovi-potiskivači uvek treba da imaju dovoljno snage kako bi izveli potreban manevar kretanja sastava bilo uzvodno bilo nizvodno.

Da bi se pravilno odredile plovibne osobine potiskivanog sklopa, prethodno moraju da se pravilno utvrde svi parametri koji utiču na plovibu potiskivanih sklopova, ali i hidrološko-meteorološki uslovi koji vladaju na deonici plovnog puta na kojoj se vrši eksperimentalno ispitivanje. Tokom eksperimentalnih ispitivanja plovibnih osobina potiskivanih sklopova rade se najmanje dva merenja parametara rada brodova, a zatim se proračunavaju srednje vrednosti. Analiza rezultata merenja se sprovodi po okončanju samih eksperimentalnih ispitivanja, a zatim se određuju konačne vrednosti parametara rada svakog pojedinačnog ispitanog sklopa.

Eksperimentalna ispitivanja plovibnih osobina potiskivanih sklopova vrše se na pravim deonicama plovnog puta dovoljne dubine i širine i gde je protok vode konstantan. Merenja se obavljaju u vodi bez talasa, a brzina vetra ne treba da prelazi $2 B_0$ ¹² (Economic commission for Europe, 2006). Na deonici na kojoj se vrše merenja moraju postojati plovibne oznake kojima se definiše merna deonica, kao i oznake udaljenosti, tj. bove sa radarskim reflektorima. Hidrološko-meterološki uslovi koji su vladali tokom eksperimentalnih ispitivanja na mernoj deonici i koji su trebali biti zabeleženi obuhvataju:

- lokacija merne deonice (od km ... do km ...) i dužina merne deonice;
- datum (dan, mesec i godina) i vreme izvršenih merenja na plovnom putu (mernoj deonici);
- vremenske prilike tokom merenja (vidljivost, smer i brzina vetra);
- vodostaj reke, izmeren na najbližoj vodomernoj stanici;
- srednja brzina strujanja vode;
- srednja širina plovnog puta;
- srednja dubina plovnog puta.

¹² Bofori, $2B_0 = 6 \div 11$ km/h (Kreculj i Čolić, 2004)

Potiskivani sklopovi (učesnici eksperimentalnih ispitivanja) određuju se na osnovu sektora plovnog puta, ali i na osnovu propulziona-energetskih osobnosti brodova-potiskivača koji učestvuju u testiranju. Princip je da sastavi potiskivanih teretnjaka u sklopovima budu najveći dopušteni u određenom sektoru plovidbe, ali i da budu maksimalni u odnosu na snagu glavnog pogonskog motora broda-potiskivača i manevarskih osobina broda-potiskivača. Veličina sastava potiskivanih teretnjaka se određuje na osnovu praktičnih iskustava, tj. na osnovu prethodnih plovidbi (ako ih je bilo) koje je pojedini brod-potiskivač ostvario, tako da u obzir mogu da dođu i sastavi koji su manji od najvećih dopuštenih. Na sektorima plovnih puteva gde su tačno propisani najveći dopušteni sastavi potiskivanih teretnjaka nije dozvoljeno da prilikom eksperimentalnih ispitivanja učestvuju sastavi veći od dozvoljenih. Formacije sastava, broj plovila u sastavu i količina prevezene robe tokom eksperimentalnih ispitivanja se određuju na osnovu pravca plovidbe (uzvodno ili nizvodno).

Potiskivani teretnjaci u ispitivanim sklopovima trebali bi biti što više unificirani. To znači da teretnjaci treba da budu istog tipa, dimenzija i da budu natovareni do istog gaza. Glavne karakteristike potiskivanog sklopa se određuju na osnovu sledećih karakteristika:

- vrsta i oznake ispitivanih sklopova („1+1“, „2+2+2“, „3+3“, itd);
- dužina i širina potiskivanog sklopa (L_{skl} , B_{skl});
- deplasman potiskivanog sklopa (D_{mskl}), registrovana i eksploataciona nosivost sastava potiskivanih teretnjaka (ΣQ_r , ΣQ_e);
- glavne dimenzije nesamohodnih potiskivanih teretnjaka u sastavu (L_{ter} , B_{ter} , T_{ter} , D_{mter} , Q_r);
- glavne dimenzije broda potiskivača (L_{pot} , B_{pot} , T_{pot} , N_{inst}).

Pozicija i razdaljina ispitivanih sklopova tokom eksperimentalnih merenja određuju se uređajima koji su instalirani na samoj mernoj deonici (plovidbenim oznakama) ili uređajima satelitske navigacije. Bove sa radrskim reflektorima služe za dobijanje slike ispitivanog sklopa tokom određenih vremenskih perioda. Time se obezbeđuje tačnost izmerenih pozicija do 10 metara.

Tehnička brzina ispitivanog sklopa meri se najmanje dva puta: uzvodno i nozvodno. Ali pre nego što samo merenje započne vrši se priprema merenja, određuju parametri rada broda-potiskivača koji će se ispitivati i podaci koji će da se proračunavaju. Priprema merenja obuhvata (Economic commission for Europe, 2006):

- dužinu merne deonice (koja ne sme da bude manja od 2 km);
- plovidbu potiskivanog sklopa pri najvećem punjenju motora za trajni pogon;
- krmila potiskivača u ispitanom potiskivanom sklopu ne smeju biti zakrenuta za više od $\pm 5^\circ$.

Parametri rada brodova koji će se meriti obuhvataju:

- pređeni put;
- vreme potrebno da se pređe merna deonica;
- srednji broj obrtaja vratila glavnog pogonskog motora.

Podaci koji se proračunavaju su sledeći:

- tehnička brzina pri uzvodnoj plovidbi;
- brzina potiskivanog sklopa u odnosu na vodu pri uzvodnoj plovidbi;
- tehnička brzina pri nizvodnoj plovidbi;
- brzina sklopa u odnosu na vodu pri nizvodnoj plovidbi.

Po obavljenim eksperimentalnim ispitivanjima plovidbenih osobina potiskivanih sklopova, brodovi-potiskivači dobijaju neophodan sertifikat kojim se definišu merodavni sastavi potiskivanih teretnjaka koje imaju pravo da potiskuju, zatim se određuju sastavi koji im najviše ili najmanje odgovaraju sa stanovišta brzine plovidbe sklopa, potrebne snage glavnog pogonskog motora i utrošenog goriva. U okviru sertifikata se označavaju svi ispitani potiskivani sklopovi i sva oprema instalirana tokom ispitivanja na bilo kojem plovilu u ispitanom sklopu. Primer jednog takvog sertifikata je dat na Slici 3.1.

Slika sastava	Maksimalne dimenzije (m)		Smer plovidbe i eksploataciona nosivost (t)				Maksimalna površina okvašenog trupa broda		Primedbe
			UZVODNO		NIZVODNO		Uzvodno	Nizvodno	
Br.	Dužina	Širina	Natovaren	Prazan	Natovaren	Prazan	Uzvodno	Nizvodno	

Slika 3.1. Primer dela sertifikata o izvršenim eksperimentalnim ispitivanjima sklopova
(Izvor: Economic commission for Europe, 2006)

3.2.1.3 Pravila o načinu obavljanja probne vožnje brodova i zonama plovidbe na delu plovnih puteva Dunava, Save i Tise u Republici Srbiji

Ova pravila su preuzeta iz Zakona o plovidbi i lukama na unutrašnjim plovnim vodama Republike Srbije (2012) i Pravilnika o načinu obavljanja probne vožnje brodova i zonama plovidbe (2012). Pod probnom vožnjom se podrazumeva plovidba broda za vreme ili posle gradnje, odnosno obnove ili prepravke broda i pri vršenju osnovnog, redovnog, kontrolnog i vanrednog pregleda postojećeg broda. Zone plovidbe predstavljaju merne deonice (staze) i one su propisane za svaku od tri plovne reke u Srbiji (Dunav, Sava i Tisa). Pravila se odnose na tipove komercijalnih i putničkih brodova i tehničke plovne objekte.

Merna deonica i vreme obavljanja eksperimentalnih ispitivanja plovidbenih osobina brodova se najavljuju lučkoj kapetaniji najranije 72 sata pre početka ispitivanja. Lučka kapetanija obaveštava sve moguće učesnike saobraćaja o eksperimentalnim ispitivanjima na prijavljenoj mernoj deonici najkasnije 24 sata pre početka ispitivanja. Merne deonice su prikazane u Tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Merne deonice na kojima se obavljaju eksperimentalna ispitivanja na plovnim putevima Republike Srbije (Pravilnik o načinu obavljanja probne vožnje brodova i zonama plovidbe, 2012)

REKA DUNAV				
Zona	Rečni km		Raspoloživa širina plovnog puta na deonici pri dubini od 2,5 m	napomena
	Od	Do		
Apatin	1410,6	1408,6	370-460 m	Nije potpuno pravolinijska deonica
	1399,0	1397,0	330-430 m	
Novi Sad	1259,5	1261,0	300-450 m	Nije potpuno pravolinijska deonica
	1245,0	1240,0	320-450 m	
Beograd	1165,0	1162,0	Minimum 500 m	
Pančevo	1158,0	1153,0	Minimum 400 m	
Golubac	1051,5	1049,5	Minimum 700 m	
Donji Milanovac	995,0	993,0	Minimum 800 m	
Kladovo	934,5	932,5	Minimum 650 m	
REKA TISA				
Zona	Rečni km		Raspoloživa širina plovnog puta na deonici pri dubini od 2,5 m	napomena
	Od	Do		
Novi Bečej	70,0	68,0	135-210 m	
Titel	8,6	6,6	180-240 m	
REKA SAVA				
Zona	Rečni km		Raspoloživa širina plovnog puta na deonici pri dubini od 2,5 m	napomena
	Od	Do		
Mačvanska Mitrovica	143,0	141,0	200-260 m	
Beograd Brodotehnika	14,8	12,8	350-450 m	

Za vreme eksperimentalnih ispitivanja, na brodu se nalaze članovi posade i lica zadužena za izvršenje eksperimentalnih ispitivanja. Radove koje će obavljati lica zadužena za izvršenje eksperimentalnih ispitivanja moraju biti predstavljena članovima posade i zapovedniku broda pre samih ispitivanja, da bi se blagovremeno upoznali sa planom aktivnosti. Zapovednik broda mora imati najmanje 2 godine plovidbenog staža na mernoj deonici na kojoj se obavlja eksperimentalno ispitivanje.

3.2.2. Eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova

Proces izvođenja eksperimentalnih ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova obuhvata u prvom koraku praćenje i dokumentovanje svih spoljnih uticaja i stanja broda. Ovi uticaji predstavljaju glavne činioce neophodne za analizu prikupljenih podataka, kao i za razvoj proračunskih metoda kojima se ostvaruje veza između snage pogonskog motora i brzine plovidbe broda. Pomoću ovih činilaca moguće je ispitati pouzdanu tačnost podataka dobijenih tokom eksperimentalnih merenja. Postoje različita eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova i ona mogu biti nabrojana prema ITTC (2002):

- eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova pri projektovanom deplasmanu tokom gradnje broda¹³,
- eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova pri punom deplasmanu (D_m),
- eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova pri sopstvenoj masi broda (D_o),
- ispitivanja vratila pogonskog motora broda kada se jedno od propelerskih vratila oslobodi (*eng. Trailed Shaft Trials*)¹⁴,

¹³ Svrha ovih ispitivanja je da se odredi uticaj deplasmana na brzinu plovidbe i snagu glavnog pogonskog motora. Merenja se sprovode pri deplasmanu koji je unapred određen još tokom gradnje broda, ali mogu da se sprovode i pri najvećem deplasmanu i pri sopstvenoj masi broda što je navedeno u narednim tačkama.

¹⁴ Svrha ovih ispitivanja je da se pronađu odnosi snage glavnog pogonskog motora broda i brzine plovidbe u slučaju udesa na plovnom putu i kod brodova sa više propelerskih vratila. Ispitivanja se izvode tako što se jedno ili više propelerskih vratila odvoje fizički od propelera, a preostalo vratilo iskoristi za pokretanje broda tokom merenja. Ova ispitivanja su naročito korisna kod očuvanja rada jednog motora, zadržavanja neophodne brzine plovidbe i utvrđivanja potrošnje goriva u zavisnosti od kombinacije propelerskih vratila kojima se brod pokreće.

- ispitivanja vratila pogonskog motora broda kada se jedno od propelerskih vratila podese na odgovarajući procenat broja obrtaja od najvećeg broja obrtaja (*eng. Locked Shaft Trials*)¹⁵
- eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti pri broju obrtaja propelerskog vratila koji je veći od 100% od broja dobijenog sa probnog stola u fabrici (*eng. Over-Design Pitch Speed/Power Trials*),
- eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti pri broju obrtaja propelerskog vratila koji je manji od 100% od broja dobijenog sa probnog stola u fabrici (*eng. Under-Design Pitch Speed/Power Trials*)
- eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti pri plovidbi krmom (*eng. Astern Speed/Power Trials*).

Pomenuta eksperimentalna ispitivanja se odnose na morske brodove, ali se mogu primeniti i na brodove unutrašnje plovidbe, te i na brodove-potiskivače. Svrha navedenih eksperimentalnih ispitivanja je da se odredi efekat promene obrtaja propelerskog vratila na odnos brzine plovidbe i snage glavnog pogonskog motora. Merenja se izvode pri broju obrtaja koji je jednak ili manji ili veći za 10% od obrtaja koji se ostvaruje na tzv. „probnom stolu“. U mnogim slučajevima ova eksperimentalna ispitivanja se izvode na osnovu potpisanog ugovora o eksperimentalnim ispitivanjima. U ostalim slučajevima ispitivanja se vrše kako bi se definisao odnos propulzionih osobenosti broda koji je već duže vreme u eksploataciji i to pri određenom deplasmanu broda, broju obrtaja propelerskog vratila itd. Složenost i dužinu ispitivanja diktira svrha ispitivanja koja se čita iz ugovora o eksperimentalnim ispitivanjima ili postoji određena naučna svrha ovakvih merenja.

Eksperimentalnim ispitivanjima rukovodi lice koga je imenovao ili koje je zvanični predstavnik brodogradilišta. Ovo lice je odgovorno za sve faze eksperimentalnih ispitivanja, uvek se nalazi na komandnom mostu tokom ispitivanja i tesno saraduje sa zapovdenikom ili brodovlasnikom broda koji se ispituje. Tokom eksperimentalnih ispitivanja vodi se beleška u brodskom dnevniku koju zadržava predstavnik brodogradilišta. Predstavnik brodogradilišta usklađuje rad između posade

¹⁵ Svrha ovih ispitivanja je da se pronađu odnosi snage glavnog pogonskog motora broda i brzine plovidbe u slučaju udesa na plovnom putu i kod brodova sa više propelerskih vratila. Ispitivanja se izvode tako što se jedno ili više propelerskih vratila podese na odgovarajući procenat broja obrtaja od najvećeg broja obrtaja, a preostalo vratilo iskoristi za pokretanje broda tokom merenja. Ova ispitivanja su naročito korisna kod očuvanja rada jednog motora, zadržavanja neophodne brzine plovidbe i pronalaženja potrošnje goriva u zavisnosti od kombinacije propelerskih vratila kojima se brod pokreće.

broda, osoba koje izvode eksperimentalno ispitivanje i brodovlasnika broda. Tim stručnjaka koji izvode eksperimentalno ispitivanje je odgovoran za (ITTC, 2002):

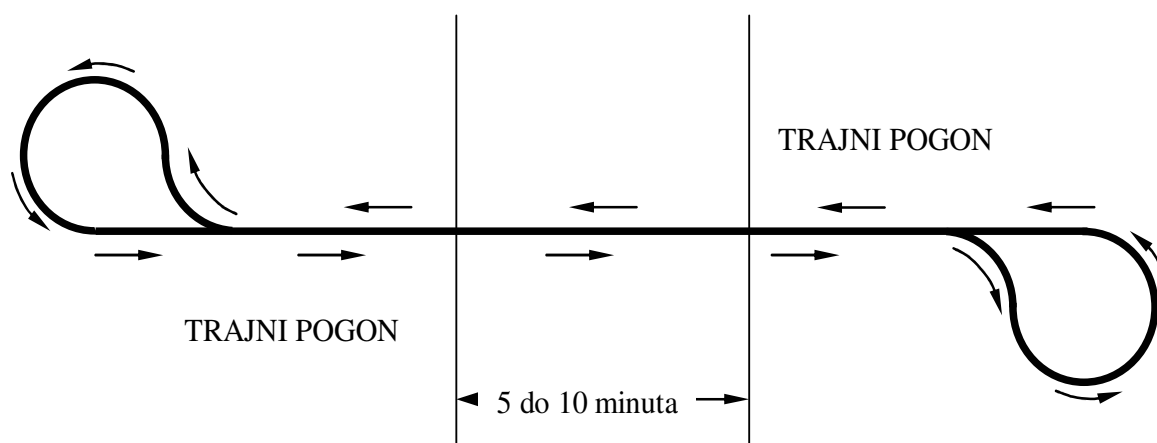
- rad i održavanje opreme pomoću koje se izvodi eksperimentalno ispitivanje,
- vođenje dnevnika instrumenata tokom njihove instalacije i izvođenja merenja,
- dnevno sakupljanje i beleženje temperature vode,
- upoznavanje zapovdenika broda ili predstavnika brodovlasnika sa preliminarnim rezultatima,
- davanje punog izveštaja sa ispitivanja prema ugovoru između brodogradilišta i brodovlasnika.

Posada broda je odgovorna za:

- održavanje broskog dnevnika u delu koji se odnosi na očitavanje nekoliko glavnih parametara propulzije tokom merenja na svaki sat vremena,
- pružanje podataka o hidrološko-meteorološkim uslovima i eksploatacionoj nosivosti u trenutku merenja zvaničnom predstavniku brodogradilišta na dnevnom nivou ili po potrebi.

3.2.2.1 Priprema eksperimentalnih ispitivanja

Eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobnosti izgrađenih brodova se izvodi na unapred određenoj deonici plovnog puta ili vodenoj površini posebno određenoj za to. Ako se ispitivanja izvode na plovnom putu rukovodilac ispitivanja obezbeđuje navigacione karte za pomenutu deonicu plovnog puta. Zapovdenik broda označava moguće opasnosti po plovidbu na tom delu plovnog puta. Brod se pozicionira tako da trajanje početka merenja i udaljenost od deonice gde se obavlja merenje budu dovoljno vremenski dugački da se postigne najveće dozvoljeno punjenje motora za trajni pogon i ostala niža opterećenja glavnog ili više glavnih motora (oznake I, II, III itd. videti Tabelu 3.1). U suprotnom, može doći do loše procene brzine plovidbe broda, iako su instrumenti radili pravilno tokom ispitivanja. Prikupljanje podataka se podešava tako da bude u stvarnom vremenu i prikazano i praćeno. Podaci o poziciji koji se dobijaju pomoću mernih instrumenata se menjaju na osnovu podataka sa navigacione karte kako bi se što tačnije odredila putanja plovidbe broda (videti Sliku 3.2). Ukoliko se koristi diferencijalni GPS sa preklapanjem radarske slike nije potrebno vršiti dodatne izmene pozicije. Oprema za praćenje pozicije se nalazi u krmilarnici.



Slika 3.2. Putanja broda tokom eksperimentalnih ispitivanja propulzionih osobnosti broda (Izvor: Van Den Boom i dr., 2006)

Svrha eksperimentalnih ispitivanja propulzionih osobnosti izgrađenih brodova pri projektovanom deplasmanu tokom gradnje broda je da se zadovolje zahtevi iz ugovora o eksperimentalnom ispitivanju ili da se odredi odnos brzine plovidbe i snage glavnog pogonskog motora. Sledeća dva pomenuta eksperimentalna ispitivanja se izvode za isti odnos broja obrtaja propelerskog vratila i punjenja motora, samo što se deplasmani razlikuju i to barem 10% razlike u odnosu na projektovani deplasman. Ovde je svrha odrediti efekat deplasmana na odnos brzine plovidbe i snage glavnog pogonskog motora.

Procedura i raspored pomenutih eksperimentalnih ispitivanja dati su u Tabeli 3.2. Režim rada motora je predstavljen brojnom i slovnom oznakom. Brojna oznaka kreće od broja 10, a završava sa brojem 180 što označava najveće dozvoljeno punjenje motora za trajni pogon (puno opterećenje). Slovnom oznakom se obeležava tip eksperimentalnih ispitivanja. Dodatna ispitivanja (za ostala niža opterećenja motora) i ponavljanja ispitivanja mogu se uvesti u proceduru ako to zahteva rukovodilac ispitivanja.

Tabela 3.2. Primer rasporeda eksperimentalnih ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova (Izvor: International Towing Tank Conference (ITTC), 2002)

Režim rada motora	Broj obrtaja propelerskog vratila (n_{vr})	Snaga propelerskog vratila (N_{vr})	Brzina plovila u odnosu na vodu (v)
	(ob/min)	(kW)	(m/s)
10(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 20(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 30(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP)	1	1	1
40(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 50(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 60(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP)	2	2	2
70(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 80(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 90(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP)	3	3	3
100(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 110(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 120(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP)	4	4	4
130(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 140(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 150(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP)	5	5	5
160(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 170(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP) 180(D)(H)(L)(TS)(LS)(OP)(UP)	Puno opterećenje motora	Puno opterećenje motora	6

D – eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova pri projektovanom deplasmanu tokom gradnje broda,

H – eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova pri punom deplasmanu (D_m),

L – eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova pri sopstvenoj masi broda (D_o),

TS– ispitivanja vratila pogonskog motora broda kada se jedno od propelerskih vratila oslobodi,

LS– ispitivanja vratila pogonskog motora broda kada se jedno od propelerskih vratila podese na odgovarajući procenat broja obrtaja od punog broja obrtaja,

OP– eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti pri broju obrtaja propelerskog vratila koji je veći od 100% od broja dobijenog sa probnog stola u fabrici,

UP– eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti pri broju obrtaja propelerskog vratila koji je manji od 100% od broja dobijenog sa probnog stola u fabrici

Kada se vrše eksperimentalna ispitivanja brodova istog tipa prvo se pretpostavlja da su propulzione osobenosti prethodno ispitivanih brodova poznate. Ipak, preporučuje se provera barem tri tačke sa dijagrama odnosa izmerene snage na propelerskim vratilima broda i brzine plovidbe broda u mirnoj vodi. Ukupan broj tačaka provere se ugovara između brodogradilišta i vlasnika broda. Za svaku tačku, koja je predmet provere, obavljaju se dve do 4 pojedinačne plovidbe pri stalnom broju obrtaja propelerskih vratila ili istom punjenju motora. Takođe, pre samih ispitivanja potrebno je utvrditi hidrološko-meteorološke uslove na određenoj deonici za ispitivanje. Ukoliko se pokaže da su oni isti kao i na prethodnim ispitivanjima smatra se da se eksperimentalna ispitivanja obavljaju pri istim hidrološko-meteorološkim uslovima. Svi izmereni rezultati ispitivanja, pri istim hidrološko-meteorološkim uslovima se osrednjavaju na

osnovu broja merenja. Ako su se tokom ispitivanja promenili hidrološko-meteorološki uslovi, potrebno je izvršiti korekciju izmerenih rezultata, a potom proračuti aritmetičku sredinu rezultata.

Ispitivanja propulzionih osobenosti brodova koji plove krmom obavljaju se automatskim režimom rada tokom kojeg brod plovi sa naznačenom pretegom i deplasmanom. Tokom svih pomenutih ispitivanja propulzionih osobenosti koristi se vreme mereno po Griniču¹⁶ (upotrebom GPS prijemnika), a posebna pažnja se usmerava na tačnost časovnika tokom ispitivanja. Kako se svi podaci automatski beleže u brodski dnevnik i dnevnik instrumenata (opreme) i svi podaci su elektronskog formata, vrlo je važno da časovnici pokazuju tačno vreme tokom merenja. Tokom merenja je moguće da se dogode greške kod pokazivanja časovnika i te greške se beleže u brodski dnevnik.

3.2.2.2 Veličine koje se očitavaju tokom samog merenja

Veličine koje se beleže tokom merenja mogu se podeliti na primarne i sekundarne (Van Den Boom i dr., 2006). U tabelama 3.3 i 3.4 dat je pregled primarnih i sekundarnih veličina.

Tabela 3.3. Primarne merne veličine (Izvor: Van Den Boom i dr., 2006)

Primarne veličine	Prihvatljivi merni uređaji	Merna jedinica
Putanja plovidbe	DGPS	Geografska širina, geografska dužina u stepenima [°] ili metrima [m]
Tehnička brzina	DGPS	Čvorovi ili [km/h]
Obrtni moment ili snaga propelerskih vratila	Torziometar sa mernim trakama, Stalni senzor obrtnog momenta. Snaga se proračunava preko obrtnog momenta i obrtaja propelerskog vratila	[kNm] ili [kW]
Broj obrtaja propelerskih vratila	Laserski brojač, brodski brojač, obrtaja	[Hz, o/min]
Korak propelera		
Vreme	GPS vreme	[s]
Dubina vode	Brodski ehosonder i nautičke karte	[m]
Ugao krmenog pera	Ugaoni potenciometar, brodsko krmilo	[°]
Plovidbeni kurs	Žirokompas, DGPS	[°]
Brzina vetra	Brodski anemometar, anemometar	[m/s], čvorovi, [°]
Visina talasa i smer kretanja	Uređaj za merenje talasa (radarski skener), talasna bova	[m], [°]
Gaženje	Posmatranjem preko marki gaženja, preko merača gaženja	[m]

¹⁶ Ceo svet je podeljen na 24 časovne zone. Podela se zasniva na podnevcima, zamišljenim linijama povučenim oko Zemlje kroz Severni i Južni pol. U Griniču, u Engleskoj, prolazi nulti podnevak. Idući na istok od Griniča, dodaje se po jedan čas na svakih 15 stepeni geografske dužine.

Tabela 3.4. Sekundarne merne veličine (Izvor: Van Den Boom i dr., 2006)

Sekundarne veličine	Prihvatljivi merni uređaji	Merna jedinica
Gustina vode	Senzor saliniteta	[kg/m ³]
Temperatura vode	Termometar	[°C]
Temperatura vazduha	Termometar	[°C]
Vazdušni pritisak	Barometar	[hPa], [mBar]

Sve veličine očitane na merenjima pomoću GPS, odnosno GPS prijemnika, sadrže podatke o putanji plovidbe, a smeštaju se na prenosivi tvrdi disk kompjutera u ASCII¹⁷ formatu podataka koji su odvojeni tabulatorom¹⁸. Podaci sa GPS prijemnika se snimaju najvećom mogućom brzinom, a u ovom slučaju je to povorka signala u jednoj sekundi¹⁹ i ne bi trebalo programirati GPS prijemnik da brže šalje podatke. U okviru skupa podataka koje GPS prijemnik šalje na prenosivi tvrdi disk se snimaju sledeće:

1. X,Y,Z koordinate pozicije;
2. tehnička brzina;
3. vreme;
4. putanja broda tokom eksperimentalnih ispitivanja.

Po svakom pojedinačnom prelasku merne staze prikupljeni podaci moraju biti tako smešteni da se odmah mogu grafički analizirati čime im se određuje tačnost. Od statističkih podataka proračunavaju se broj prikupljenih uzoraka (merenja), maksimalne vrednosti, minimalne vrednosti, srednje vrednosti i standardna odstupanja. Ove statističke veličine će dati osnovu za definisanje objektivnih kriterijuma eksperimentalnih ispitivanja.

Tokom eksperimentalnih ispitivanja koriste se dva tipa prikupljanja podataka. To su automatsko prikupljanje podataka kada se podaci direktno smeštaju u datoteke kojima se lako pristupa iz različitih programskih aplikacija i prikupljanje podataka u tekstualne datoteke preko kojih se kasnije vrši „izvlačenje“ korisnih informacija. Sistem za prikupljanje podataka se nalazi na komandnom mostu. Cilj je uvek prikupiti što više podataka sa merenja kako bi se povećao nivo preciznosti ispitivanja. Podaci koji se prikupljaju dele se u dve grupe prema korisnosti i svrsi ispitivanja i to su: uopšteni podaci koji se mogu primeniti tokom svih eksperimentalnih ispitivanja propulzionih

¹⁷ skraćena od „Američki standardni kod za razmenu podataka“ (eng. American Standard Code for Information Interchange), izgovara se „aski“ – alfanumerički niz znakova latinskog alfabeta (A – Z) i arapskih cifara (0 – 9) koji se koriste u modernom engleskom jeziku.

¹⁸ Tabele podataka čije su kolone razdvojene razmakom dužine tabulatora.

¹⁹ Svaki GPS prijemnik šalje informacije u okviru jednog skupa podataka. Taj skup podataka sadrži sve informacije koje GPS prijemnik može da daje. Standardna brzina je jedan skup podataka po jednoj sekundi. Posebnim programskim aplikacijama ta brzina može da se promeni.

osobnosti i posebni podaci koji su karakteristični i korisni samo za određeni tip eksperimentalnih ispitivanja. U uopštene podatke spadaju:

- datum,
- merna deonica,
- vreme,
- srednja dubina vode na mernoj deonici,
- temperatura vazduha,
- visina na kojoj se nalazi uređaj za merenje brzine vetra,
- gaženja na pramcu, krmi i paralelnoj sredini broda,
- deplasman broda,
- brzina vetra i smer duvanja vetra tokom merenja i neposredno po završetku merenja.

U posebne podatke spadaju:

- vreme prema Griniču,
- vreme koje je proteklo tokom prelaska merne deonice,
- pravi kurs broda²⁰,
- tehnička brzina broda,
- trenutni kurs broda²¹,
- odstupanje od putanje,
- broj obrtaja propelerskih vratila,
- obrtni moment i snaga na propelerskim vrtilima,
- korak propelera,
- brzina i pravac duvanja vetra prema anemometru,
- srednji period talasanja, veličina talasa i smer kretanja talasa,
- maksimalni ugao zakretanja.

Osim prethodne podele podataka, postoji i minimum podataka koji mora da se prikupi tokom ispitivanja i to su:

- datum,
- broj ispitivanja,
- vreme,

²⁰ Pravi kurs broda predstavlja kurs koji je brod imao, odnosno on odgovara putanji broda ili kombinaciji nekoliko promena kursa između dve tačke.

²¹ Kurs u momentu merenja koji zavisi od strujanja vode, zanošenja broda, upravitelja broda ili grešaka kompasa.

- obrtni moment ili snaga na propelerskim vratilima,
- broj obrtaja propelerskih vratila,
- podaci o poziciji broda,
- kurs broda,
- tehnička brzina broda,
- smer i brzina duvanja vetra.

3.2.2.3 Prirodni režim plovnog toka i stanje brodskog kompleksa tokom eksperimentalnih ispitivanja

Kao prvi cilj svakog eksperimentalnog ispitivanja jeste da se broj pojava prirodnog režima plovnog toka koji utiču na samo ispitivanje ograniči što je više moguće. Međutim, i pored ograničavanja broja pojava, same pojave i vrednosti njihovih fizičkih veličina odstupaju od onih vrednosti koje su naznačene ugovorom o eksperimentalnim ispitivanjima. Ovaj podatak je veoma značajan zbog činjenice da postoje metode kojima se eventualna odstupanja vrednosti mogu korigovati do određene granice. Ipak, kada se sprovodi eksperimentalno ispitivanje, ograničenja vrednosti fizičkih pojava ne bi trebalo da prelaze zacrtane granice.

Najvažnije pojave prirodnog režima plovnog toka su: mesto (lokacija), vetar, talasi, dubina vode i strujanje vode. Jaki vetrovi i talasi uzrokuju preterane otklone krmila kako bi se zadržao željeni kurs, ali se na taj način izazivaju prekomerne oscilacije obrtnog momenta propelerskog vratila, ugaone brzine propelerskog vratila i tehničke brzine broda. Merenja brzine plovidbe trebalo bi izvršiti na mestima, odnosno lokacijama, gde hidrološko-meteorološki uslovi imaju mali uticaj na brod čime se izbegavaju neočekivani rezultati u izlaznim podacima. To znači da merna staza mora da bude na mestu koje je zaštićeno od vetra, talasa i strujanja vode, ali i na mestu na kojem nije planiran bilo kakav saobraćaj brodovima i čamcima.

Brzina vetra tokom eksperimentalnih ispitivanja morskih brodova ne bi trebalo da bude veća od 6 Bofora za brodove čija dužina je veća od 100 metara i 5 Bofora čija dužina je manja od 100 metara. Visina talasa za brodove duže od 100 metara ne treba da bude veća od $0,015 \times L_{pp}$ ili maksimalno 4 metra, dok za brodove čija je dužina manja od 100 metara visina talasa ne sme da premaši 1,5 metara (Van Den Boom i dr., 2006). Ukoliko se ispitivanje izvodi u „plitkoj vodi“²² ili „kanalu“²³ potrebno je primeniti

²² Plovni put ograničene dubine i dovoljne širine

²³ plovni put ograničene dubine i širine

određene metode kojima se podaci na kraju merenja ispravljaju, ali je ipak bolje da se ovakvi plovni putevi izbegnu. Dubina vode za merenja koja se izvode na mernoj stazi dovoljne dubine i širine proračunava se na osnovu sledeća dva izraza (Van Den Boom i dr., 2006):

$$h > 3\sqrt{B \cdot T} \quad (3.5)$$

$$h = 2,75 \frac{v_t^2}{g} \quad (3.6)$$

pri čemu se kao merodavna vrednost usvaja ona koja je manja na osnovu prethodna dva izraza. Područja plovnog puta u kojima je poznato da vladaju jake vodene struje treba izbegavati prilikom odabira merne staze.

U toku eksperimentalnih ispitivanja delovi broskog kompleksa koji najviše utiču na izlazne rezultate merenja su: trup i propeler kao deo glavnog pogonskog postrojenja. Brodski trup je opterećen na savijanje pod dejstvom težinskih sila s jedne strane i sila potiska i bočnog pritiska vode s druge strane prilikom plovidbe (Kreculj i Čolić (1996)). Zbog toga propeler i trup broda treba da budu „očišćeni“ pre početka ispitivanja. Hrapavost broskog trupa i izrasline (oblici biljaka koji su se tokom godina eksploatacije razvili na broskom trupu) značajno povećavaju otpor broda pa samim tim i izmerenu snagu na propelerskim vratilima. Međutim, ovo povećanje se ne ispravlja po završetku ispitivanja.

Od veličina koje karakterišu brodski kompleks i najviše utiču izlazne rezultate merenja izdvaja se deplasman broda (D_m). Deplasman broda se određuje na osnovu gaženja broda i natovarenosti broda. Ukoliko je brod natovaren do pune nosivosti (što odgovara registrovanoj nosivosti – Q_r) onda gaženje odgovara najvećem konstrukcionom gaženju (T_{km}). Ukoliko je brod natovaren manje od pune nosivosti tj. eksploataciona nosivost (Q_e) nije jednaka registrovanoj nosivosti onda se gaženje određuje na osnovu marki gaženja broda. Razlika između eksploatacione nosivosti broda (prilikom ispitivanja) i registrovane nosivosti broda koja je naznačena u ugovoru o eksperimentalnim ispitivanjima ne bi trebalo da prelazi 2% (Van Den Boom i dr., 2006 i ITTC, 2002). Ukoliko nije moguće ispoštovati ovaj uslov, onda bi eksploataciona nosivost u toku ispitivanja trebalo da bude što „bliža“ registrovanoj nosivosti iz ugovora. Ekploataciona nosivost (gaženje i deplasman) broda mora da bude potvrđena pri nultoj brzini plovidbe odnosno pre početka ispitivanja.

Od tehničko-nautičkih osobenosti broda koje utiču na tok eksperimentalnih ispitivanja najviše uticaja ima stabilitet broda. Pošto je merna staza prava linija, a merenja se izvode bez vetra i talasa, najveći uticaj na merne rezultate ima ukupna pretega broda. Zato se ukupna pretega proračunava pre početka ispitivanja i na kraju samog ispitivanja. Vrednosti za ukupnu pretegu se nalaze u veoma uskim granicama. Tako za brodove sa ravnom kobilicom ona ne sme da bude veća od 1% gaženja na paralelnoj sredini broda (Van Den Boom i dr., 2006).

3.2.2.4 Procedura eksperimentalnih ispitivanja

Procedura eksperimentalnih ispitivanja obuhvata: pripremu ispitivanja, putanju broda tokom ispitivanja, trajanje ispitivanja, kurs ispitivanja, krmilarenje i prilaz ispitivanju. Priprema ispitivanja obuhvata:

- vremensku prognozu,
- temperaturu i gustinu vode,
- temperaturu i pritisak vazduha,
- gaženja na pramcu, krmi i paralelnoj sredini broda,
- deplasman broda.

Raspored ispitivanja se pravi tako da ona budu obavljena tokom dana kako bi se jasno snimilo stanje voda (talasi). Potrebno je proveriti da li glavni pogonski motor radi dosledno prilikom uobičajenih radnji broda. Kada se brod zaustavi u vodi pre početka merenja potrebno je izvršiti sledeće radnje:

1. čitanje gaženja kako je opisano u prethodnom poglavlju,
2. merenje brzine i smera duvanja vetra,
3. podešavanje na nulu merača obrtnog momenta propelerskih vratila.

Sve prethodne radnje je potrebno obaviti i prilikom svakog sledećeg zaustavljanja broda, odnosno završetka svakog merenja ili prelaza merne staze.

Merenja se izvode na mernoj stazi preko jedne putanje, koju je brod prešao prvi put (videti Sliku 3.2). Vilijamsov zaokret²⁴ se izvodi kako bi se brod doveo do mesta na kome je počeo manevar zaokreta. Tokom zaokreta odgovarajući položaji ručica za punjenje motora ostaju isti i ne menjaju se tokom svih merenja. Na taj način, su obezbeđeni isti uslovi rada glavnih pogonskih motora, odnosno isti režimi rada motora pri svakom sledećem merenju.

²⁴ Manevar broda kojim se brod vraća u istu poziciju sa koje je započeo zaokret

Merenje traje između 5 i 10 minuta, jer se na taj način ostvaruje potrebna preciznost eksperimentalnih ispitivanja. Kod eksperimentalnih ispitivanja morskih brodova, ako je tehnička brzina veća od 18 čvorova, dužina merne deonice trebalo bi da bude 3 Nm²⁵, a ako je manja od 18 čvorova²⁶ dužina bi trebalo da bude oko 2 Nm (Van Den Boom i dr., 2006).

Smer plovidbe broda tokom eksperimentalnih ispitivanja treba da bude u smeru kretanja talasa ili u suprotnom smeru od smera kretanja talasa jer metode ispravljanja rezultata zbog talasa postoje samo za ovakve slučajeve (Van Den Boom i dr., 2006). Jednom kada se kurs podesi, ne menja se do kraja ispitivanja, osim u slučaju suprotnog smera kada se kurs menja za 180°. Time se minimizira broj činilaca koji mogu da utiču na tačnost izlaznih rezultata. Zakretanje krmila ne bi smelo da bude veće od 3°.

Pre samog početka merenja potrebno je postići najveće dozvoljeno punjenje motora za trajni pogon. Zbog toga se određuje dužina plovnog puta, odnosno dužina prilaza mernoj stazi, koju brod treba da pređe da bi postigao najveće dozvoljeno punjenje. Za ovu svrhu ne postoji jedinstveno pravilo o tome kolika dužina plovnog puta treba da bude, ali postoje preporuke koje su date u Tabeli 3.5.

Tabela 3.5. Preporuke dužine prilaza mernoj stazi i vremena plovidbe za morske brodove (Izvor: Van Den Boom i dr., 2006)

Ukupna nosivost (t)	Dužina prilaza mernoj stazi (Nm)	Vreme plovidbe (min)		
		15 čvorova	20 čvorova	25 čvorova
50000	4–5	20	15	12
100000	5–7	26	20	16
250000	8–10	40	30	24
500000	12–15	60	45	36

Sva merenja se obavljaju tako što se izvode tokom plovidbe u oba smera (dupli prelaz) i pri istim režimima rada motora. Kako bi se odredila kriva zavisnosti snage propellerskih vratila od brzine plovidbe broda, potrebno je uraditi najmanje 4 dupla prelaza (4 uzvodna i 4 nizvodna prelaza) preko merne staze pri 3 različita režima rada motora (videti Tabelu 3.2). Merenja snage obuhvataju:

- dva dupla prelaza merne staze pri snazi glavnih pogonskih motora koja odgovara onoj koja je napisana u ugovoru o eksperimentalnim ispitivanjima,
- ostale duple prelaze pri snagama glavnog pogonskog motora koje iznose 65% i 100% najvećeg punjenja motora za trajni pogon.

²⁵ Jedna nautička milja je jednaka tačno 1852 m

²⁶ 1 čvor = 1 Nm/h = 1,852 km/h

Dva dupla prelaza merne staze se obavljaju po dnevnom svetlošću kako bi se utvrdilo strujanje vode i veličina talasa. Ukoliko su rezultati merenja (kriva snage u odnosu na brzinu) prihvatljivi prema ugovoru o ispitivanju, onda se za identične brodove sprovode uprošćena ispitivanja. Tako, ako je brzina strujanja vode manja od 0,2 čvora, dva dupla prelaza se svode na jedan dupli prelaz za identične brodove (Van Den Boom i dr., 2006).

Eksperimentalno ispitivanje se odvija prema sledećem redosledu:

Korak 1. provera deplasmana putem očitavanja gaženja na pramcu, krmi i paralelnoj sredini broda, provera da li su uređaji za merenje snage propelerskih vratila podešeni na nultu tačku i merenje jačine i pravca duvanja vetra (sve provere i merenja se vrše pri nultoj brzini broda),

Korak 2. merenje gustine vode (za morske brodove),

Korak 3. merenje temperature vode i vazduha,

Korak 4. podešavanje kursa broda tako da brod plovi u smeru suprotnom od smera strujanja vode,

Korak 5. plovidba vodnom deonicom koja je prilaz mernoj stazi,

Korak 6. priprema početka rada svakog od mernih uređaja tokom plovidbe preko prilaza mernoj stazi (3 minuta pre početka merenja),

Korak 7. početak merenja pri odklonu pera krme koji nije veći od 3° , zatim prekidanje merenja posle 5 do 10 minuta ili 2 do 3 nautičke milje,

Korak 8. zakretanje pera krme za mali ugao tako da brod doplovi do iste geografske pozicije odakle je počela plovidba,

Korak 9. ponoviti korake od 5 do 8.

3.2.3. Pouzdanost eksperimentalnih ispitivanja propulzionih osobenosti izgrađenih brodova

Tačnost rezultata eksperimentalnih ispitivanja uvek može biti neizvesna zbog toga što se uslovi pod kojima se vrše ispitivanja, pre svega, razlikuju od idealnih uslova, ali i menjaju od jednog ispitivanja do svakog narednog ispitivanja, te i od jednog merenja do narednog merenja na istom brodu. Mogu se izdvojiti dve vrste grešaka. To su greške koje nastaju usled promenljivosti prirodnog režima plovnog toka u kome se obavljaju ispitivanja i greške usled očitavanja merenja i ispravnosti mernih instrumenata. Prirodni režim plovnog toka zavisi od dosta parametara promenljivih u prostoru i vremenu što utiče na promenljivost uslova plovidbe. Pod prirodnim tokom

podrazumevaju se sve ukupne pojave koje ga karakterišu, uključujući klimatološke, hidrološko-meteorološke, hidrauličke, morfološke, geomehaničke, geološke i druge. Zajednička karakteristika svih ovih pojava je njihova promenljivost u vremenu i prostoru, koja nije funkcionalne već slučajne prirode. Od svih ovih pojava najvažnije za eksperimentalna ispitivanja su dubina vode, temperatura vode, jačina i pravac vetra, talasi, strujanje vode itd. Na ove pojave nije moguće uticati, osim što je moguće birati vreme ispitivanja kada oni imaju jako male vrednosti. Neizvesnost se definiše kao procena greške koja nastaje između vrednosti dobijenih eksperimentalnim merenjima i stvarnih vrednosti.

Ukoliko se eksperimentalna ispitivanja izvode u vodi sa talasima, onda je potrebno da se plovidba obavlja u smeru kretanja talasa ili smeru suprotnom od kretanja talasa. To je zbog toga što postojeće metode uzimaju u obzir samo ova dva uslova plovidbe. U slučaju da talasi ne dolaze sa pramca ili krme postojeće metode ne daju pouzdane podatke o njihovom uticaju na plovidbu broda. Ako su za merne staze odabrana područja zaštićena od dejstva i stvaranja talasa, onda se pažnja preusmerava na uticaj gabarita plovnog puta na mernoj stazi na izlazne rezultate merenja. Uticaji strujanja vode, upravljanja brodom i zanošenja broda se još uvek ne mogu pouzdano odrediti postojećim metodama. Metode za ispravku rezultata usled hrapavosti broskog trupa i propelera izazivaju podeljena mišljenja oko njihove tačnosti.

Greške koje nastaju usled očitavanja merenja i ispravnosti mernih instrumenata vezuju se za ugovor o eksperimentalnim ispitivanjima. Prilikom zaključivanja ugovora o eksperimentalnim ispitivanjima u ugovoru se navode uslovi koje je teško zadovoljiti tokom ispitivanja, te se izmereni rezultati moraju ispraviti. Prva neizvesnost jeste neizvesnost oko dužine, širine i gaženja broda i deplasmana broda. Greške iz kojih proističe neizvesnost su vezane za greške koje nastaju prilikom projektovanja i izgradnje broda. Zbog toga se uvek računa sa nekom unapred određenom greškom u odnosu na širinu ili dužinu broda. Kako bi se odredila eksploataciona nosivost broda, krmeno i pramčano gaženje, sprovodi se očitavanje gaženja „golim okom“, tako da se uvek mora uzeti u obzir greška od ± 2 cm. Pošto se deplasman broda proračunava na osnovu koeficijenta punoće istisnine broskog trupa, onda se smatra da je prihvatljiva greška ovog koeficijenta jednaka 0,001 (Isnel, 2008).

Druga neizvesnost se svodi na neizvesnost oko tačnosti obrtnog momenta propelerskih vratila, ugaone brzine obrtaja propelerskih vratila i tehničke brzine broda. Ova neizvesnost dolazi od tačnosti uređaja kojima se mere pomenute veličine, greške

prilikom očitavanja, kalibracije uređaja za merenje, instalacije uređaja na brod i primene izraza kojima se očitane vrednosti sa uređaja pretvaraju u snagu na propellerskim vratilima i broj obrtaja propellerskih vratila. Takođe, analiza rezultata tačnosti može da dovede do dalje neizvesnosti oko tačnosti zbog primene različitih metoda kojima se ispravljaju dobijeni podaci sa merenja.

Ispravka ili korekcija izmerenih veličina se obavlja pomoću neke od postojećih metoda. Metode korekcije se ugovaraju između naručioca eksperimentalnih ispitivanja (najčešće brodovlasnika) i izvođača eksperimentalnih ispitivanja pre početka merenja. Ipak, kako izvođač ispitivanja ne određuje mernu deonicu, a raspolaže uređajima za obavljanje merenja, on je i najodgovorniji za konačne rezultate merenja i potrebne ispravke. Zbog toga bi izvođač trebao da ima pravo prvenstva prilikom odabira metode korekcije rezultata (Haakenstad, 2012).

3.3. Numeričke metode za proračun snage glavnog pogonskog motora

U poslednje dve decenije vršila su se intenzivna istraživanja na polju primene Veštačkih neuronskih mreža (VNM) kod proračuna različitih parametara vezanih za brod. Paralelno sa ovim istraživanjima vršila su se i istraživanja primenom drugih matematičkih metoda, kao što je matematička regresija. I dok se tehnika VNM može primeniti na gotovo sve probleme vezane za brodarstva, matematička regresija se može primeniti uglavnom na probleme vezane za odnos snage glavnog pogonskog motora broda i brzine plovidbe u odnosu na vodu. Poslednjih godina je pokazano da se primenom VNM dobijaju precizniji rezultati nego primenom matematičke regresije, da se VNM lako prilagođavaju novim podacima i da mogu brzo da proizvedu konačno rešenje. Danas postoji široka primena VNM u oblasti brodarstva i brodogradnje. Veliki broj autora potvrđuje opravdanost uvođenja VNM, ali u isto vreme ukazuje i na oprez prilikom primene dobijenih rezultata.

Radovi se mogu grubo podeliti na one koji se bave istraživanjima vezanim za vodni saobraćaj i na one u kojima se istražuju veze između snage glavnog pogonskog motora broda i brzine plovidbe u odnosu na vodu. Iz prve grupe radova može se izdvojiti više radova. Koushan i Mesbahi, (1998) su primenili VNM za predviđanje rada krmila. Autori su imali na raspolaganju rezultate eksperimentalnih ispitivanja rada krmila. Cilj rada je bio da se pokaže da VNM mogu da se primene na ovakve vrste problema.

Markle i Braun (1996) su napravili strategiju za testiranje dizel brodskih motora na količinu izduvnih gasova. Cilj rada je bio da pruži kratak pregled zakonodavnih i regulatornih inicijativa koje se primenjuju u pomorstvu, da razmotri odnos projektovanih snaga glavnih pogonskih motora brodova i brzina plovidbe u odnosu na vodu, da uporedi eksploataciju trgovačkih brodova i brodova ratne mornarice, da prikaže jednostavnu metodologiju za definisanje rada jednog broda ratne mornarice, da prikaže testiranje radnog ciklusa brodskih dizel motora i da ga uporedi sa nekoliko industrijski prihvaćenih radnih ciklusa. Koristili su podatke sa ispitivanja 4 identična broda. Zamislili su da na brodu konstantno budu ugrađeni torziometar i GPS prijemnik. Pomoću torziometra zapovdenik broda bi imao stalne podatke o snazi na propelerskim vratilima broda, dok bi pomoću GPS prijemnika imao stalne podatke o tehničkoj brzini broda. Kao razlog za uvođenje jednog ovakvog sistema naveli su da brod posle određenog broja godina eksploatacije gubi na snazi glavnog pogonskog motora i da mu se menja odnos snage na propelerskim vratilima i brzine plovidbe u odnosu na vodu. Deo snage propelerskih vratila u kojem dominira otpor trenja su predstavili kao kvadratnu funkciju brzine plovidbe u odnosu na vodu dok su za deo u kojem je dominantan ostali otpor koristili kubnu funkciju brzine plovidbe u odnosu na vodu. Autori su zaključili da predložena procedura za testiranje radnog ciklusa predstavlja pouzdan metod za predviđanje količine izduvnih gasova brodskih motora.

Ray i dr. (1996) su predvideli nosivost broda u broju kontejnera na osnovu glavnih dimenzija broda i podacima koji su snimljeni tokom plovidbe brodova. Oni su koristili dva algoritma obučavanja veštačkih neuronskih mreža: standardni algoritam povratnog prostiranja greške (*eng. Backpropagation*) i izmenjeni Markar-Levenberg algoritam (*eng. Marquart Levenberg*). Rezultati su pokazali da obučavanje mreža traje kraće upotrebom izmenjenog Markar-Levenberg algoritma. Autori su zaključili da VNM predstavlja potencijalno rešenje za mnoge probleme u brodarstvu.

Vukadinović i dr. (1997) su predložili VNM za razvoj sistema za podršku odlučivanju dispečeru. Dispečeri su rešavali zadatak dnevnog formiranja potiskivanih sastava u rečnom pristaništu. Rad je usredsređen na utovar, transport i istovar šljunka potiskivanim teretnjacima. Potiskivani teretnjaci se raspoređuju u sastave, zatim se transportuju brodovima-potiskivačima do luka u kojima se vrši istovar. Prazni sastavi potiskivanih teretnjaka se transportuju do istog mesta za ponovni utovar. Celokupan proces kontroliše dispečer koji i donosi odluku o broju potiskivanih teretnjaka u sastavu. Autori su koristili podatke od prethodnih odluka dispečera i pokazali da je predložena

VNM sposobna da imitira proces odlučivanja dispečera. Treniranje VNM nije zahtevalo dugačko vreme te su autori zaključili da se može koristiti u realnom vremenu, zatim za probleme sa većim brojem podataka i na kraju za slične probleme u drugim vidovima saobraćaja.

Čolić (1998) je na osnovu prethodno sređenih i naučno obrađenih rezultata obavljenih ispitivanja rečnih brodova izvršio istraživanja računskih metoda za obračunavanje prevoznih učinaka i međubrodarskih usluga. Istraživanja su bila usmerena na određivanje mehaničkog rada vučne sile broda tegljača i potiskujuće sile broda potiskivača kao merila za obračun prevoznog učinka i međubrodarskih usluga i na iznalaženje matematičkog modela za izračunavanje vučne (potiskujuće) sile u cilju određivanja virtuelnog mehaničkog rada i učinka vučne (potiskujuće) sile brodova tegljača (potiskivača). Usvojeno je načelo da se predložene metode za obračunavanje prevoznih učinaka i međubrodarskih usluga pri plovidbi tegljenih sastava i potiskivanih sklopova zasnivaju isključivo na rezultatima ispitivanja rečnih brodova na Dunavu, te s toga i metode u potpunosti odgovaraju osobenostima plovnih puteva na dunavskoj plovnoj mreži, kao i osobenosti raznih vrsta dunavskih brodova.

Reich i Berai (2000) su napravili model koji se koristi za proračun koeficijenta potisne sile propelera (K_s), koeficijenta momenta propelera (K_m) i koeficijenta korisnog dejstva propelera (η_p) (Jovanović, 2002). Za obučavanje VNM koristili su 5 ulaznih veličina i to stepen napredovanja (λ), odnos koraka propelera i prečnika propelera (H_p/D_p), razvijena (stvarna) površina propelera (F_o) (Kreculj i Čolić, 1996 i Jovanović, 2002), Z – broj krila propelera i kavitacioni broj propelera (δ_o^{27}) (Van Oossanen, 1974 i Jovanović, 2002). Autori su koristili podatke sa eksperimentalnih ispitivanja patrolnih čamaca Ratne mornarice Sjedinjenih Američkih Država čija dužina je bila 36 stopa²⁸ (Denny i dr., 1989). Broj podataka dobijenih sa merenja je bio 301 i oni su uključivali sve navedene ulazne i izlazne bezdimenzione veličine. Uopštavanje stečenog znanja VNM, odnosno kvalitet modela, autori su poboljšali primenom skupova neuronskih mreža umesto VNM. Na kraju su zaključili da je u cilju što boljeg kvaliteta modeliranja preslikavanja vrednosti ulaznih u vrednosti izlazne promenljive potrebno raspolagati neobrađenim podacima sa eksperimentalnih ispitivanja.

²⁷ Parameter koji opisuje uslove pod kojima se dešava kavitacija propelera. U praksi se koriste pojedini dijagrami kao kriterijumi za zone izbegavanja kavitacije u funkciji kavitacionog broja (Jovanović, 2002)

²⁸ 1 stopa = 0,3048 m

Campora i Figari (2003) su u svom radu opisali matematički model za simulaciju brodske propulzije. Model je napravljen u „MATLAB-SIMULINK“ softveru u strukturnoj formi. Različiti elementi sistema su opisani kao individualne celine koje su povezane tako da se računaju njihove međusobne veze. Na taj način su autori omogućili da se opiše dinamika svakog pojedinačnog elementa, ali i celog propulzionog sistema. Primena ovakvog modela se nalazi u pravilnom uklapanju glavnog pogonskog motora sa propelerom. Autori su pokazali primenu svog modela tako što su uporedili rezultate simulacije sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja obavljenih tokom uobičajenog rada broda.

Xiao i dr. (2005) su napravili model za proračun punjenja motora broda koji se zasniva na VNM sa funkcijom radijalne baze – FRB mreže (eng. *Radial Basis Function - RBF*) i teoriji grubih setova (eng. *Rough Set Theory*). Teorija grubih setova je primenjena na analizu podataka kojom su autori eliminisali nekompatibilne podatke i izabrali ulazne podatke. FRB mrežama su obučvali podatke u drugoj fazi istraživanja. Autori su pokazali da se primenom samo FRB mreža dobijaju i rezultati zadovoljavajuće tačnosti.

Leifson i dr. (2008) su prikazali modeliranje podataka plovidbe određenih okeanskih brodova sivom kutijom. Modeliranje je obuhvatilo konvencionalno pravljenje modela zasnovano na fizičkim principima i VNM sa prostiranjem signala unapred. Predstavili su dva različita načina kombinovanja više modela – kada su veze između crne i bele kutije serijske i kada su veze između crne i bele kutije paralelne. Rezultati simulacije plovidbe nekoliko kontejnerskih brodova su pokazali da modeliranje sivom kutijom može značajno da poboljša predviđanje potrošnje goriva. Ipak, predviđanje tehničke brzine brodova nije dalo povoljne rezultate. Autori su pretpostavili da je efektivna snaga broda jednaka proizvodu ukupnog otpora i brzine plovidbe u odnosu na vodu. Ukupan otpor je bio funkcija deplasmana, krmenog i pramčanog gaženja i pravca i jačine vetra. Efektivna snaga broda je bila funkcija broja obrtaja propelerskog vratila i koraka propelera.

Matsukura i dr. (2010) su razmatrali povezanost transporta kontejnera u Japanu sa međunarodnim trgovačkim putevima. U okviru istraživanja su proračunavali optimalne kontejnerske linije i analizirali moguće smanjenje emisije ugljen-dioksida (CO₂). Oni su napravili matematički model u kome je funkcija cilja bila minimizacija emisije CO₂ uz neophodna ograničenja. Model je zatim testiran na različitim tipovima brodova pri različitim tehničkim brzinama i nosivostima. Takođe je testiran sa različitim

vremenima zadržavanja broda u luci. Proračun emisije CO₂ su napravili na osnovu potrošnje goriva, snage propelerskih vratila, brzine plovidbe u odnosu na vodu i pređene razdaljine. Izmerenu snagu na propelerskim vratilima su predstavili kao kubnu funkciju brzine plovidbe u odnosu na vodu. Autori su zaključili da povećanje brzine plovidbe ima i negativne i pozitivne efekte na emisiju CO₂, da ukupna količina CO₂ može biti smanjena ako se smanji vreme zadržavanja brodova u lukama, da se smanjenjem vremena zadržavanja smanjuje broj potrebnih brodova i da odluka da se koriste brodovi manjih snaga glavnog pogonskog motora može da dovede do snižavanja nivoa korisničkog servisa.

Radonjić (2011) je u svom radu napravio strategiju za smanjenje izduvnih gasova brodova potiskivača na osnovu potrošnje goriva. On je koristio podatke sa dva eksperimentalna ispitivanja dunavskih brodova potiskivača koje je obavila Laboratorija za ispitivanje brodova i plovnih puteva Saobraćajnog fakulteta. U radu je napravljena funkcionalna veza između snage na propelerskim vratilima dva broda potiskivača i brzine plovidbe sastava nesamohodnih teretnjaka u odnosu na vodu. Brzina plovidbe u odnosu na vodu je predstavljena kao linearna veza broja obrtaja propelerskih vratila na osnovu rezultata merenja na plovnom putu. Autor je zaključio da ušteda u potrošnji goriva zavisi od polazišta i odredišta sklopa i tipa potiskivača. Zbog toga je potrebno obaviti dodatna eksperimentalna ispitivanja postojećih brodova potiskivača kako bi se posada brodova upoznala sa propulzionim osobenostima brodova potiskivača.

Meyer i dr. (2012) su istraživali koliko značajno utiče smanjenje tehničkih brzina kontejnerskih brodova na profit brodovlasnika, s obzirom da se tada smanjuje potrošnja goriva. Oni su koristili podatke sa eksperimentalnih ispitivanja brodova Hamburškog bazena za ispitivanje modela brodova (HSVA²⁹), a u proračun troškova potrošnje goriva uvrstili su i potrošnju ulja za podmazivanje. Svrha istraživanja je bila da se pruži pregled glavnih finansijskih efekata smanjenja tehničkih brzina kontejnerskih brodova kako bi se procenili ekonomski aspekti ovog vida saobraćaja. Autori su zaključili da Admiralitetska formula³⁰ nije pogodna za prikazivanje povećanja potrošnje goriva koje dolazi kao rezultat povećanja brzine. Proračunima su pokazali da optimalna tehnička brzina broda zavisi od cena robe i goriva, a kako se cena goriva neće

²⁹ Hamburg Ship Model Basin

³⁰ $N_{vr} = \frac{D_m^{2/3} \cdot v^3}{C}$ (Schneekluth i Bertram, 1998)

gde je C konstanta koja jednaka za brodove sa istim Frudovim brojem

smanjivati u budućnosti, zaključili su da je smanjenje tehničke brzine dobro, ako ne i najbolje rešenje za kontejnerske brodove.

Petersen i Jakobsen (2012) su predstavili dva statistička modela kojima se određuje efikasnost potrošnje goriva. Oni su istraživali i uporedili VNM i Gausove procese (GP). U razmatranje su uzeli tri različita putovanja jednog istog broda odakle su prikupljeni svi podaci sa eksperimentalnih ispitivanja. Pokazano je da statistički modeli mogu da predvide promene koje su se dešavale tokom putovanja. Proračunom potrošnje goriva primenom VNM dobili su greške koja su konstantno odstupale od zadatih vrednosti. Ova odstupanja su se naglo menjala pri kraju svakog putovanja. GP model je pokazao neizvesnost oko tačnosti podataka pri manjim brzinama plovidbe. Autori su zaključili da je poređenje njihovih rezultata sa rezultatima prethodnih istraživanja veoma teško i da je potrebno sprovesti dalja istraživanja u tom pravcu.

Trenutno postoji više radova koji se bave primenom matematičke regresije na iznalaženje veza između snage glavnog pogonskog motora broda i brzine plovidbe u odnosu na vodu. Međutim, tokom poslednjih godina izlazi sve veći broj radova u kojima se problemi određivanja snage brodova rešavaju primenom veštačkih neuronskih mreža. Pored snage broda koja se u radovima pojavljuje kao izlazna vrednost, autori razmatraju i otpore brodova koji su merodavni za proračun snaga glavnih pogonskih motora brodova. U tim istraživanjima se takođe primenjuju matematičke metode poput regresije ili VNM, a kao izlazna promenljiva se pojavljuju ukupni otpor broda ili ostali otpor broda u zavisnosti od različitih ulaznih promenljivih. Pošto su otpori broda u direktnoj vezi sa snagom glavnog pogonskog motora broda, onda se i ovi radovi mogu svrstati u kategoriju radova koji se bave iznalaženjem veza između snage glavnog pogonskog motora broda i brzine plovidbe u odnosu na vodu.

Van Oortmerssen (1971) je napravio matematički model za proračun otpora malih obalnih brodova i lučkih tegljača. On je predložio da ukupan otpor broda bude jednak zbiru otpora trenja i otpora talasa i da bude funkcija Frudovog broja, Rejnoldsovog broja i ostalih geometrijskih parametara (L/B , B/T , φ).

Holtrop i Menen (1982) su objavili rezultate testiranja otpora i propulzije 191 modela različitih tipova brodova korišćenjem matematičke regresije. Oni su utvrdili da je u 95% slučajeva tačnost statistički izvedenih izraza zadovoljavajuća na primerima idejnih projekata brodova. Oni su prepostavili da bezdimenzioni koeficijenti koji pripadaju komponentama otpora mogu biti predstavljeni odgovarajućim geometrijskim

veličinama. Tako su napravili ograničenja za odgovarajuće geometrijske veličine koje određuju oblik broskog trupa (videti Tabelu 3.6).

Tabela 3.6. Ograničenja geometrijskih veličina kod metode Holtropa i Menena (Izvor: Holtrop Mennen, 1982)

Tipovi plovila	Maks. Frudov broj	Koeficijent finoće istisnine broskog trupa (ϕ)		L/B		B/T	
		min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.
Tankeri i brodovi za prevoz rasutih tereta	0,24	0,73	0,85	5,1	7,1	2,4	3,2
Ribarski brodovi, mali obalni brodovi, lučki tegljači	0,38	0,55	0,65	3,9	6,3	2,1	3,0
Kontejnerski brodovi	0,45	0,55	0,67	6,0	9,5	3,0	4,0
Brodovi za prevoz generalnog tereta	0,3	0,56	0,75	5,3	8,0	2,4	4,0
Ro-Ro brodovi, trajekti	0,35	0,55	0,67	5,3	8,0	3,2	4,0

Zatim je Holtrop (1984) proširio istraživanje sa još 64 oblika trupova brodova. Tačnije rezultate, odnosno matematičke izraze je dobio za veće brzine plovidbe u odnosu na vodu. Pošto je napravio matematičke izraze za proračun otpora brodova, Holtrop se fokusirao na poboljšanje tačnosti snage brodova sa malim odnosom dužine i širine trupa i ratnih brodova vitkih linija.

Harvald metod (1983) se zasniva na rezultatima testiranja grupe modela brodova koji su sakupljeni i analizirani tokom Međunarodnog sastanka uprava opitnih bazena 1957. godine. Koeficijent ostalog otpora C_o izrazio je kao funkciju Frudovog broja i predstavio ga na dijagramu po grupama prema odnosu dužine broda i zapremine istisnine broskog trupa ($L/V^{1/3}$). Ograničenja parametara trupa broda za ovaj metod prikazana su u Tabeli 3.7.

Tabela 3.7. Ograničenja geometrijskih veličina kod Harvaldove metode (Izvor: Harvald, 1983)

Parametar	Ograničenje
$L/V^{1/3}$	4,0 – 8,0
Frudov broj (F_r)	0,15 – 0,45
V/\sqrt{L} (čvorovi/stope)	0,5 – 1,5
Koeficijent finoće istisnine broskog trupa (ϕ)	0,55 – 0,85

Ovaj metod je primenljiv na dosta tipova plovila koja zadovoljavaju ograničenja iz Tabele 3.7. Međutim, za brodove koji ne pripadaju uobičajenim vrstama brodova i

kod kojih položaj težišta sistema leži ispod težišta istisnine, kod kojih odnos B/T nije standardan itd., moraju se napraviti izmene parametara trupa broda i korelacionog faktora između modela i broda.

Journe'e i dr. (1987) i Journe'e (2003) su opisali sistem za trenutno prikupljanje podataka sa eksperimentalnih ispitivanja broda „Mighty Servant 3“ i matematički model za proračun parametara rada broda. Autori su prikazali 200 eksperimentalnih ispitivanja sa brodom. Ovaj matematički model se zasniva na fizičkim i hidrodinamičkim izrazima. Sistem za podršku daje preporuke oko pretege broda, kursa i brzine broda kako bi brod imao minimalnu potrošnju goriva. Sistem takođe uključuje modul za planiranje putovanja i procenu obraštanja na trupu i propelerima. Na osnovu podataka sa merenja određeni su: koeficijent ostalog otpora, snaga potrebna za elektrifikaciju broda i specifična potrošnja goriva. Uz korak propelera, broj obrtaja propelerskog vratila, deplasman i nosivost broda i prirodni režim rada motora autori su proračunali brzinu broda, snagu glavnog pogonskog motora i potrošnju goriva. Ukupan otpor broda su predstavili kao zbir otpora trenja, otpora pritiska vode, otpora talasa i dodatnog otpora uzrokovanog vertikalnim pomeranjima broda usled talasa.

Van Terwisga (1989) metod prikazan u radu Gort (2009) se bazira na rezultatima testiranja otpora modela u istraživačkom bazenu MARIN u Holandiji. Funkcionalna veza između ulaznih i izlaznih veličina je pronađena na osnovu regresione analize. Istraživanje je dovelo do pronalaska empirijskog obrasca za proračun otpora rečnih potiskivanih teretnjaka. Ukupan otpor je predstavljen kao zbir otpora trenja, otpora uronjene površine krmenog dela broda, otpora talasa, otpora pritiska vode, otpora koji uključuje ispravke otpora između modela i izgrađenog broda i otpora privezaka. Otpor privezaka je računat primenom otpora privezaka iz Holtrop metode (1982).

Rana i dr. (1992) su razmatrali otpor i karakteristike propelera jednog brzog ratnog broda. Rezultate eksperimentalnih ispitivanja su uporedili sa metodama proračuna otpora Holtrop (1982) i Savitsky-Brown (1976). Ove dve metode su poslužile za proračun otpora preko kojih su proračunali snagu na propelerskim vratilima broda. Autori su zaključili da ove dve metode daju zadovoljavajuće rezultate, a da Holtrop metoda može da se koristi za proračun kada je Frudov broj manji od 1,0.

Maynord (2000) je napravio model za proračun snage na propelerskim vratilima brodova potiskivača na reci Misisipi. Ulazni podaci su bili brzina plovidbe potiskivanog sklopa u odnosu na vodu, glavne dimenzije sklopa, dubina vode, različiti sastavi potiskivanih teretnjaka, dimenzije plovnog kanala i tip rada propelera (da li je u

Kortovoj sapnici). Model proračunava ukupan otpor potiskivanog sklopa na osnovu otpora trenja, ostalog otpora i otpora usled gabarita plovnog puta. Potiskujuća sila je jednaka ukupnom otporu sastava. Snaga na propelerskim vratilima je proračunata na osnovu empirijskih obrazaca koji su razvijeni za brodove-potiskivače. Rezultati poređenja sa ispitivanim brodovima-potiskivačima su pokazali preciznu procenu snage na propelerskim vratilima.

Koushan (2001) je predstavio VNM kao alat za proračun koeficijenta ostalog otpora broda. Podatke u celokupnom istraživanju su činili podaci sa ispitivanja modela brodova u istraživačkom bazenu „MARINTEK“ (Norwegian Marine Technology Research Institute). Obučavanje i testiranje VNM je izvršio na 3481 podatku pri čemu je broj podataka od Ro-Ro modela brodova bio 26, od putničkih i teretnih brodova 163, od brodova za prevoz rasutih i tečnih tereta 158 i od ribarskih brodova 76. Ulazne podatke su činili odnosi glavnih dimenzija modela brodova, broj propelera, Frudov broj, odnos težišta zapremine istisnine po visini i dužine na vodnoj liniji i koeficijent punoće istisnine broskog trupa. U obzir nisu uzeti privesci tako da je autor zaključio da konačni rezultati proračuna mogu da odstupaju do 10% od pravih vrednosti za izgrađene brodove.

Jiang (2001) je uveo novi metod za proračun koeficijenata otpora trenja i ostalog otpora kao i proračun ukupnog otpora. Podatke za istraživanje je preuzeo od ispitivanja otpora modela brodova unutrašnje plovidbe i kontejnerskih brodova pri različitim dubinama plovnog puta dobijenih u Istraživačkom bazenu u Duizburgu. Pronašao je da ukupan otpor modela ne zavisi od dubine vode ukoliko ona nije ekstremno mala. Takođe, definisao je zavisnost ukupnog otpora broda i snage predate propeleru od brzine optoka³¹. Na kraju je predložio novi metod za proračun ukupnog otpora broda i snage predate propeleru u plitkoj vodi.

Čolić, (2002) računa ukupan otpor plovila unutrašnje plovidbe kao zbir otpora trenja i ostalog otpora pri čemu zanemaruju otpor talasa. Otpor trenja računa prema metodama Viliijama Fruda i ITTC'57. Ostali otpor računaju po metodi pretvaranja prema prototipu broda koji je objašnjen u knjizi Zvonkov (1956). Koeficijent ostalog otpora određuje na osnovu Frudovog broja geometrijski sličnih ispitivanih modela. Sličnost prototipa broda (modela) i plovila se određuje na osnovu dijagrama dopunskih koeficijenata ostalog otpora koji zavise od promene odnosa L_{KVL}/B_{KVL} , T_{KM}/B_{KVL} , L_{ps}/L_{KVL} i promene koeficijenta punoće istisnine (δ). U razmatranje ukupnog otpora

³¹ Brzina vode ispod dna broda

uzima još i otpor usled pada vodotoka i otpor vazduha. Posebnu pažnju usmerava na uticaj ograničenih razmera plovnog puta na povećanje ukupnog otpora. Na osnovu dijagrama koji je proizašao iz ispitivanja rečnih brodova objavljenih u knjizi (Zvonkov, 1956), autor proračunava povećanje otpora usled plovnog puta ograničene dubine i dovoljne širine (plitka voda). Onos brzine optoka i tehničke brzine broda dat je u funkciji Frudovog broja i za različite odnose dubine plovnog puta i gaženja plovila. Za proračun povećanja otpora usled plovnog puta ograničene dubine i širine (kanala) autor, takođe, primenjuje metodu Zvonkov (1956). Odnos brzine optoka i tehničke brzine broda dat je u funkciji Frudovog broja i za različite odnose površine poprečnog preseka kanala i površine poprečnog preseka glavnog rebra broda. Kod primene računskih metoda za proračun otpora trenja i ostalog otpora u plitkoj vodi i kanalu upotrebljava iste obrasce kao za proračun otpora pri plovidbi broda u mirnoj vodi dovoljne dubine i širine, samo brzinu plovidbe u obrascima zamenjuje brzinom optoka vode.

Fritsch i Bertram (2002) su opisali dijagrame funkcionalnih veza između snage (otpora) i brzine brodova i osnovnih brodskih veličina. Rad se odnosi na brze brodove sa jednim trupom kao što su korvete, fregate, manji čamci, patrolni čamci, jahte, čamci za prevoz pilota, specijalni mornarički manji čamci i katamaranski brodovi. Snagu na propelerskim vratilima brodova su prikazali kao funkciju maksimalne brzine kretanja i deplasmana broda. Ukupan otpor katamarana su predstavili kao zbir otpora trenja i ostalog otpora. Koeficijent otpora trenja su proračunali na osnovu metode ITTC'57³² pri čemu je on računat kao funkcija dužine katamarana na određenoj vodnoj liniji i okvašene površine, ali i kao funkcija dužine i površine uronjenog dela svakog od priveska³³ kod ispitivanja modela katamarana.

Bolt metod (2003) prikazan u radu Gort (2009) se zasniva na osrednjenim glavnim dimenzijama rečnih potiskivanih teretnjaka. U poređenju sa Van Terwisga metodom, broj ulaznih veličina za ovaj metod je dosta manji, ali su i same veličine jednostavnije. Ukupan otpor potiskivanog teretnjaka je jednak sumi otpora trenja, ostalog otpora (otpora pritiska vode i talasa) i otpora usled plovnog puta ograničene dubine i dovoljne širine. Bolt uvodi koeficijent dodatnog otpora koji se javlja usled plitke vode. Dodatni otpor od plitke vode se zasniva na činjenici da se nivo vode između

³² Međunarodni sastanak uprava opitnih bazena (eng. International Towing Tank Conference) 1957 godine

³³ Privesci utiču na ljuljanje i posrtanje broda. Uticaj privezaka se određuje prilikom modelskih ispitivanja, a sami privesci mogu biti sledeći: skrok, bočna i glavna krmena pera, sapnice, kobilica, vratila propelera itd.

dna potiskivanog teretnjaka i dna plovnog puta smanjuje usled povećanja brzine plovidbe u odnosu na vodu i vode koje potiskivani teretnjak gura ispred sebe. Zbog toga je brzina optoka vode veća od same brzine plovidbe potisnice u odnosu na vodu.

Cowper i dr. (2003) su izvršili eksperimentalna ispitivanja na 36 brodova koji su deo kompanije „British Columbia Ferry Services Inc.“. Veliki broj brodova je bio star više od 25 godina i imao više od 120000 časova u eksploataciji. Kako bi smanjili troškove rada brodova i produžili njihov životni vek, na mnogima od njih su zamenjeni motori (čime su smanjili potrošnju goriva) i propeleri kako bi bili odgovarajući novim motorima. Na brodovima sa novim motorima su izvršena eksperimentalna ispitivanja propulzionih osobenosti. Po završenim ispitivanjima, autori su zaključili da brodovi sa novim motorima i propelerima ostvaruju 1,5 puta veću brzinu za istu snagu glavnog pogonskog motora i da nema vibracija.

Mason i dr. (2005) su istraživali preciznost izlaznih rezultata koje su dobili obučavanjem VNM na podacima koji su uključivali otpore katamaranskih brodova. Samo istraživanje predstavlja nastavak rada koji je predstavljen u radu Couser i Mason (2004). Cilj tog prethodnog istraživanja bio je da se napravi model po kome će se proračunavati koeficijent ostalog otpora. Ulazne veličine su bile Frudov broj, odnos širine i dužine katamarana, odnos gaženja i širine katamarana i odnos dužine katamarana i kubnog korena istisnine. Podaci su prikupljeni iz serija ispitivanja (Molland i dr., 1994). Autori su pokazali da kombinacija genetskih algoritama i VNM može da posluži kao optimizacioni alat u proračunu koeficijenta ostalog otpora. U kasnijem istraživanju (Mason i dr., 2005) autori su zaključili da relativno mali skup podataka sa visokim šumom može biti upotrebljen za obučavanje VNM sa prostiranjem signala unapred. Takođe su demonstrirali da rezultati mogu biti još precizniji ukoliko se koriste dvoslojne VNM sa prostiranjem signala unapred.

Bertram i Mesbahi (2006) su izveli obrasce za proračun otpora i snage trimaranskih brodova. Bazu podataka su činili podaci sa Francuskog nacionalnog instituta za inženjerstvo u Bretanji (fr. École Nationale Supérieure de Techniques Avancées Bretagne) i iz prethodnih radova. Autori su napravili izraze za proračun snage na propelerskim vratilima trimarana, odnosa snage na propelerskim vratilima i deplasmana trimarana i koeficijenta ostalog otpora tako što su obučavali VNM. Ulazni podaci u VNM su bili deplasman, istisnina, brzina plovidbe u odnosu na vodu i odnos dužine trimarana i kubnog korena istisnine. Na kraju su zaključili da proračun

pomenutih veličina pomoću VNM daje preciznije izlazne rezultate od proračuna pomoću matematičke regresije.

U svojoj monografiji Čolić (2006) daje detaljan pregled 22 obavljena ispitivanja izgrađenih brodova-potiskivača koje je obavila Laboratorija za ispitivanje brodova i plovnih puteva Saobraćajnog fakulteta. U okviru istraživanja plovidbenih, prevoznih, energetskih i propulziona-vučnih osobnosti dunavskih brodova potiskivača dat je pregled sledećih eksperimentalnih ispitivanja:

1. Merenje snage motora potiskivača na propelerskim vratilima pri raznim punjenjima motora, odnosno pri raznim brojevima obrtaja za sledeće slučajeve:

- a) u slobodnoj plovidbi,
- b) u mestu („na vezu“),
- c) sa raznim sastavima potiskivanih teretnjaka.

Izrada tabela $N_{vr} = f(n_{vr})$ i $N_{vr} = f(v_{pl})$ za više opterećenja glavnih pogonskih motora do zaključno najvećeg dozvoljenog punjenja.

2. Merenje broja obrtaja propelerskih vratila (n_{vr}) pri istim opterećenjima motora.
3. Određivanje brzine plovidbe u odnosu na vodu, brzine struje rečnog toka i tehničke brzine potiskivanih sklopova.
4. Merenje potisne sile brodova-potiskivača.
5. Provera rada oba ili sva tri motora, zatim vršenje kontrole glavnih motora, odnosno najosnovnija termo-tehnička ispitivanja, merenje potrošnje goriva, merenje pritiska sabijanja i kompresije, provera ispravnosti nadzornih instrumenata na motorima i na zapovedničkom mestu, merenje temperature vode za hlađenje, merenje temperature ispusnih gasova, kontrola pokazivača broja obrtaja motora.
6. Određivanje propulziona analize i potiskujuće karakteristike brodova-potiskivača za pojedine ispitane sklopove, zatim tehničko-eksploatacione osobnosti, tj. prevozne učinke.

Korkut (2006) je istraživao uštede energije preko karakteristika snage samohodnog motornog teretnjaka za prevoz generalnih tereta. On je izveo oblik broskog trupa od jednog izvornog oblika trupa i uporedio ga sa njim, a ispitivao je otpor broda na modelu ovog novog oblika trupa broda. Pokazao je da se dobijaju 10% manji otpori, efektivna snaga i snaga na propelerskim vratilima broda, kada se propeler stavi u Kortovu sapnicu i kada se optimizuje oblik broskog trupa na krmenom delu broda.

Matulja i Dejhalla (2007) su upoređivali otpore broda sa jednim propelerskim vratilom različitim računskim metodama. Za proračun otpora su koristili metodu potencijalnog strujanja koja se temelji na metodi Dawson (1977), a rezultate su uporedili sa Holtrop metodom (Holtrop i Mennen, 1982), Holenbah metodom (1999) i sa rezultatima ispitivanja modela brodova. Autori su zaključili da su Holtrop i Holenbah metoda pouzdane u preliminarnoj fazi projektovanja broda, a da rezultati proračuna metodom potencijalnog strujanja treba prihvatiti sa određenom rezervom budući da ova metoda ima nedostatke kod primene na brodove sa koeficijentom punoće istisnine većim od 0,7.

Abdel N. i dr. (2008) su istraživali različite konfiguracije VNM za proračun koeficijenata otpora rečnih potisnica. Njihovo istraživanje se oslanjalo na ispitivanjima modela brodova koji su obavljani u istraživačkom bazenu u Duizburgu. Obučavali su jednoslojne neuronske mreže sa prostiranjem signala unapred (*eng. feed forward single layer neural network*) i neuronske mreže sa funkcijom radijalne baze – FRB mreže. Autori su zaključili da VNM imaju velike mogućnosti kada je u pitanju pronalaženje funkcionalnih veza između ulaznih i izlaznih podataka sa ispitivanja modela, ali da preciznost izlaznih rezultata treba uzeti sa određenom rezervom. To se posebno odnosi na maksimalne apsolutne greške.

Čolić i dr. (2008) su dali pregled eksperimentalnih ispitivanja propulzionih i plovidbenih osobnosti naših izgrađenih brodova-potiskivača na Dunavskoj plovnoj mreži. Autori su zaključili da ovi rezultati ispitivanja mogu veoma korisno da posluže, kako konstruktorima rečnih brodova-potiskivača (posebno konstruktorima propulzionih uređaja) tako i stručnjacima koji se bave tehničkom eksploatacijom prevoženja. Analizom rezultata je pokazano da eksperimentalna ispitivanja treba da se nastave kod svih novoizgrađenih plovila, kao i kod rekonstrukcija već postojećih plovnih sredstava.

Pedersen i Larsen (2009) su modelirali rad propulzora broda „Torm Marie“ sa relativnom greškom manjom od 2,7%. Pri tome su koristili jednoslojnu VNM sa prostiranjem signala unapred. Dobijenu relativnu grešku su uporedili sa metodama proračuna otpora Harvald (1983) i Holtrop (1984) i utvrdili da ove metode daju relativnu grešku koja je veća od 5%. Ulazni podaci su im bili tehnička brzina broda, relativna brzina vetra, pravac duvanja vetra, temperatura vazduha i temperatura morske vode. Izlazna veličina je bila snaga propelerskih vratila. Autori su zaključili da model radi jedino sa podacima koji su u okviru granica ulaznih podataka koji su obučavani

neuronskom mrežom. Ukoliko bi se pojavili novi podaci moralo bi i da se izvrši novo obučavanje VNM.

Ortigoza i dr. (2009) su uporedili rezultate proračuna otpora brodova metodom VNM i metodom Holtrop i Mennen (1982). Oni su uzeli u razmatranje 1707 merenja otpora na 147 modela brodova i 82 eksperimentalna ispitivanja 46 izgrađenih brodova. Podatke su preuzeli sa ispitivanja tankera, ribarskih brodova, brodova za prevoz rude i rasutog tereta, lučkih remorkera, kontejnerskih brodova, fregata itd. Obučavali su višeslojne VNM sa prostiranjem signala unapred. Za izlazne veličine su uzeli otpor trenja i otpor talasa, dok su za ulazne veličine koristili glavne brodske dimenzije i Frudov broj. Zaključili su da proračun otpora korišćenjem VNM daje preciznije rezultate od proračuna otpora Holtrop metodom.

Morawski i Szuca (2009) su opisali sistem za praćenje parametara rada broda. Oni su na brod instalirali torziometar, povezali ga sa računarnom i tokom ispitivanja dobijali podatke o ugaonoj brzini propelerskih vratila, obrtnom momentu i snazi na propelerskom vratilu broda. Svi podaci su bili prikazivani u trenutku pri čemu su na monitoru ekrana odmah davali krivu zavisnosti snage na propelerskom vratilu od ugaone brzine propelerskih vratila. Zaključili su:

- da stalnom kontrolom obrtnog momenta mogu da se smanje troškovi održavanja propulzionog sistema,
- da poznatom potrošnjom goriva po jednoj pređenoj nautičkoj milji mogu da se odaberu parametri rada broda koji će biti najprofitabilniji za datu deonicu plovnog puta,
- da sa poznatim obrtnim momentom i brzinom plovidbe u odnosu na vodu mogu da se kontrolišu promene stanja trupa i površine propelera čime se lakše donose odluke o mogućem čišćenju ovih površina,
- da smeštanjem podataka merenja i proračuna sa kompjutera omogućava brodovlasniku da proceni na koji način će brod da se nađe u eksploataciji.

Chen i dr. (2009) su u svom radu ispitivali mogućnost primene jednog univerzalnog potiskivanog teretnjaka za prevoz gvozdene rude morskim i rečnim plovnim putevima. Napravili su metodu za proračun otpora broda obučavanjem VNM. Za obučavanje i testiranje VNM su koristili podatke sa ispitivanja 60 modela brodova. Početne težine grana u mreži i granične vrednosti su određivali korišćenjem genetskog algoritma da bi kasnije primenili algoritam povratnog prostiranja greške na obučavanje

VNM. Autori su zaključili da je tehnika VNM veoma prihvatljiva za proračun otpora broda i da svaki novi podatak može vrlo lako da se uvede u skup za obučavanje ili testiranje. Izveli su dva eksperimentalna ispitivanja potiskivanih sklopova i to na moru i na reci. Rezultate ispitivanja su uporedili sa ispitivanjima modela potiskivanih sklopova. Cilj istraživanja je bio da se smanje troškovi transporta i zagađenja prirodne sredine. Tokom eksperimentalnih ispitivanja izvršili su manevarska ispitivanja i ispitivanja brzine potiskivanih sklopova. Rezultati ispitivanja različitih potiskivanih sklopova su pokazali da se može ostvariti značajna ušteda u potrošnji goriva brodova-potiskivača. Autori su predložili da se postojeći potiskivani teretnjak koji se koristi za transport rude na moru rekonstruiše tako da u budućnosti bude sastavni deo potiskivanih sklopova na reci.

Min i Kang (2010) su ispitivali faktor oblika trupa broda koji se vezuje za koeficijent otpora trenja koji se računa po metodi ITTC'78. Oni su predložili novu ekstrapolacionu metodu za proračun ukupnog otpora izgrađenog broda tako što su izvršili sledeće tri studije: proveru faktora oblika trupa broda prema ITTC'78, proveru odnosa između faktora oblika trupa broda i Rejnoldsovog broja (R_e)³⁴ i određivanje faktora oblika trupa broda pri projektovanoj brzini broda. Celokupnu proceduru, autori su izvršili na osnovu testiranja modela u Institutu za pomorska istraživanja HMRI (*eng. Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries*). Iskoristivši rezultate prethodno pomenute tri studije, autori su napravili novu metodu za proračun ukupnog otpora izgrađenih brodova, pri čemu su zadržali osnovni koncept ITTC'78 metode.

Kalajdžić i Hofman (2011) su u svom tehničkom rešenju napravili novi postupak za proračun potrebne snage rečnih potiskivanih sklopova koji se zasniva na obimnim modelskim ispitivanjima drugih autora. Postupak proračuna potrebne snage brodova-potiskivača se zasniva na obučavanju VNM. Oni su napravili originalni softver CONVOY koji pored proračuna potrebne snage, sprovodi i analizu i optimizaciju sastava sa stanovišta ekonomske efikasnosti, optimalne brzine i dr. Razvijena metoda proračunava potrebne snage brodova-potiskivača za niz standardnih sastava potiskivanih teretnjaka. Opisana metoda u ovom tehničkom rešenju predstavlja pouzdan alat za projektovanje brodova-potiskivača, kao i analizu ekonomske efikasnosti rečnog

³⁴ $R_e = \frac{v \cdot L_{KVL}}{\nu}$ (Kreculj i Čolić, 1996)

ν - koeficijent kinematskog viskoziteta vode

transporta. Softver CONVOY omogućava procenu efikasnosti transporta i izbor optimalnog rešenja.

Radonjić i Čolić (2011) su obučavali 4 VNM za dobijanje snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Oni su koristili merne podatke sa eksperimentalnih ispitivanja dunavskih brodova potiskivača. Ispitivanje je obavila Laboratorija za ispitivanje brodova i plovnih puteva Saobraćajnog fakulteta. Arhitektura 4 neuronske mreže je bila sa dva sloja: skriveni i izlazni. Ulazni podaci su bili brzina plovidbe potiskivanih sklopova u mirnoj vodi, odnos širine i dužine sklopa, odnos širine i dužine sklopa i Frudov broj. Izlazni podatak je bio izmerena snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Autori su pokazali da obučavanje VNM može da se iskoristi za proračun snage propellerskih vratila brodova-potiskivača, ali da je potrebno dalje istraživanje u vidu provere različitih arhitektura neuronskih mreža.

Radonjić i dr. (2012) su analizirali primenu različitih algoritama za obučavanje VNM na primeru podataka dobijenih sa eksperimentalnih ispitivanja dunavskih brodova-potiskivača. Ispitivanja je obavila Laboratorija za ispitivanje brodova i plovnih puteva Saobraćajnog fakulteta. Ulazni podaci su bili brzina plovidbe potiskivanih sklopova u mirnoj vodi, odnos širine i dužine sklopa, odnos širine i dužine sklopa i Frudov broj. Izlazni podatak je bio izmerena snaga na propellerskim vratilima brodova potiskivača. Autori su ispitivali pet različitih algoritama za obučavanje. Dobijeni rezultati su pokazali da najmanja odstupanja u izmerenim vrednostima snage na propellerskim vratilima i proračunatim vrednostima daje TNC algoritam (Nash, 2000).

Čolić i dr. (2012) su predložili originalnu metodu za određivanje otpora broda u mirnoj vodi dovoljne dubine na osnovu poznatog otpora broda u plitkoj vodi. Autori su valjanost metode potvrdili računskim primerom tako što su odredili koeficijent plitke vode. Koeficijent se kretao od manje vrednosti ka većoj vrednosti sa povećanjem brzine plovidbe u mirnoj vodi.

Kim i dr. (2013) su u svom radu opisali eksperimentalno ispitivanje korejskog broda „Araon“ pri uslovima plovnog puta na Antarktiku gde postoje velike sante leda. Eksperimentalna ispitivanja su poslužila da se pronađe zavisnost između izmerene snage na propellerskom vratilu i tehničke brzine broda. Rezultate eksperimentalnih ispitivanja, odnosno promene odnosa snage na propellerskom vratilu broda i tehničke brzine broda su analizirali u odnosu na promene u debljini i čvrstoći leda. Rezultate analiza su uporedili sa rezultatima testiranja modela broda. Korekcija debljine i čvrstoće leda po završenim ispitivanjima je iskorišćena kako bi se podesila potrebna debljina i

čvrstoća leda za ispitivanje, a koja nije mogla da se pronađe na mernoj stazi u trenutku ispitivanja. Za potrebnu korekciju leda, autori su koristili HSVA (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt) metod objašnjen u radu Lee i dr. (2011).

Kayano i dr. (2013) su u svom radu ispitivali uticaj nepovoljnih hidrološko-meteoroloških uslova na ostvarivanje funkcionalne veze između snage na propelerskom vratilu broda i brzinu plovidbe u odnosu na vodu. Uporedili su krive dobijene modelskim ispitivanjima i ispitivanjima izgrađenog broda na plovnom putu. Zaključili su da snaga broda opada sa povećanjem brzine vetra i visinom talasa, da je uticaj talasa na smanjenje snage na propelerskom vratilu veći od uticaja vetra, da povećanje snage dolazi od smanjenog učinka u radu propelera i da je potrebno izemriti propulzionu silu koja se stvara na krilima propelera i proračunati stepen iskorišćenja propelera.

Kostić i dr. (2013) su izvršili sledeća ispitivanja plovnog samohodnog bagera refulera, „Sava III“:

1. Merenje snage na propelerskom vratilu (N_{vr}) za nekoliko različitih punjenja glavnog pogonskog motora, zaključno sa najvećim dozvoljenim punjenjem motora za tzv. „trajni pogon“.
2. Merenje brojeva obrtaja propelerskog vrtila (n_{vr}) pri istim punjenjima motora (režimima rada) i istim uslovima plovidbe kao pod 1.
3. Merenje obrtnih momenata i torzionih vibracija na propelerskom vratilu.
4. Merenje brzine plovidbe (v_t) u odnosu na obalu (tehničke brzine) istovremeno sa navedenim ispitivanjima pod 1., 2. i 3.

Eksperimentalno ispitivanje je obavljeno 19. septembra 2013. godine na reci Savi, u uzvodnoj i nizvodnoj plovidbi između km 118 i km 121. Rezultati ispitivanja su dijagrami zavisnosti između snage na propelerskom vratilu i broja obrtaja propelerskog vrtila, između tehničke brzine broda i snage na propelerskom vratilu, između tehničke brzine broda i broja obrtaja propelerskog vrtila i između srednjeg izmerenog torzionog momenta na propelerskom vratilu i broja obrtaja propelerskog vrtila. Autori su zaključili da je da je samohodni bager refuler SAVA III sposoban za predviđenu namenu. Snaga izmerena na propelerskom vratilu bila je jednaka 93% od instalisane snage broda, da su torziona naprezanja na propelerskom vratilu izmerena u svim režimima rada motora bila u dozvoljenim garnicama jer su dobijene vrednosti višestruko manje od dozvoljenih naprezanja usled torzionih vibracija za čelik od koga je napravljeno vratilo.

Radonjić i Vukadinović (2014) su određivali snagu na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Bazu podataka na osnovu koje su obučavali VNM činila su eksperimentalna ispitivanja energetske i propulzivne osobnosti dunavskih brodova-potiskivača. U radu su upoređeni rezultati obučavanja VNM sa dva skrivena sloja i skupa VNM koji su činile 4 neuronske mreže sa jednim skrivenim slojem. Cilj rad je bio da se pokaže da skupovi VNM daju preciznije rezultate u odnosu na VNM sa dva skrivena sloja i da se skupovi VNM mogu primeniti za proračun snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Rezultati proračuna su pokazali da skup VNM mreža daje preciznije rezultate od VNM sa dva skrivena sloja. Za formiranje modela skupa VNM predložen je metod na osnovu Akaike informacionog kriterijuma (Zhao i dr., 2008).

4. Pregled ispitivanja izgrađenih brodova-potiskivača (podaci dobijeni na osnovu eksperimentalnih merenja)

Laboratorija za ispitivanje brodova i plovnih puteva Saobraćajnog fakulteta je u razdoblju od 1960. godine do 2004. godine obavila niz eksperimentalnih ispitivanja izgrađenih brodova na plovnom putu. U okviru ovih ispitivanja izvršena su proučavanja energetske i propulzionih osobnosti brodova, uticaj karakteristika plovnog puta i uticaj vetra i veličine sastava tegljenih i potiskivanih teretnjaka na organizaciju prevoženja i korišćenja prevoznih sredstava. Ispitivanja i proučavanja rečnih nesamohodnih i samohodnih brodova na plovnim putevima su obuhvatila (Čolić, 2006):

- merenje otpora 10 savremenih dunavskih teretnjaka nosivosti od 450 do 1000 t;
- ispitivanja i analiza propulzionih i vučnih svojstava 12 savremenih dunavskih brodova-tegljača od 441,3 do 1323,9 kW (600 do 1800 KS);
- ispitivanje i analiza propulzionih i potisnih osobnosti 22 savremena dunavska broda-potiskivača od 294,2 do 2427,15 kW (400 do 3300 KS);
- ispitivanje svrsishodnosti primene vanbrodskih i propulzionih uređaja tipa „Šotel“ na teretnjake nosivosti do 700 t i snage do 110,3 kW (150 KS) pri plovidbi u kanalima Hidrosistema Dunav – Tisa – Dunav;
- ispitivanje i analiza propulzionih osobnosti samohodnog motornog teretnjaka od 1276,8 kW (1736 KS);
- ispitivanje uticaja, broja i rasporeda teretnjaka u sastavima tegljenih i potiskivanih teretnjaka na brzinu plovidbe, ukupne otpore, manevarska svojstva i dr.;
- ispitivanje uticaja plitke vode rečnih plovnih puteva i ograničenih razmera plovnih kanala Hidrosistema Dunav – Tisa – Dunav na povećanje otpora pri plovidbi dunavskih teretnjaka;

- ispitivanje uticaja nagiba rečnog toka na brzinu kretanja plovila;
- ispitivanja i analiza vibracija i buke kod različitih brodova (brodovi-tegljači, brodovi-potiskivači, samohodni motorni teretnjak, sidrišni remorker, Ro-Ro brod katamaran, morski brod).

4.1. Pregled ispitivanja brodova potiskivača

Eksperimentalna ispitivanja brodova-potiskivača su obavljena u razdoblju od 1968. godine do 2004. godine (videti Tabelu 4.1). Zabeležene su pojave prirodnog režima plovnog toka kao što su mesto, vetar, talasi, dubina vode i strujanje vode. Mesta ili lokacije ispitivanja su bila na Dunavu, a određivana su kilometrom plovnog puta. Dubina vode je određivana na osnovu vodostaja Dunava na dan ispitivanja. Zaključeno je da su sva ispitivanja obavljena na plovnom putu dovoljne dubine i širine i da su svi vodostaji takvi da ne izazivaju dopunsko povećanje otpora plovila. Ispitivanja su obavljena po lepom i sunčanom vremenu, bez jačeg vetra koji bi uticao na normalne uslove merenja i na tačnost rezultata merenja. U toku samih ispitivanja vršena su stalna kontrola merenja i određivani jačina i pravac vetra.

Određivanje snage glavnih pogonskih motora vršeno je pomoću torziometra koji je bio postavljen na oba propelerska vratila ili na sva tri propelerska vratila u slučaju motornih potiskivača „Kumanovo“ i „Kadinjača“. Brzina plovidbe potiskivanih sastava određivana je pomoću hidrometrijskog krila koje je bilo postavljeno na pramčanom delu potiskivanih teretnjaka, odnosno istureno oko 3 metra ispred pramca teretnjaka čime je bilo obezbeđeno merenje u neuznemirenoj vodi.

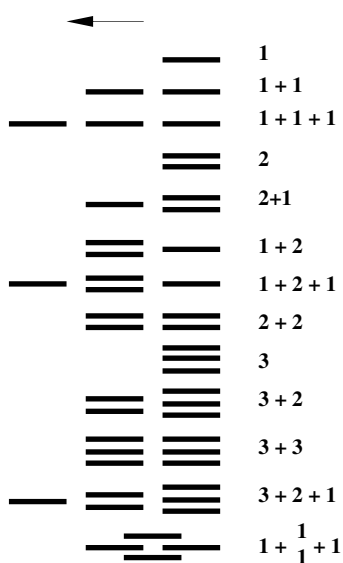
Eksperimentalna ispitivanja brodova-potiskivača su vršena sa raznim sastavima potiskivanih teretnjaka, zatim u mestu i u slobodnoj plovidbi. Sastavi potiskivanih teretnjaka su obuhvatali i one najmanje sastave (u oznaci „1“, „1+1“) i one najveće (u oznaci „3+3+3“ ili „4+4“) – videti Sliku 4.1.

Pregled ispitivanja izgrađenih brodova motornih potiskivača od strane Laboratorije za ispitivanje brodova i plovnih puteva Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu, prikazan je u Tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Pregled ispitivanja izgrađenih rečnih brodova potiskivača od strane Laboratorije za ispitivanje brodova i plovnih puteva Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu (Izvor: Čolić, 2006)

Brod-potiskivač	Dužina na KVL L_{pot} (m)	Širina na KVL B_{pot} (m)	Konstrukciono gaženje T_{pot} (m)	Deplasma n punog broda D_{mpot} (t)	Instalisana snaga N_{inst} (kW)	Vrsta ispitivanja
„BUKOVIK“	48,4	8,0	1,3	365,0	2×331	Propulzione osobnosti
„DELIGRAD“	34,11	9,8	1,5	461,81	2×456	Propulzione osobnosti
„STOLOVI“	48,45	8,01	1,35	357	2×464	Propulzione osobnosti
„VINODOL“	29,1	9,18	1,7	314,6	2×379	Propulzione osobnosti
„DELI JOVAN“	43,53	8,73	1,65	338,0	2×441,6	Propulzija: Tehničko – eksploatacione osobnosti
„KABLAR“	20,6	6,0	1,4	121,28	2×110,4	Propulzione osobnosti
„SLOGA“	35,01	10,98	1,65	393,0	2×706,6	Propulzione osobnosti
„KUMANOVO“	34,0	11,03	1,8	505,5	3×809,6	Propulzione osobnosti
„ROMANIJA“	32,0	9,02	2,0	413,0	2×541,6	Propulzione osobnosti potrošnja goriva
„ŠUMADIJA“	31,0	9,55	1,8	338,75	2×379	Propulzione osobnosti
„PINKI“	29,96	9,2	1,8	338,75	2×379	Propulzione osobnosti
„PANONIJA“	29,87	9,61	1,8	338,75	2×379	Propulzione osobnosti
„BANAT II“	26,09	6,6	1,8	192	2×265	Propulzione osobnosti
„KADINJAČA“	34,29	11,0	1,8	505	3×809,6	Propulzione osobnosti potrošnja goriva
„SREM“	26,09	6,62	1,7	192	2×265	Propulzione osobnosti
„KLADOVO“	34,78	11,2	1,95	530	2×809,6	Propulzione osobnosti
„TRUŽENIK-1“	12,0	6,2	1,6	74	2×150	Propulzione osobnosti vibracije, buka
„BOR“	31,35	9,2	1,75	330	2×485	Propulzione osobnosti vibracije, buka
„ZLATIBOR“	25,05	9,56	2,11	369,02	2×830	Propulzione osobnosti

SMER KRETANJA OZNAKE



Slika 4.1. Uobičajeni način za označavanje sastava potiskivanih teretnjaka

U okviru eksperimentalnih ispitivanja propulzionih osobnosti motornih potiskivača izvršena su sledeća merenja:

1. Merenje snage broda-potiskivača na propelerskim vratilima pri raznim punjenjima motora, odnosno pri raznim brojevima obrtaja.
2. Merenje broja obrtaja propelerskih vrtila (n_{vr}) pri istim opterećenjima motora.
3. Određivanje brzine plovidbe u mirnoj vodi, brzine struje rečnog toka i tehničke brzine potikivanih sklopova.
4. Merenje potisne sile brodova-potiskivača.
5. Provera rada oba ili sva tri motora, zatim vršenje kontrole glavnih motora, odnosno najosnovnija termo-tehnička ispitivanja, merenje potrošnje goriva, merenje pritiska sabijanja i kompresije, provera ispravnosti nadzornih instrumenata na motorima i na zapovedničkom mestu, merenje temperature vode za hlađenje, merenje temperature ispusnih gasova, kontrola pokazivača broja obrtaja motora.
6. Određivanje propulzione analize i potiskujuće karakteristike brodova-potiskivača za pojedine ispitane sklopove, zatim tehničko-eksplotacione osobnosti, tj. prevozni učinci.

4.2. Ispitivanje brzine plovidbe potiskivanih sklopova u zavisnosti od snage pogonskih motora broda-potiskivača

Ispitivanja, čiji su rezultati analizirani u narednim poglavljima, su sledeća:

1. Merenje snage (N_{vr}) na propelerskim vratilima broda-potiskivača za nekoliko opterećenja pogonskih motora, zaključno sa najvećim dozvoljenim punjenjem motora za trajni pogon.
2. Merenje broja obrtaja propelerskih vrtila (n_{vr}) pri istim opterećenjima motora (režimima rada) kao što je navedeno pod 1.
3. Merenje brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi (v_{pl}) istovremeno sa napred navedenim ispitivanjima.

Merenje snage i broja obrtaja na propelerskim vratilima vršeno je pomoću torziometra (tipa „Maihak“), koji je bio postavljen na oba vrtila u krlenom delu broda. Pošto su se između motora i mernog instrumenta nalazile reduktor + spojnica i ležišta u kojima se javljaju izvesni gubici, što treba uzeti u obzir, to su izmerene snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača za oko 2 do 2,5% manje od snaga na vratilima samih motora.

Takođe, kod nekih ispitivanja, za merenje snage na propelerskim vratilima korišćen je elektronski merač torzionih momenata, a brojevi obrtaja propelerskih vratila određeni su elektronskim meračem.

Merenje snage i broja obrtaja na propelerskim vratilima izvršeno je pri najvećem punjenju motora za trajni pogon, kao i za nekoliko nižih opterećenja.

Brzina plovidbe potiskivanih sklopova u mirnoj vodi određivana je pomoću hidrometrijskog krila koje je bilo postavljeno bočno, na pramcu prvog reda potisnica³⁵. Posebnim držačima krilo je bilo istureno za oko 4 metra od boka potisnice. Na taj način omogućeno je merenje brzine plovidbe u mirnoj vodi bez znatnijeg uticaja pramčanih talasa i deplasmanskog potiskivanja vode, jer se može smatrati da je krilo „radilo“ u relativno neuznemirenoj vodi.

Sva ispitivanja su vršena za određene vrste sastava natovarenih (teretnih) potiskivanih teretnjaka. Merenje brzine plovidbe u odnosu na obalu (tehnička brzina plovidbe) vršeno je tako što su beležena vremena prolaska pored kilometarskih stubova na obali. Takođe, pri svakom merenju naznačena je deonica plovnog puta kao i merodavni vodostaj. Detaljniji prikaz o načinima merenja brzine, snage i broja obrtaja kao i o karakteristikama mernih instrumenata biće izloženi u poglavlju 5.

4.3. Prikaz dosadašnjih ispitivanja izgrađenih brodova-potiskivača

Celokupna dosadašnja eksperimentalna ispitivanja brodova-potiskivača su izvršena na deonici Dunava od km 1100 do km 1122. Ukupan skup izmerenih podataka broji 255 pojedinačnih merenja snaga na propelerskim vratilima sa eksperimentalnih ispitivanja 22 broda-potiskivača (videti Tabelu 4.1). U radu će se koristiti skup podataka koji broji 193 podatka sa eksperimentalnih ispitivanja 15 brodova-potiskivača (videti Tabelu 4.2). Osnovna razlika u ova dva skupa je u sastavima potiskivanih teretnjaka. Prilikom vršenja eksperimentalnih ispitivanja pojedinih brodova-potiskivača, sastavi potiskivanih teretnjaka (pored potiskivanih teretnjaka) su uključivali i tegljene teretnjake. Tegljence su bile deo sastava ili su u jednom slučaju činile sastav sa dve tegljence kao u slučaju ispitivanog sklopa „D“ kod motornog potiskivača Kumanovo (Čolić, 2006). U Tabeli 4.2 su prikazani osnovni podaci sa eksperimentalnih ispitivanja

³⁵ Za vreme merenja krilo je bilo uronjeno približno do dubine od 1,0 metara

15 brodova-potiskivača koji će poslužiti za definisanje ulaznih i izlaznih veličina, obučavanje VNM i za formiranje granica za primenu modela skupa VNM.

Tabela 4.2. Osnovne dimenzije ispitivanih sklopova sa izmerenim brzinama plovidbe u mirnoj vodi i snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača (Izvor: Čolić, 2006)

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$\left[\begin{matrix} k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}} \\ k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}} \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}} \\ k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}} \end{matrix} \right]$	Potiskivani sastav	$D_{mskl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (t)	$L_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$B_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$T_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$\left[\begin{matrix} v_{pl \min}^{(i_{pot}, i_{sast})} \\ v_{pl \max}^{(i_{pot}, i_{sast})} \end{matrix} \right]$ (km/h)	$\left[\begin{matrix} N_{vr \min}^{(i_{pot}, i_{sast})} \\ N_{vr \max}^{(i_{pot}, i_{sast})} \end{matrix} \right]$ (kW)
„Bukovik“	1	1	[1,6]	[1,6]	2+2	5265,899	182,4	20,4	2,02	[7,58;10,3]	[200,1;581,0]
„Deligrad“	2	2	[1,5]	[7,11]	2+2	6264,65	168,17	20,46	2,3	[9,5;11]	[353,0;828,9]
		3	[1,5]	[12,16]	2+2+2	9116,26	235,15	20,46	2,3	[8;10]	[356,7;867,2]
		4	[1,4]	[17,20]	3+3	9116,26	168,17	30,68	2,3	[8,5;10]	[372,2;873,8]
„Vinodol“	3	5	1	21	2+0	2088,391	92,04	15,2	2,2	14,6	625,2
		6	1	22	2+2	3862,183	154,04	15,2	2,2	12,2	678,1
		7	[1,3]	[23,25]	3+3	5635,974	154,04	22,8	2,2	[7,6;10]	[400,1;692,1]
		8	1	26	2+2+2	5635,974	216,04	15,2	2,2	9,8	687,0
		9	1	27	4+4	7409,765	154,04	30,4	2,2	8,7	702,4
„Kablar“	4	10	[1,3]	[28,30]	1+0	1065,38	89,35	8,53	1,9	[11,8;13,7]	[108,1;180,2]
		11	[1,5]	[31,35]	2+0	2009,48	89,35	17,06	1,9	[8,45;11,4]	[100,8;194,2]
„Sloga“	5	12	[1,5]	[36,40]	3+3	11933,32	195,03	32,97	2,4	[8,8;13,3]	[358,2;1237,8]
		13	[1,6]	[41,46]	2+2	8077,84	195,03	21,98	2,4	[9,2;15,8]	[260,4;1310,7]
		14	[1,5]	[47,51]	1+1+1	6136,1	275,01	10,99	2,4	[11,2;16,7]	[369,2;1313,6]
		15	1	52	2+0	4219,5	115,01	21,98	2,4	15,6	1317,3
		16	[1,6]	[53,58]	1+1	4224,2	195,01	10,99	2,4	[11,6;18,5]	[266,3;1301,8]
„Romanija“	6	17	[1,6]	[59,63]	3+3	5206,19	155,86	22,81	1,98	[8,61;12,1]	[317,7;1101,0]
		18	[1,5]	[64,68]	4+4	6760,58	155,86	30,43	1,97	[7,44;10,9]	[322,1;1071,6]
		19	[1,5]	[69,73]	3+3+3	7569,73	217,76	22,82	1,97	[6,3;10,05]	[311,9;1123,1]
„Šumadija“	7	20	[1,5]	[74,78]	3+3	5515,4	154,93	22,86	2,15	[8,66;10,7]	[339,1;672,2]
		21	[1,6]	[79,83]	3+3+2	7177,96	216,89	22,86	2,12	[7,52;9,4]	[339,1;666,4]
„Pinki“	8	22	[1,4]	[84,87]	1+1	3888,95	171,88	11,63	2,47	[10;16,2]	[300,1;726,7]
		23	[1,5]	[88,92]	2	3888,95	100,93	23,24	2,47	[9,3;15,3]	[291,3;699,5]
		24	[1,3]	[93,95]	1+1+1	5677,55	242,98	11,63	2,49	[11,9;13,9]	[536,9;725,2]
		25	[1,3]	[96,98]	2+1	5677,55	171,95	23,24	2,49	[11,4;13,1]	[553,1;719,3]
		26	[1,3]	[99,101]	2+1	5649,35	171,94	23,24	2,48	[8,93;12,4]	[216,2;530,3]
		27	[1,5]	[102,106]	2+2	7436,75	171,97	23,26	2,49	[7,2;11,6]	[292,0;721,5]
		28	[1,5]	[107,111]	2+2	7386,35	171,94	23,23	2,48	[8,21;10,8]	[242,7;534,7]
„Panonija“	9	29	[1,5]	[112,116]	2+2	7383,95	171,95	23,26	2,49	[7,85;11,3]	[315,5;655,3]
		30	[1,4]	[117,120]	3+0	5624,75	100,91	34,82	2,49	[10,1;11,4]	[371,4;629,6]
		31	[1,4]	[121,124]	2+2	7376,95	171,85	23,24	2,46	[7,2;10,33]	[207,4;576,6]
		32	[1,3]	[125,127]	2+1 ^{*)}	5642,95	171,85	23,24	2,49	[8,42;11,6]	[203,0;558,2]
		33	[1,3]	[128,130]	2+1 ^{**)}	5642,95	171,85	23,24	2,49	[8,75;12,3]	[202,3;567,8]
„Banat II“	10	34	[1,4]	[131,134]	1+1	3418,4	168,12	11,65	2,31	[10,4;13,9]	[189,0;446,4]
		35	[1,3]	[135,137]	2+1 ^{*)}	5044,8	168,13	23,27	2,31	[8,9;11,8]	[186,8;432,5]
		36	[1,5]	[138,142]	2+2	6692	168,13	23,28	2,32	[6,08;10,6]	[82,4;428,1]
„Kadinjača“	11	37	[1,6]	[143,148]	3+3+3 ^{*)}	12169,7	243,36	30,65	2,06	[9,75;13,5]	[643,6;1676,2]
		38	[1,4]	[149,152]	3+3+3 ^{**)}	12169,7	243,36	30,65	2,06	[8,68;10,6]	[576,6;1080,4]

Tabela 4.2. Osnovne dimenzije ispitivanih sklopova sa izmerenim brzinama plovidbe u mirnoj vodi i snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača (Izvor: Čolić, 2006)

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$\left[\begin{matrix} k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}} \\ k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}} \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}} \\ k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}} \end{matrix} \right]$	Potiskivani sastav	$D_{mskl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (t)	$L_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$B_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$T_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$\left[\begin{matrix} v_{pl \min}^{(i_{pot}, i_{sast})} \\ v_{pl \max}^{(i_{pot}, i_{sast})} \end{matrix} \right]$ (km/h)	$\left[\begin{matrix} N_{vr \min}^{(i_{pot}, i_{sast})} \\ N_{vr \max}^{(i_{pot}, i_{sast})} \end{matrix} \right]$ (kW)
		39	[1,5]	[153,157]	2+2+2 *)	8337,39	235,29	20,43	2,08	[10,5;14,8]	[627,4;1691,6]
		40	[1,4]	[158,161]	2+2+2 **)	8337,39	235,29	20,43	2,08	[9,88;12,3]	[573,0;1090,0]
		41	[1,5]	[162,166]	2+2 *)	5788,59	168,29	20,44	2,08	[12,3;16,2]	[833,3;1917,4]
„Srem“	12	42	[1,4]	[167,170]	1+0	1940,4	97,09	11,65	2,47	[11,6;15,8]	[161,8;411,9]
		43	[1,4]	[171,174]	1+1	3717,6	168,12	11,65	2,49	[10,1;13,5]	[169,9;435,4]
		44	[1,4]	[175,178]	1+1+1	5466	239,12	11,65	2,49	[8,43;11,4]	[174,3;442,0]
„Kladovo“	13	45	[1,4]	[179,182]	3+3	7767,63	168,75	30,65	1,92	[8,8;14,22]	[403,1;1701,2]
„Truženik-1“	14	46	[1,3]	[183,185]	1+0	2121,9	88,93	10,96	2,63	[9,13;11,3]	[185,3;297,1]
		47	[1,3]	[186,188]	1+0	415,95	89,07	11	0,47	11,29	[183,9;297,9]
„Bor“	15	48	[1,5]	[189,193]	2+2	5769,44	165,31	20,43	2,16	[10,9;15,5]	[472,2;1112,8]

*) nesimetrični sastav **) simetrični sastav *) pri radu sva tri pogonska motora

**) pri radu samo levog i desnog pogonskog motora

U Tabeli 4.2 su prikazane osnovne dimenzije ispitivanih sklopova sa izmerenim brzinama plovidbe u mirnoj vodi i snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača. Brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi i snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača dobijene su merenjima na plovnom putu za različite režime rada glavnih pogonskih motora. Vrednosti snage su date od najmanje snage (za najniže opterećenje motora) do najveće snage (za najveće punjenje motora za trajni pogon). Brzine plovidbe u mirnoj vodi su takođe date za različite potiskivane sklopove i od najmanje (za najniže opterećenje motora) do najveće (za najveće punjenje motora za trajni pogon).

Kao što se vidi iz Tabele 4.2, postoje sastavi koji su identični, a koji su numerisani različitim brojevima. Ovo je urađeno zbog toga što su ti sastavi potiskivanih teretnjaka zajedno sa brodovima-potiskivačima činili različite potiskivane sklopove po osnovi simetričnosti sastava ili po osnovi različitosti u radu propelerskih vratila.

Najniža opterećenja i najveća punjenja motora su prikazana rednim brojevima od 1 do 6 u koloni „ $\left[k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}}, k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}} \right]$ “ Tabele 4.2 gde su:

$k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}}$ – Redni broj režima rada glavnog motora broda-potiskivača u sklopu vezanog za sastav potiskivanih teretnjaka (i_{pot}, i_{sast}) koji odgovara prvom rednom broju ispitivanja po redosledu ispitivanja režima rada motora

$k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}}$ – Redni broj režima rada glavnog motora broda-potiskivača u sklopu vezanog za sastav potiskivanih teretnjaka (i_{pot}, i_{sast}) koji odgovara poslednjem rednom

broju ispitivanja po redosledu ispitivanja režima rada motora

Redni brojevi merenja snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača koji su učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima kao deo potiskivanih sklopova predstavljani su pomoću intervala u koloni „ $[k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}}, k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}}]$ “ Tabele 4.2 gde su:

$k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}}$ – Redni broj merenja snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača u ukupnom broju merenja, koji se odnosi na prvo merenje snage u sklopu, odnosno, po redosledu ispitivanja režima rada motora

$k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}}$ – Redni broj merenja snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača u ukupnom broju merenja, koji se odnosi na poslednje merenje snage u sklopu, odnosno, po redosledu ispitivanja režima rada motora

Vrednosti za intervale $[k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}}, k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}}]$ su proračunate pomoću sledećeg obrasca:

$$[k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}}, k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}}] = \begin{cases} [k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}}, k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}}], & i_{pot} = 1, i_{sast} = 1 \\ [k_{i_{sast} - 1 \max}^{i_{pot} - 1} + k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}}, k_{i_{sast} - 1 \max}^{i_{pot} - 1} + k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}}], & (i_{pot} - 1, i_{sast} - 1) \in \rho, \\ & i_{pot} > 1, i_{sast} > 1 \\ & i_{pot} \in I_{pot} \wedge i_{sast} \in I_{sast} \end{cases} \quad (4.1)$$

gde je ρ relacija Dekartovog proizvoda skupova I_{pot} i I_{sast} koji se definiše na sledeći način:

$$I_{pot} \times I_{sast} = \{(i_{pot}, i_{sast}) | i_{pot} \in I_{pot} \wedge i_{sast} \in I_{sast}\} \quad (4.2)$$

I_{pot} predstavlja skup rednih brojeva potiskivača koji su učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima, dok I_{sast} predstavlja skup rednih brojeva sastava potiskivanih teretnjaka koji su bili vezani za brodove potiskivače u potiskivane sklopove tokom eksperimentalnih ispitivanja. Skupovi I_{pot} i I_{sast} su zadati pomoću sledećih pravila:

$$I_{pot} = \{i_{pot} \in \mathbb{N}: i_{pot} < 16\} \quad (4.3)$$

$$I_{sast} = \{i_{sast} \in \mathbb{N}: i_{sast} < 49\} \quad (4.4)$$

Relacijom ρ ($\rho \subset I_{pot} \times I_{sast}$) su definisani uređeni parovi brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka, odnosno njihove kombinacije koje su činile potiskivane sklopove, a koje su učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima kao potiskivani sklopovi. U ovoj disertaciji elementi relacije ρ , odnosno uređeni parovi brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka su sledeći:

$$\rho = \{(1,1), (2,2), (2,3), (2,4), (3,5), (3,6), (3,7), (3,8), (3,9), (4,10), (4,11), (5,12), (5,13), (5,14), (5,15), (5,16), (6,17), (6,18), (6,19), (7,20), (7,21), (8,22), (8,23), (8,24), (8,25),$$

(8,26), (8,27), (8,28), (9,29), (9,30), (9,31), (9,32), (9,33), (10,34), (10,35), (10,36), (11,37), (11,38), (11,39), (11,40), (11,41), (12,42), (12,43), (12,44), (13,45), (14,46), (14,47), (15,48)}

Da bi se lakše razumeli redni brojevi merenja snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača $(k_{i_{sast}}^{i_{pot}})$, potrebno je uvesti skupove rednih brojeva merenja snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Elementi ovih skupova su svi mogući redni brojevi merenja snage koji bi postojali da su eksperimentalna ispitivanja obavljena za sve kombinacije brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka iz Tabele 4.2 (i_{pot}, i_{sast}) i oni su definisani na intervalima $[k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}}, k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}}]$:

$$S_{(i_{pot}, i_{sast})} = \left\{ k_{i_{sast}}^{i_{pot}} \mid k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}} \leq k_{i_{sast}}^{i_{pot}} \leq k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}}, k_{i_{sast}}^{i_{pot}} \in \mathbb{N} \right\}, i_{pot} \in I_{pot}, i_{sast} \in I_{sast} \quad (4.5)$$

Iz izraza (4.5) se zaključuje da je broj skupova rednih brojeva $(S_{(i_{pot}, i_{sast})})$ jednak broju elemenata definisanog Dekartovog proizvoda skupova I_{pot} i I_{sast} , odnosno broju svih mogućih kombinacija brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka koji su učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima. Da bi se dobio celokupan skup rednih brojeva merenja $(S_{r'})$, odnosno ukupan broj od 193 mernih podatka sa eksperimentalnih ispitivanja potrebno je izvršiti uniju skupova $(S_{(i_{pot}, i_{sast})})$ čiji parovi (i_{pot}, i_{sast}) su elementi relacije ρ :

$$S_{r'} = \bigcup_{(i_{pot}, i_{sast}) \in \rho} S_{(i_{pot}, i_{sast})} \quad (4.6)$$

Ukoliko se zamene stvarne vrednosti iz Tabele 4.2 u izraze (4.5) i (4.6) dobiće se novoformirani celokupan skup rednih brojeva merenja koji je definisan kao

$$S_{r'} = \left\{ k' \mid k'_{\min\{I_{sast}\}}^{\min\{I_{pot}\}} \leq k' \leq k'_{\max\{I_{sast}\}}^{\max\{I_{pot}\}}, k' \in \mathbb{N} \right\} \quad (4.7)$$

gde su:

$$\left. \begin{aligned} k'_{\min\{I_{sast}\}}^{\min\{I_{pot}\}} &= 1, i_{pot} = \min\{I_{pot}\} = 1, i_{sast} = \min\{I_{sast}\} = 1 \\ k'_{\min\{I_{sast}\}}^{\max\{I_{pot}\}} &= r' = 193, i_{pot} = \max\{I_{pot}\} = 15, i_{sast} = \max\{I_{sast}\} = 48 \end{aligned} \right\}$$

čime izraz (4.7) može da se definiše na lakši način i postaje sledeći:

$$S_{r'} = \{k' \mid 1 \leq k' \leq r', k' \in \mathbb{N}\}, \text{ za } r' = 193 \quad (4.8)$$

Dužine potiskivanih sklopova su računane tako što su sabrane sve najveće dužine teretnjaka u nizu u sastavu i dužina potiskivača na konstrukcionoj vodnoj liniji. Ukoliko je sastav imao više redova potiskivanih teretnjaka, kao merodavna dužina sklopa se usvajala ona koja je bila brojno najveća od svih proračunatih po redovima. Širine

sastava su proračunate tako što su se sabirale širine na KVL za svaki red teretnjaka, a onda se usvajala najveća brojna vrednost. Eksploatacione nosivosti teretnjaka u sastavu nisu uvek bile jednake čime ni gaženja teretnjaka nisu bila jednaka. Gaženje sklopa je određeno tako što je izračunata aritmetička sredina svih gaženja teretnjaka u sastavu. Deplasman sklopa je dobijen sumiranjem deplasmana svih plovila u sklopu.

U Tabeli 4.3 su prikazane osnovne dimenzije ispitivanih sklopova, brzine plovidbe u mirnoj vodi i snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača sortirani po rednim brojevima merenja (k'). Sve vrednosti su dobijene na osnovu Tabele 4.2 i rada Čolića (2006).

Tabela 4.3. Osnovne dimenzije ispitivanih sklopova, brzine plovidbe u mirnoj vodi i snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača po rednom broju iz skupa rednih brojeva merenja (S_r)

k'	$D_{mskl}^{(k')}$ (t)	$L_{skl}^{(k')}$ (m)	$B_{skl}^{(k')}$ (m)	$T_{skl}^{(k')}$ (m)	$v_{pl}^{(k')}$ (km/h)	$N_{vr}^{(k')}$ (kW)
1	5265,899	182,4	20,4	2,02	7,58	199,7
2	5265,899	182,4	20,4	2,02	9,08	335,8
3	5265,899	182,4	20,4	2,02	9,65	427,5
4	5265,899	182,4	20,4	2,02	9,88	479,34
5	5265,899	182,4	20,4	2,02	10,05	527,3
6	5265,899	182,4	20,4	2,02	10,3	580,94
7	6264,65	168,17	20,46	2,3	9,5	381
8	6264,65	168,17	20,46	2,3	10	453
9	6264,65	168,17	20,46	2,3	10,5	541
10	6264,65	168,17	20,46	2,3	11	651
11	6264,65	168,17	20,46	2,3	11,5	808
12	9116,26	235,15	20,46	2,3	8	357
13	9116,26	235,15	20,46	2,3	8,5	439
14	9116,26	235,15	20,46	2,3	9	534
15	9116,26	235,15	20,46	2,3	9,5	664
16	9116,26	235,15	20,46	2,3	10	846
17	9116,26	168,17	30,68	2,3	8,5	423
18	9116,26	168,17	30,68	2,3	9	534
19	9116,26	168,17	30,68	2,3	9,5	673
20	9116,26	168,17	30,68	2,3	10	865
21	2088,391	92,04	15,2	2,2	14,6	625,5
22	3862,183	154,04	15,2	2,2	12,2	677,9
23	5635,974	154,04	22,8	2,2	7,6	400,3
24	5635,974	154,04	22,8	2,2	9,7	626,1
25	5635,974	154,04	22,8	2,2	10	692,4
26	5635,974	216,04	15,2	2,2	9,8	687,3
27	7409,765	154,04	30,4	2,2	8,7	702,1
28	1065,38	89,35	8,53	1,9	12,35	108,6

Tabela 4.3. Osnovne dimenzije ispitivanih sklopova, brzine plovidbe u mirnoj vodi i snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača po rednom broju iz skupa rednih brojeva merenja (S_r)

k'	$D_{mskl}^{(k')}$ (t)	$L_{skl}^{(k')}$ (m)	$B_{skl}^{(k')}$ (m)	$T_{skl}^{(k')}$ (m)	$v_{pl}^{(k')}$ (km/h)	$N_{vr}^{(k')}$ (kW)
29	1065,38	89,35	8,53	1,9	12,9	137,8
30	1065,38	89,35	8,53	1,9	13,7	180,2
31	2009,48	89,35	17,06	1,9	9,75	100,5
32	2009,48	89,35	17,06	1,9	10,35	124,3
33	2009,48	89,35	17,06	1,9	10,75	154
34	2009,48	89,35	17,06	1,9	11,25	171,7
35	2009,48	89,35	17,06	1,9	11,4	182,7
36	11933,32	195,03	32,97	2,4	8,8	358,5
37	11933,32	195,03	32,97	2,4	10	470,5
38	11933,32	195,03	32,97	2,4	11,7	787
39	11933,32	195,03	32,97	2,4	12,9	1049,6
40	11933,32	195,03	32,97	2,4	13,3	1237,7
41	8077,84	195,03	21,98	2,4	9,2	260,1
42	8077,84	195,03	21,98	2,4	10,7	371,7
43	8077,84	195,03	21,98	2,4	11,2	462,7
44	8077,84	195,03	21,98	2,4	13,4	799,6
45	8077,84	195,03	21,98	2,4	14,7	1026,2
46	8077,84	195,03	21,98	2,4	15,8	1310,4
47	6136,1	275,01	10,99	2,4	11,2	369,3
48	6136,1	275,01	10,99	2,4	12,1	474,4
49	6136,1	275,01	10,99	2,4	14,4	793,2
50	6136,1	275,01	10,99	2,4	15,9	1067,7
51	6136,1	275,01	10,99	2,4	16,7	1313,5
52	4219,5	115,01	21,98	2,4	15,6	1308,6
53	4224,2	195,01	10,99	2,4	11,6	266
54	4224,2	195,01	10,99	2,4	12	369,2
55	4224,2	195,01	10,99	2,4	14	453,1
56	4224,2	195,01	10,99	2,4	16,3	764
57	4224,2	195,01	10,99	2,4	17,4	982,7
58	4224,2	195,01	10,99	2,4	18,5	1301,9
59	5206,19	155,86	22,81	1,98	8,61	317,9
60	5206,19	155,86	22,81	1,98	9,28	436,4
61	5206,19	155,86	22,81	1,98	10,02	571,1
62	5206,19	155,86	22,81	1,98	11,1	818,8
63	5206,19	155,86	22,81	1,98	12,14	1101,1
64	6760,58	155,86	30,43	1,97	7,44	322,4
65	6760,58	155,86	30,43	1,97	8,13	415,8
66	6760,58	155,86	30,43	1,97	9,02	589,5
67	6760,58	155,86	30,43	1,97	9,79	769,8
68	6760,58	155,86	30,43	1,97	10,91	1086,6
69	7569,73	217,76	22,82	1,97	6,33	312,1
70	7569,73	217,76	22,82	1,97	7,1	426,1

Tabela 4.3. Osnovne dimenzije ispitivanih sklopova, brzine plovidbe u mirnoj vodi i snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača po rednom broju iz skupa rednih brojeva merenja (S_r)

k'	$D_{mskl}^{(k')}$ (t)	$L_{skl}^{(k')}$ (m)	$B_{skl}^{(k')}$ (m)	$T_{skl}^{(k')}$ (m)	$v_{pl}^{(k')}$ (km/h)	$N_{vr}^{(k')}$ (kW)
71	7569,73	217,76	22,82	1,97	7,88	573,3
72	7569,73	217,76	22,82	1,97	8,92	786,1
73	7569,73	217,76	22,82	1,97	10,05	1123,1
74	5515,4	154,93	22,86	2,15	8,66	339,3
75	5515,4	154,93	22,86	2,15	9,35	431,3
76	5515,4	154,93	22,86	2,15	10	527
77	5515,4	154,93	22,86	2,15	10,58	596,2
78	5515,4	154,93	22,86	2,15	10,76	672,7
79	7177,96	216,89	22,86	2,12	7,52	339,3
80	7177,96	216,89	22,86	2,12	8,06	421,7
81	7177,96	216,89	22,86	2,12	8,7	524,8
82	7177,96	216,89	22,86	2,12	9,21	624,1
83	7177,96	216,89	22,86	2,12	9,4	666,8
84	3888,95	171,88	11,63	2,47	10	300
85	3888,95	171,88	11,63	2,47	11,6	391
86	3888,95	171,88	11,63	2,47	15,3	651,2
87	3888,95	171,88	11,63	2,47	16,2	726,3
88	3888,95	100,93	23,24	2,47	9,3	291,4
89	3888,95	100,93	23,24	2,47	11,1	394,4
90	3888,95	100,93	23,24	2,47	13,1	521,6
91	3888,95	100,93	23,24	2,47	14,8	654,6
92	3888,95	100,93	23,24	2,47	15,3	699,3
93	5677,55	242,98	11,63	2,49	11,9	537
94	5677,55	242,98	11,63	2,49	13,5	679,8
95	5677,55	242,98	11,63	2,49	13,9	725,4
96	5677,55	171,95	23,24	2,49	11,4	216,4
97	5677,55	171,95	23,24	2,49	12,5	553
98	5677,55	171,95	23,24	2,49	13,1	497,3
99	5649,35	171,94	23,24	2,48	8,935	530,3
100	5649,35	171,94	23,24	2,48	12,107	661,6
101	5649,35	171,94	23,24	2,48	12,445	719,2
102	7436,75	171,97	23,26	2,49	7,2	291,7
103	7436,75	171,97	23,26	2,49	8,8	419,7
104	7436,75	171,97	23,26	2,49	10,2	555,5
105	7436,75	171,97	23,26	2,49	11,4	700,7
106	7436,75	171,97	23,26	2,49	11,6	721,3
107	7386,35	171,94	23,23	2,48	8,213	243
108	7386,35	171,94	23,23	2,48	9,313	347,5
109	7386,35	171,94	23,23	2,48	10,742	534,7
110	7386,35	171,94	23,23	2,48	10,829	516,2
111	7386,35	171,94	23,23	2,48	10,919	548,6
112	7383,95	171,95	23,26	2,49	7,85	315,3

Tabela 4.3. Osnovne dimenzije ispitivanih sklopova, brzine plovidbe u mirnoj vodi i snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača po rednom broju iz skupa rednih brojeva merenja (S_r)

k'	$D_{mskl}^{(k')}$ (t)	$L_{skl}^{(k')}$ (m)	$B_{skl}^{(k')}$ (m)	$T_{skl}^{(k')}$ (m)	$v_{pl}^{(k')}$ (km/h)	$N_{vr}^{(k')}$ (kW)
113	7383,95	171,95	23,26	2,49	8,92	399,1
114	7383,95	171,95	23,26	2,49	9,93	485,8
115	7383,95	171,95	23,26	2,49	10,8	582,7
116	7383,95	171,95	23,26	2,49	11,35	655
117	5624,75	100,91	34,82	2,49	10,12	371,5
118	5624,75	100,91	34,82	2,49	11,08	466,1
119	5624,75	100,91	34,82	2,49	11,45	597,1
120	5624,75	100,91	34,82	2,49	11,72	629,9
121	7376,95	171,85	23,24	2,46	7,2	207,1
122	7376,95	171,85	23,24	2,46	9,08	387
123	7376,95	171,85	23,24	2,46	9,97	518,1
124	7376,95	171,85	23,24	2,46	10,33	576,4
125	5642,95	171,85	23,24	2,49	8,42	203,4
126	5642,95	171,85	23,24	2,49	10,2	359,2
127	5642,95	171,85	23,24	2,49	11,65	202,5
128	5642,95	171,85	23,24	2,49	8,75	373,6
129	5642,95	171,85	23,24	2,49	10,87	558,5
130	5642,95	171,85	23,24	2,49	12,32	568,1
131	3418,4	168,12	11,65	2,31	10,48	189,3
132	3418,4	168,12	11,65	2,31	11,92	282,6
133	3418,4	168,12	11,65	2,31	13,27	389
134	3418,4	168,12	11,65	2,31	13,96	446,4
135	5044,8	168,13	23,27	2,31	8,9	186,5
136	5044,8	168,13	23,27	2,31	10,44	297,6
137	5044,8	168,13	23,27	2,31	11,8	432,6
138	6692	168,13	23,28	2,32	6,08	82,4
139	6692	168,13	23,28	2,32	7,67	160,1
140	6692	168,13	23,28	2,32	9,33	285,1
141	6692	168,13	23,28	2,32	10,12	363,7
142	6692	168,13	23,28	2,32	10,68	428,1
143	12169,7	243,36	30,65	2,06	9,75	643,8
144	12169,7	243,36	30,65	2,06	10,9	880
145	12169,7	243,36	30,65	2,06	12,2	1225,2
146	12169,7	243,36	30,65	2,06	13	1491,7
147	12169,7	243,36	30,65	2,06	13,45	1655,6
148	12169,7	243,36	30,65	2,06	13,55	1676,5
149	12169,7	243,36	30,65	2,06	8,68	576,7
150	12169,7	243,36	30,65	2,06	9,72	820,8
151	12169,7	243,36	30,65	2,06	10,35	991,8
152	12169,7	243,36	30,65	2,06	10,68	1080,2
153	8337,39	235,29	20,43	2,08	10,5	627,1
154	8337,39	235,29	20,43	2,08	11,64	858,1

Tabela 4.3. Osnovne dimenzije ispitivanih sklopova, brzine plovidbe u mirnoj vodi i snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača po rednom broju iz skupa rednih brojeva merenja (S_r)

k'	$D_{mskl}^{(k')}$ (t)	$L_{skl}^{(k')}$ (m)	$B_{skl}^{(k')}$ (m)	$T_{skl}^{(k')}$ (m)	$v_{pl}^{(k')}$ (km/h)	$N_{vr}^{(k')}$ (kW)
155	8337,39	235,29	20,43	2,08	13,11	1201,6
156	8337,39	235,29	20,43	2,08	13,94	1456,5
157	8337,39	235,29	20,43	2,08	14,8	1691,4
158	8337,39	235,29	20,43	2,08	9,88	572,8
159	8337,39	235,29	20,43	2,08	11,05	797,8
160	8337,39	235,29	20,43	2,08	11,82	973,4
161	8337,39	235,29	20,43	2,08	12,34	1090,1
162	5788,59	168,29	20,44	2,08	12,31	833,3
163	5788,59	168,29	20,44	2,08	13,7	1185,2
164	5788,59	168,29	20,44	2,08	14,68	1460
165	5788,59	168,29	20,44	2,08	15,52	1726,9
166	5788,59	168,29	20,44	2,08	16,18	1917,3
167	1940,4	97,09	11,65	2,47	11,65	161,6
168	1940,4	97,09	11,65	2,47	13,42	257,7
169	1940,4	97,09	11,65	2,47	15,32	379,6
170	1940,4	97,09	11,65	2,47	15,8	411,8
171	3717,6	168,12	11,65	2,49	10,1	169,9
172	3717,6	168,12	11,65	2,49	11,42	250,2
173	3717,6	168,12	11,65	2,49	13,14	393,1
174	3717,6	168,12	11,65	2,49	13,55	435,6
175	5466	239,12	11,65	2,49	8,43	174,2
176	5466	239,12	11,65	2,49	9,4	249,2
177	5466	239,12	11,65	2,49	11,08	415,7
178	5466	239,12	11,65	2,49	11,4	442,2
179	7767,63	168,75	30,65	1,92	8,8	402,7
180	7767,63	168,75	30,65	1,92	11,21	824,8
181	7767,63	168,75	30,65	1,92	13,76	1534,9
182	7767,63	168,75	30,65	1,92	14,22	1700,9
183	2121,9	88,93	10,96	2,63	9,13	185
184	2121,9	88,93	10,96	2,63	10,33	246
185	2121,9	88,93	10,96	2,63	11,3	297
186	415,95	89,07	11	0,47	11,29	184
187	415,95	89,07	11	0,47	12,81	244
188	415,95	89,07	11	0,47	14,11	298
189	5769,44	165,31	20,43	2,16	10,95	472,5
190	5769,44	165,31	20,43	2,16	12,23	580
191	5769,44	165,31	20,43	2,16	13,72	740,1
192	5769,44	165,31	20,43	2,16	15,32	1035,7
193	5769,44	165,31	20,43	2,16	15,56	1112,8

Ova ispitivanja daju stvarnu sliku brodova-potiskivača o njihovim mogućnostima u redovnoj eksploataciji, a to je najvažnije sa stanovišta iskorišćenja brodova-potiskivača u pružanju prevozne usluge.

5. Načini merenja brzine plovidbe, brzine rečnog toka i snage na propelerskim vratilima broda

U ovom poglavlju prikazaće se načini eksperimentalnih ispitivanja primenjeni za merenje brzina plovidbe (v_{pt} , v_t), merenje snage propelerskih vratila (N_{vr}) i broja obrtaja propelerskih vratila (n_{vr}). Ove veličine su merodavne za određivanje ulaznih i izlaznih podataka i za obučavanje veštačkih neuronskih mreža.

5.1. Merenje brzine rečnog toka i brzine broda u odnosu na vodu

5.1.1. Hidrometrijsko krilo

U svim ispitivanjima čiji su rezultati korišćeni u ovoj disertaciji merenje brzine rečnog toka i brzine broda u odnosu na vodu vršeno je hidrometrijskom krilom.

Pomoću hidrometrijskog krila brzina strujanja vode se meri tako što je krilo postavljeno na pramac broda koji se kreće.

Glavni delovi hidrometrijskog krila su:

1. propeler, određenog profila za razne opsege brzina;
2. glava krila, na koju se postavlja propeler.

U glavi krila postoji zupčasti prenos tako podešen da za svakih 20 obrtaja propelera u toku 10 obrtaja daje kontakt, a u sledećih 10 obrtaja prekida kontakt. Iz glave polaze 2 kabla koji su povezani sa kutijom koja se nalazi na palubi broda. U kutiji je smeštena zujalica i sijalica sa odgovarajućim baterijama. Za sve vreme obrtanja propelera u toku onih 10 obrtaja kada se ostvaruje kontakt iz kutije se čuje zujanje i svetli sijalica.

Radi boljeg položaja samog krila u vodi, u toku merenja, na glavu krila pričvršćuje se tzv. „rep“, a isto tako sa donje strane se okači teg hidrodinamičkog

oblika. U zavisnosti od očekivane brzine pri merenju može „rep“ i da se produži, a i tegovi su različitih masa (za veće brzine duži „rep“ i teži teg). Hidrometrijsko krilo uronjava se u vodu i pri merenjima u toku plovidbe ono visi na čeličnom užetu.

Hidrometrijsko krilo se na brodu postavlja bočno (u ispitivanjima potiskivanih sastava na pramcu prvog reda potisnica). Tokom merenja krilo je uronjeno na dubinu od oko jednog metra. Posebnim držačima istura se za oko 4 metra preko bočne ivice potisnice tako da se merenje vrši u relativno neuznemirenoj vodi i bez uticaja pramčanih talasa i deplasmanskog potiskivanja vode.

Za stacionarna merenja (merenje brzine rečnog toka – krilo je nepokretno u odnosu na obalu) hidrometrijsko krilo se pričvršćuje za odgovarajući držač i ne opterećuje se tegom.

Postupak merenja se sastoji od brojanja signala za određeno vreme ili merenjem dužine vremena za određeni broj signala.

Pomoću ovih podataka brzina vode se obračunava pomoću posebnih formula koje su različite za razne tipove propelera i u zavisnosti od upotrebljenog tega.

Primer laboratorijskog merenja brzine rečnog toka (strujanja vode)

Na reci Savi (od 14 km do 15 km) pri dovoljnoj dubini i širini plovnog puta izvršeno je merenje brzine rečnog toka. Hidrometrijsko krilo se nalazilo na laboratorijskom brodu – hidrobusu „Negotin“, koji je pripadao Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Brzina strujanja vode određena hidrometrijskim krilom jednaka je:

$$\Delta v = 0,225 \cdot n_{vrhm} + 0,012 \text{ [m/s]} \quad (5.1)$$

gde je:

$$n_{vrhm} = \frac{n_{20}}{t} \text{ [ob/s]} \quad (5.2)$$

gde su:

n_{20} – 20 obrtaja propelera × određen broj ciklusa zujanja (broj signala), (ob)

t – vreme za koje se ostvari veličina n_{20} , (s)

Merenja su pokazala sledeće:

300 obrtaja propelera se učini za 15 ciklusa zujanja (broja signala) u vremenu $t = 182,7$ sekundi. Dakle, $n_{20} = 300$ obrtaja.

$$n_{vrhm} = \frac{300}{182,7} = 1,60 \text{ ob/s}$$

Brzina rečnog toka (brzina strujanja vode) jednaka je (jednačina 5.1):

$$\Delta v = 0,225 \cdot 1,60 + 0,012 = 0,42 \text{ m/s} = 1,512 \text{ km/h}$$

U Tabeli 5.1 prikazan je pregled merenja brzine rečnog toka hidrometrijskim krilom.

Tabela 5.1. Pregled merenja brzine rečnog toka hidrometrijskim krilom (reka Sava, km 14÷15)

Redni broj	Broj signala	Vreme [s]	Brzina Δv	
			m/s	km/h
1	15	187,2	0,42	1,512
2	10	120,0	0,438	1,578
3	10	120,0	0,427	1,538
4	10	120,1	0,43	1,560
5	10	125,7	0,482	1,675
6	10	129,7	0,419	1,510

Primer laboratorijskog merenja brzine plovidbe broda u odnosu na vodu

Na istoj deonici reke Save, pri dovoljnoj dubini i širini plovnog puta, izvršeno je merenje brzine plovidbe broda u odnosu na vodu laboratorijskog broda „Negotin“.

Osnovne osobenosti broda „Negotin“ su:

Dužina na KVL	.....	$L_{KVL} = 25,07 \text{ m}$
Širina na KVL	.....	$B_{KVL} = 4,75 \text{ m}$
Najveće konstrukciono gaženje	.....	$T_{KM} = 0,85 \text{ m}$
Gaženje za vreme ispitivanja (srednje)	.....	$T = 0,90 \text{ m}$
Konstrukciona (bočna) visina trupa	.....	$H_K = 2,05 \text{ m}$
Koeficijent punoće istisnine	.....	$\delta = 0,386$
Istisnina	.....	$V = 39,00 \text{ m}^3$
Snaga pogonskih motora	.....	$N_{inst} = 2 \times 85 = 170 \text{ KS (125 kW)}$

Sređeni rezultati merenja brzine plovidbe broda u odnosu na vodu prikazani su u

Tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Pregled brzina plovidbe u odnosu na vodu hidrobusa „Negotin“ merene hidrometrijskim krilom (reka Sava km 14÷15)

Redni broj	n_{20} (ob)	Vreme, t (s)	n_{vrhm} (ob/s)	Brzina, Δv	
				(m/s)	(km/h)
1	200	10,4	19,2	4,908	17,6688
2	200	10,8	18,4	4,704	16,9342
3	200	10,5	19,1	4,8825	17,677
4	200	10,6	18,8	4,806	17,3016
5	200	10,5	19,1	4,8825	17,677

5.1.2. Elektronski uređaj za merenje brzine rečnog toka (strujanja vode), odnosno brzine plovidbe broda u odnosu na vodu

Elektronski način merenja brzine rečnog toka koji poseduje Laboratorija za ispitivanje brodova i plovnih puteva Odseka za vodni saobraćaj Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu, može se ostvariti putem mernog uređaja tipa „Garmin“. Ovaj uređaj se sastoji iz sledećih elemenata:

- osnovne jedinice (GPS prijemnika),
- antenskog sistema i
- priključnog senzora za merenje brzine rečnog toka.

GPS prijemnik prima signale od senzora za merenje brzine i direktno na svom ekranu ili monitoru računara prikazuje vrednosti posmatranih brzina u jedinicama km/h. Pored ovog podatka mogu se na ekranu očitati i druge informacije od važnosti kao što su: vreme i datum očitavanja podataka, geografske koordinate (pozicija broda) itd.

Antenski sistem se sastoji od GPS antene koja treba da se ugradi na način koji obezbeđuje neometan prijem signala sa satelita. Povezivanje GPS prijemnika i antenskog uređaja ostvaruje se preko kablovske veze.

Senzor za merenje brzine rečnog toka je posebno montiran kao spoljašnji, nezavisni uređaj GPS prijemnika i mora biti pravilno uronjen u vodu. To znači da se ovaj senzor postavlja na dubinu koja je potrebna da bi se, u zavisnosti od vrste merenja dobili ispravni podaci. Povezivanje GPS prijemnika i senzora za merenje brzine, kao i kod antenskog sistema, vrši se putem odgovarajuće kablovske veze.

Pomoću senzora za merenje brzine, brzina rečnog toka se meri kada se senzor instalira na plovilo koje stoji u mestu, dok se brzina plovidbe u odnosu na vodu meri dok se plovilo kreće. Glavni delovi senzora za merenje brzina su:

1. propeler za merenje širokog opsega brzina;
2. glava senzora na koji se montira jedan mali propeler;
3. pomoćni delovi za montažu sa kablovskom vezom.

Senzor automatski putem kablovske veze šalje impulse u GPS prijemnik, gde se oni pretvaraju i na digitalnom ekranu prikazuju u konačnom obliku očitavanja (km/h).

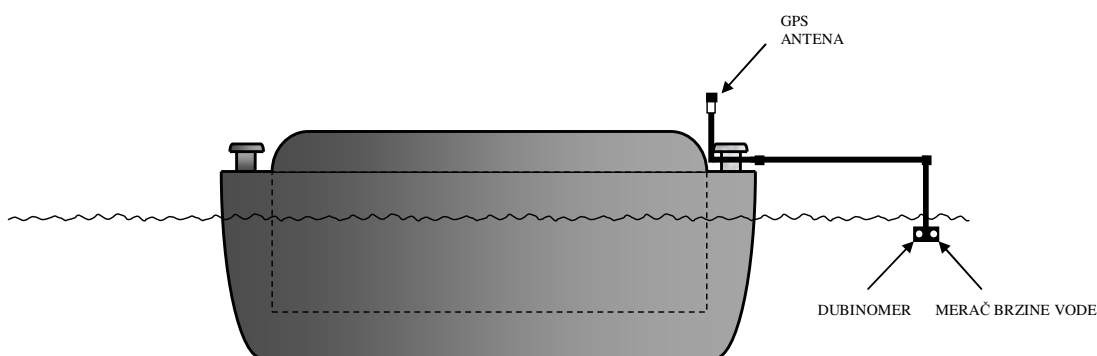
Dobar položaj senzora za merenje brzine u vodi obezbeđuje se putem fiksne veze – sistema cevi čvrsto vezanih za bitvu plovila. Sistem cevi se sastoji iz horizontalne i fiksno spojene vertikalne cevi. Horizontalna cev se vezuje za bitvu

plovila, dok se senzor montira na kraju vertikalne cevi i zaronjen je u vodu na željenoj dubini.

Senzor se na brodu postavlja bočno (u ispitivanjima sastava potiskivanih teretnjaka na pramcu prvog reda potisnica). Tokom merenja, kao i kod hidrometrijskog krila, senzor je putem fiksnih veza uronjen u vodu, a isturen preko ivice potiskivanog teretnjaka na dovoljnoj daljini kako bi se izbegao uticaj turbulencije vode.

Kompletan sistem i uređaji za merenje (GPS prijemnik plus senzor za merenje brzine rečnog toka) prikazan je na Slici 5.1 i koristi se u dva slučaja:

- a. za merenje brzine rečnog toka (strujanja vode) i
- b. za merenje brzine plovidbe broda u odnosu na vodu.



Slika 5.1. Sistem merenja brzine plovidbe u odnosu na vodu pomoću elektronskih merača

Dobijeni podaci izvršenih merenja pomoću navedenog mernog uređaja mogu se koristiti na tri načina:

- direktnim očitavanjem podataka sa ekrana GPS prijemnika na mernoj stazi,
- prenosom memorisanih podataka za naknadno korišćenje,
- direktnim očitavanjem podataka na PC računaru.

Prvi način omogućava trenutnu dostupnost dobijenih podataka, dok drugi način omogućava da se po izvršenim merenjima na plovnom putu, povezivanjem uređaja za merenje brzine rečnog toka odnosno brzine plovidbe broda u odnosu na vodu sa PC računaru ili „NoteBook“ računaru izvrši prenos izmerenih vrednosti (podataka), čime bi se automatski obezbedila mogućnost njihove dalje primene i korišćenja.

Treći način, takođe, omogućava direktno povezivanje uređaja na brodu sa PC računaru ili „NoteBook“ računaru koji se može nalaziti na drugoj lokaciji (komandnom mostu i sl.). Ovim se omogućava operativno praćenje merenja, njihova

kontrola i usaglašavanje sa podacima drugih, pratećih ispitivanja koja se mogu obavljati (merenje brzine u odnosu na obalu, merenje snage i sl.).

5.1.2.1 Merenje brzine rečnog toka

Merenje brzine rečnog toka, odnosno strujanja vode obavlja se u trenutku kada brod miruje, tako da na propeler senzora za merenje brzine vode deluju samo strujanja rečnog toka. Na ekranu GPS prijemnika očitavaju se sledeće vrednosti:

- Brzina rečnog toka (strujanja vode) u km/h;
- Datum i vreme merenja brzine rečnog toka;
- Geografske koordinate (pozicije antene) sektora plovnog puta na kome se vrši merenje.

5.1.2.2 Merenje brzine plovidbe broda u odnosu na vodu

Merenje brzine plovidbe broda u odnosu na vodu mora se obavljati na sektorima plovnog puta dovoljne dubine i širine. Princip merenja je isti kao i kod merenja brzina rečnog toka s tom razlikom što se u ovom slučaju brod kreće. Na ekranu GPS prijemnika očitavaju se sledeće vrednosti:

- Brzina plovidbe broda u odnosu na vodu u km/h;
- Datum i vreme merenja brzine plovidbe broda u odnosu na vodu;
- Geografske koordinate (pozicije antene) sektora plovnog puta na kome se vrši merenje,
- Kurs kretanja broda i
- Brzina plovidbe broda u odnosu na obalu

Na osnovu poznate brzine rečnog strujanja i brzine plovidbe u odnosu na vodu može se vrlo jednostavno (primenom osnovnih matematičkih operacija sabiranja i oduzimanja) izračunati brzina plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}).

5.1.2.3 Mogućnost očitavanja podataka sa ekrana PC računara

Pre nego što se krene sa radom, moraju se u potpunosti upoznati mogućnosti uređaja koji se koristi. Funkcije prijemnika i prateće opreme definišu koje metode rada mogu da se primene na terenu.

Osobine GPS prijemnika direktno uslovljavaju dobijanje potrebnih parametara merenja. Svaki GPS prijemnik podržava NMEA³⁶ (National Marine Electronics Association) protokol, tako da treba pronaći poruke koje nose specifične informacije navedenih izlaznih podataka.

NMEA protokol je ASCII protokol koji pokriva široki opseg navigacionih podataka. Celokupan protokol sadrži oko 50 poruka, ali samo deo od ovih sekvenci se primenjuje na senzor za merenje brzine. Struktura NMEA sekvence je prikazana u narednom tekstu.

Sekvenca : \$IDMSG,D1,D2,D3,D4, ,Dn*CS [CR] [LF]

gde su:

- \$ Označava početak sekvence
 - ID Identifikacija uređaja je dvoslovnna memorijska sekvenca koja objašnjava izvor navigacione poruke. Na primer GP oznaka označava da je izvor GPS uređaj
 - MSG Troslovnna memorijska sekvenca koja objašnjava sadržaj sekvence i broj i redosled polja podataka.
 - „” Zarezi služe kao početak ili kraj polja podataka.
 - Dn Svaka sekvenca sadrži višestruka polja podataka koja su razdvojena zarezima.
 - „*” Karakter „*” (asterisk) služi kao kontrolni razgraničavač
 - CS Kontrolno polje sadrži dva ASCII karaktera koji ukazuju na brojni sistem kontrole
- [CR][LF] „carriage return“ i „line feed“ kombinacija prekida ili okončava sekvencu

NMEA sekvence variraju u dužini, ali svaka sekvenca je ograničena na 79 karaktera ili manje. Ovo ograničenje u dužini ne obuhvata karakter \$ i [CR][LF]. Blok polja podataka, uključujući i razgraničavače je ograničen na 74 karaktera ili manje.

Od NMEA sekvenci u kojima se može očitati brzina strujanja vode izdvaja se VHW linija. VHW linija uključuje kompasni kurs kojem brod teži i brzinu broda u odnosu na vodu. U Tabeli 5.3 su dati podaci koje daje ova poruka.

³⁶ Protokol koji je razvijen za potrebe pomorstva. NMEA podaci idu kao izlaz u ASCII formatu rečenica.

Tabela 5.3. Pregled informacija koje izdaje VHW linija

Polje	Opis poruke: §SD VHW, x. x, T, x. x, M, x. x, N, x. x, K*hh <CR><LF>
D1	Kurs u stepenima
D2	T – true, znači da je pravi kurs
D3	Kurs u stepenima
D4	M – magnetic, magnetni kurs
D5	Brzina strujanja vode
D6	N – knots, čvorovi
D7	Brzina strujanja vode
D8	K – kilometer, kilometri na čas
hh	kontrola

5.2. Merenje brzine plovidbe broda u odnosu na obalu (tehnička brzina)

5.2.1. Merenje brzine na mernom kilometru

Brzina plovidbe svih potiskivanih sklopova (pregled ispitivanja dat je u Tabeli 4.2) u odnosu na obalu određivana je merenjem dužine vremena prolaska između kilometarskih stubova na obali, pri uzvodnoj i nizvodnoj plovidbi.

Primer laboratorijskog merenja brzine plovidbe broda u odnosu na obalu (tehničke brzine), v_t

Merenje je izvršeno na reci Savi (km 14÷15), pri dovoljnoj dubini i širini plovnog puta, sa laboratorijskim brodom „Negotin“.

Rezultati ispitivanja prikazani su u Tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Pregled merenja brzine plovidbe u odnosu na obalu, v_b , hidrobusa „Negotin“ (reka Sava km 14÷15)

Redni broj	Broj obrtaja motora	Vreme plovidbe		Tehničke brzine plovidbe		Brzina plovidbe u mirnoj vodi, v_{pl} [km/h]	Brzina rečnog toka, Δv [km/h]
		uzvodno $\uparrow t$	nizvodno $\downarrow t$	uzvodno $\uparrow v_t$	nizvodno $\downarrow v_t$		
		[ob/min]	[s]	[s]	[km/h]			[km/h]
1	1625	232,15	187,1	15,5	19,2	17,35	1,85
2	1350	283,0	210,0	12,7	17,1	14,9	2,2
3	1150	330,0	240,5	10,9	14,9	12,9	2,0
4	1000	348,0	263,0	10,3	13,7	12,0	1,7

Napomena: brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) se se proračunavaju na osnovu izraza 3.4, dok se brzine rečnog toka (Δv) proračunavaju na osnovu izraza 3.1.

5.2.2. Merenje brzine globalnim pozicionim sistemom (GPS)

Merenje brzine plovidbe broda u odnosu na obalu (tehničke brzine broda) izvodi se pomoću globalnog pozicionog sistema (u daljem tekstu GPS). Uređaji koji mere brzinu kretanja broda nazivaju se GPS prijemnici (videti poglavlje 5.1.2). GPS prijemnici primaju signale sa satelita i na osnovu njih određuju tehničku brzinu broda. Ove informacije mogu da se čitaju sa samog prijemnika, ukoliko poseduje radni ekran i sa ekrana računara, ukoliko se GPS prijemnik poveže sa računarem.

Uređaji za merenje tehničke brzine broda, koje poseduje Laboratorija za ispitivanje brodova i plovnih puteva Odseka za vodni saobraćaj Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu su tipa „Garmin“ i „Trimble“. Ovi uređaji se sastoje iz:

- osnovne jedinice (prijemnika globalnog pozicionog sistema – GPS) i
- antenskog sistema.

Dok *GPS prijemnik* tipa Garmin prima signale od senzora za merenje brzine i direktno na svom ekranu prikazuje vrednosti posmatranih brzina u jedinicama km/h, prijemnik tipa Trimble ne poseduje radni ekran i koristi se isključivo uz PC računar. Pored ovog podatka na ekranu Garmin uređaja se mogu očitati i druge informacije od važnosti kao što su: vreme i datum očitavanja podataka, geografske koordinate (pozicija) itd. Osnovna NMEA sekvenca iz koje se može pratiti tehnička brzina broda data je u Tabeli 5.5.

Tabela 5.5. RMC poruka i njeni parametri

Polje #	Opis poruke: \$GP RMC, hhmmss.s,A, llll.lll, a, yyyyyy.yyy, a, x.x, x.x, xxxxxx, x.x, a*hh<CR><LF>
D1	UTC pozicije.
D2	Status: A = Validan, V = upozorenje prijemniku
D3,D4	Geografska širina, N (sever) ili S (jug)
D5,D6	Geografska dužina, E (istok) ili W (zapad).
D7	Brzina preko zemlje (SOG) u čvorovima
D8	Kurs preko zemlje u pravim stepenima
D9	datum: dd/mm/yy
D10,D11	Magnetna varijacija u stepenima, E = istok / W= zapad
hh	provera

Kada je GPS uređaj povezan na kompjuter podaci koji sa njega dolaze izgledaju na sledeći način (poruke VHW i RMC):

\$\$SDVHW, 287.2, T, 283.8, M, 1.3, N, 2.3, E*52 <CR><LF>
\$GPRMC, 180648.0, A, 4445.930, N, 02027.981, E, 7.4, 199.8, 240107, 02.1, E*5
2<CR><LF>

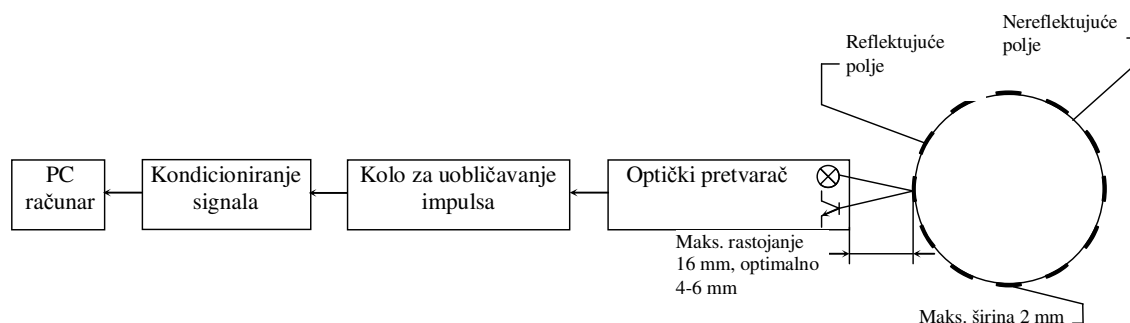
5.3. Merenje broja obrtaja propellerskih vratila

Merenje broja obrtaja na propellerskim vratilima za sva ispitivanja potiskivanih sklopova prikazanih u Tabeli 4.2. vršena su elektronskim brojačem obrtaja sa fotoćelijama.

Princip rada je da postoji jedan instrument sa sijalicom i fotoćelijom. Sijalica baca usmereni snop svetlosti na vratilo od koga se svetlost odbija i prihvata je fotoćelija.

Svaka promena intenziteta svetlosti izaziva električne impulse preko fotoćelije. Da bi se to ostvarilo neophodno je da se jedan deo površine vratila naizmenično oboji crno i belo. Impulsi koje šalje fotoćelija mogu se koristiti na dva instrumenta. Kod jednog brojača direktno se vrši merenje broja obrtaja i ukoliko se to sprovede u određenom vremenu (npr. 1 minut) na ekranu se tačno pokazuje broj obrtaja. Drugi instrument ima skalu sa kazaljkom pomoću koje se očitava srednji broj obrtaja za 1 minut. Oba instrumenta su podešena za merenje širokog opsega broja obrtaja.

Današnji sistemi su dosta slični pomenutom elektronskom brojaču obrtaja. U Studiji o ispitivanju snage, obrtnih momenata i torzionih vibracija na propellerskim vratilu plovnog samohodnog bagera refulera „SAVA III“ korišćen je podsistem za merenje ugaone brzine (ob/min) obrtaja propellerskih vratila koji se sastojao od optičkog pretvarača, USB akvizicione kartice i PC računara na kome se izvršavala aplikacija. Na Slici 5.2 predstavljena je blok šema podsistema za merenje ugaone brzine (Kostić i dr., 2013).



Slika 5.2. Blok dijagram sistema za merenje ugaone brzine propellerskih vratila

Optički pretvarač se sastojao iz 24 reflektujuća elementa na traci namotanoj oko vratila, optičkog pretvarača i kola za uobličavanje impulsa. Optički pretvarač je emitovao svetlost koja se po odbijanju sa trake prihvatila pomoću opto-tranzistora i pretvarala u naponske impulse. Naponski impulsi su se uobličavali korišćenjem kola za uobličavanje impulsa i nakon kondicioniranja dovodila na akvizicioni modul koji je bio povezan sa PC računarom.

Merenje ugaone brzine vratila vršilo se brojanjem uzlaznih ivica povorke pravougaonih impulsa i usrednjavanjem na vremenskom intervalu od 1000 ms. Ugaona brzina je bila računata pomoću sledećeg izraza:

$$w_{vr}(kT) = \frac{N_{impvr}(kT) \cdot 2\pi}{N \cdot \Delta T} \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) \quad (5.3)$$

gde su $N_{impvr}(kT)$ – broj impulsa brojača, ΔT – period očitavanja, N – broj reflektujućih elemenata trake i kT – ekvidistantna vremena dobijena dodavanjem vremenskog priraštaja $\Delta T = 1000 \text{ mS}$ ($kT = (k - 1)T + \Delta T$).

5.4. Merenje snage na propelerskom vratilu

Brodsko motorno postrojenje predstavlja vitalni deo svakog broda. Njegov zadatak je da pruža odgovarajuću propulziju i omogućuje siguran i pouzdan rad broda tokom eksploatacije. On se projektuje prema željenoj brzini broda, obliku trupa broda i gazu broda. Karakteristična mesta na kojima se meri snaga pri određenim režimima rada broda su: glavni motor, propelersko vratilo i propeler (Kreculj i Čolić, 1996). Ovo proizilazi iz činjenice da je na jednom kraju vratila motor – generator obrtnog momenta dok je na drugom kraju propeler koji ovaj moment prevodi u silu (Simić, 2012). Snaga koja se meri na propelerskom vratilu dobija se istovremenim merenjem obrtnog momenta na propelerskom vratilu (M_o) i broja obrtaja propelerskog vratila (n_{vr}), a računa se prema sledećem izrazu

$$N_{vr} = 2 \cdot \pi \cdot n_{vr} \cdot M_o \quad (5.4)$$

Merenja snage na propelerskim vratilima izvode se pomoću torziometra i pomoću merne trake.

5.4.1. Torziometarsko merenje snage

Ovom metodom vršena su merenja prilikom ispitivanja potiskivanih sklopova prikazanih u Tabeli 4.2. Torziometar služi za određivanje snage na vratilu kojim se pogoni propulzor (propeler) – na propelerskom vratilu.

Princip rada se zasniva na određivanju ugla uvijanja vratila kada se prenosi obrtni moment. Ukoliko je poznat materijal od koga je izrađeno vratilo, ugao uvijanja vratila srazmeran je obrtnom momentu koje vratilo donosi. Snaga dobijena pomoću torziometra ne predstavlja snagu samog motora, već snagu koja se troši za rad propulzora.

Torziometar se sastoji od dva osnovna dela: na vratilu se postavlja davač koji daje impulse, a njih prihvata prijemnik. Osnovni delovi davača su: prstenasti umetci; obujmice i otpremnici.

Pre rada neophodno je da se vratilo na mestu gde će se vršiti merenje očisti i potom izmeri njegov prečnik sa tačnošću ± 1 mm. Prema ovom prečniku izrađuju se sa istom tačnošću i prstenasti umetci. Oni se postavljaju u obujmice i zajedno pričvrste na vratilo. Na svako vratilo se postavljaju po dve obujmice na određenom međusobnom odstojanju. Između obujmica stavljaju se otpremnici. Preko otpremnika i obujmica postavljaju se klizni prestenovi za koje se privezuju električni kablovi otpremnika. Preko kliznih prestenova postavljaju se četkice za dalje otpremanje impulsa. Četkice se nalaze na svom držaču koji se pričvršćuje za trup broda.

Drugi deo ili prijemnik prihvata impulse koje šalju otpremnici u samom prijemniku. Postoji oscilator koji proizvodi oscilacije prema potrebi i želji. Ove oscilacije se prikazuju na katodnoj cevi kao horizontalne oscilacije. Impulsi koji stižu u prijemnik od otpremnika, pojavljuju se na katodnoj cevi kao vertikalne oscilacije. Pri radu se ove dve vrste oscilacija na ekranu katodne cevi ocrtavaju kao mreža. Pomoću posebnog uređaja za podešavanje mogu se oscilacije oscilografa u prijemniku uskladiti sa oscilacijama koje šalju otpremnici pri čemu se na ekranu katodne cevi pojavljuju tzv. Lisažu-ove krive. Kada se ustali zatvorena kriva približno kružnog oblika smatra se da su oscilacije usklađene i tada se očitavaju vrednosti na skali. Ove vrednosti predstavljaju osnov za proračun snage na vratilu.

Kada vratilo prenosi snagu na jednom paru prestenova jedan otpremnik izložen je istezanju, a drugi pritisku, a pod dejstvom uvijanja vratila. Svaki otpremnik šalje

određene impulse koji odgovaraju njegovim unutrašnjim oscilacijama. Ukoliko je otpremnik izložen naprezanju na istezanje ili pritisak, oscilacije se menjaju, a njihova promena srazmerna je naprezanju, odnosno obrtnom momentu koje vratilo prenosi.

S obzirom da su obujmice sa prstenovima postavljene na određeno rastojanje (const.) i uvijanje vratila na tom odstojanju biće srazmerno obrtnom momentu. Pri merenju snage posebno se usklađuju oscilacije i sa jednog i sa drugog otpremnika. Merenje se vrši nekoliko puta pa se uzima srednja vrednost očitavanja. Pošto svaki otpremnik ima svoje sopstvene unutrašnje oscilacije, to je pre merenja obavezno određivanje tzv. nultih tačaka, koje se, pak podešavaju pomoću jednog malog ekscentra na određene preporučene vrednosti. Određivanje nultih tačaka mora da se obavi u mirnoj vodi i kada vratilo nije opterećeno. Isto tako i prijemnik treba da se reguliše na određenu početnu vrednost što se postiže pomoću jedne ugrađene vibracione ljske koja u ovom slučaju daje određene oscilacije umesto otpremnika.

Osnov za proračun snage na propelerskim vratilima je odnos između obrtnog momenta i ugla uvijanja za poznat modul klizanja, polarni moment inercije i odstojanje između prstenova. Obrtni moment (M_o) jednak je:

$$M_o = \varphi_v \cdot \frac{G \cdot J_P}{L_{pr}}; \quad (5.5)$$

gde su:

- φ_v – ugao uvijanja propelerskog vratila (rad)
- G – modul klizanja u zavisnosti od materijala vratila, (kg/cm^2)
- J_P – polarni moment inercije na mestu propelerskog vratila gde se vrši merenje, (cm^4)
- L_{pr} – razmak između prstenova, (cm)

Za proračun je neophodno i odstojanje od ose vratila do otpremnika, vrednost koja je konstantana i data za svaki par obujmica. Proračunavanje osnovnih konstanti pojedinih otpremnika vrši se na sledeći način:

- R_{otp} – uzima se prema podacima fabrika proizvođača (odstupanje otpremnika od ose vratila),
- L_{pr} – uzima se prema podacima fabrika proizvođača (razmak između prstenova, (cm)
- C_1 i C_2 – konstante otpremnika koje su date za svaki otpremnik

$$J_P = \frac{\pi}{32} \cdot D^4 \quad (5.6)$$

gde je: D – spoljni prečnik propelerskog vratila (cm)

$$\text{Proračunski koeficijent} = \frac{1}{71620};$$

Na osnovu ovih podataka izračunava se konstanta:

$$K = \frac{G \cdot J_P}{R_{otp} \cdot L_{pr} \cdot 71620} \quad (5.7)$$

a zatim se određuju konstante pojedinih otpremnika:

$$K_1 = K \cdot C_1 \quad (5.8)$$

$$K_2 = K \cdot C_2 \quad (5.9)$$

Određivanje nultih tačaka otpremnika vrši se na sledeći način. Za svaki smer obrtaja uzima se po 8 merenja s tim što se očitavanja vrše za svakih 90° obrtanja vratila. Vratilo, pri tome, mora da se pokreće ručno bez uključivanja motora. Na osnovu ovih očitavanja uzima se srednja vrednost za svaki smer obrtaja kao nulta tačka za kasniji proračun. Preporučljivo je da se ovo određivanje nultih tačaka obavi i posle merenja, kako bi se ustanovilo da li postoje neke bitne razlike. Ukoliko se pojave razlike u istom smeru, merenje se može prihvatiti kao dovoljno tačno.

Uporedo sa očitavanjem na skali za otpremnik br. 1 i 2 (za jedno vratilo) mora da se meri i broj obrtaja. Što je više očitavanja to je i rezultat merenja tačniji, jer se za proračun usvajaju srednje vrednosti. Konačni obračun snage na vratilu (N_{vr}) izražava se po obrascu:

$$N_{vr} = \frac{1}{2} \cdot (\Delta S_{kt_1} \cdot K_1 + \Delta S_{kt_2} \cdot K_2) \cdot n_{vr} \quad (5.10)$$

gde su:

ΔS_{kt_1} i ΔS_{kt_2} – razlika očitavanja nulte tačke i tačke pri merenju

n_{vr} – broj obrtaja propelerskog vratila, (ob/min)

Primer laboratorijskog torziometarskog merenja snage na desnom propelerskom vratilu dat je u magistarskom radu (Radonjić, 2007) i udžbeniku (Čolić, 2010).

5.4.2. Merenja momenta i snage na propellerskim vratilima pomoću merne trake

Za merenje momenta propellerskog vratila primenjuju se senzori naprezanja (*eng. strain gauge*), tzv. merne trake. Ovi senzori funkcionišu po principu promene otpornosti merne trake usled naprezanja površine osovine propellerskog vratila pri primenjenom pogonskom momentu. S obzirom da se osovina okreće, a sa njom i senzori postavljeni na osovinu, potrebno je odrediti sledeće veličine: napajanje (pobuda) mernog mosta i prenos mernog signala sa osovine ka mernim instrumentima. Da bi se odredile pomenute veličine koristi se sistem za telemetrijsko merenje momenta.

Merna traka je element koji se sastoji od četiri otpornika koji su međusobno povezani u Vitstonov most (Simić, 2012 i Kostić i dr., 2013). Vitstonov most se formira od preciznih otporničkih mernih traka zalepljenih specijalnim adhezionim lepkom na glatku i čistu površinu osovine pod uglovima $\pm 45^\circ$ u odnosu na liniju osnog preseka. Merni most se pobuđuje jednosmernim naponom. Ukoliko na osovinu nije primenjen torzioni moment, izlazni napon mosta je jednak nuli, dok se u slučaju deformacije površine osovine na izlazu mosta dobija napon U_A , srazmeran naponu napajanja mosta i intenzitetu torzionog momenta.

Rezultujući električni otpor merne trake proporcionalan je deformaciji (Hoffman, 1989 i Simić, 2012) i on se računa pomoću sledećeg izraza

$$\Delta R_{el} = \varepsilon \cdot R_{el\text{or}} \cdot \kappa \quad (\Omega) \quad (5.11)$$

gde su:

ΔR_{el} – promena električnog otpora merne trake usled deformacije (Ω)

$R_{el\text{or}}$ – deklarisan otpor merne trake (propisuje proizvođač) (Ω)

κ – faktor merne trake (propisuje proizvođač)

Tokom plovidbe broda, snaga i vibracije glavnog motora se prenose na propellersko vratilo. Usled obrtnog momenta koji se javlja na propellerskom vratilu dolazi do uvijanja vratila. Ovim uvijanjem se stvara deformacija na površini vratila. Ako je merna traka prethodno zalepljena na neopterećeno propellersko vratilo, tokom plovidbe je moguće pratiti svaku deformaciju na površini vratila. Ova deformacija utiče na mernu traku tako što dolazi do promene izlaznog napona merne trake pri čemu se stvara promena električnog otpora merne trake usled deformacije (ΔR_{el}). Na osnovu promene električnog otpora merne trake može se odrediti računski stepen uvijanja vratila, a zatim i moment koji je doveo do deformacije (Simić, 2012).

Naponski signal debalansa merne trake U_A se pojačava izrazom $U_M = A \cdot U_A$, zatim se vrši njegova PCM (Impulsna kodna modulacija) konverzija da bi se ovako kodicioniran signal induktivno preneo do nepokretne prijemne jedinice, a zatim ponovo transformisao u izlazni naponski signal, proporcionalan momentu uvijanja.

Veza između intenziteta merenog momenta i izlaznog napona data je sledećim izrazom:

$$M_t = \frac{U_M}{U_C} \cdot \varepsilon_c \cdot G \cdot S_p \quad (\text{kNm}) \quad (5.12)$$

gde su:

U_M – izlazni izmereni napon (V),

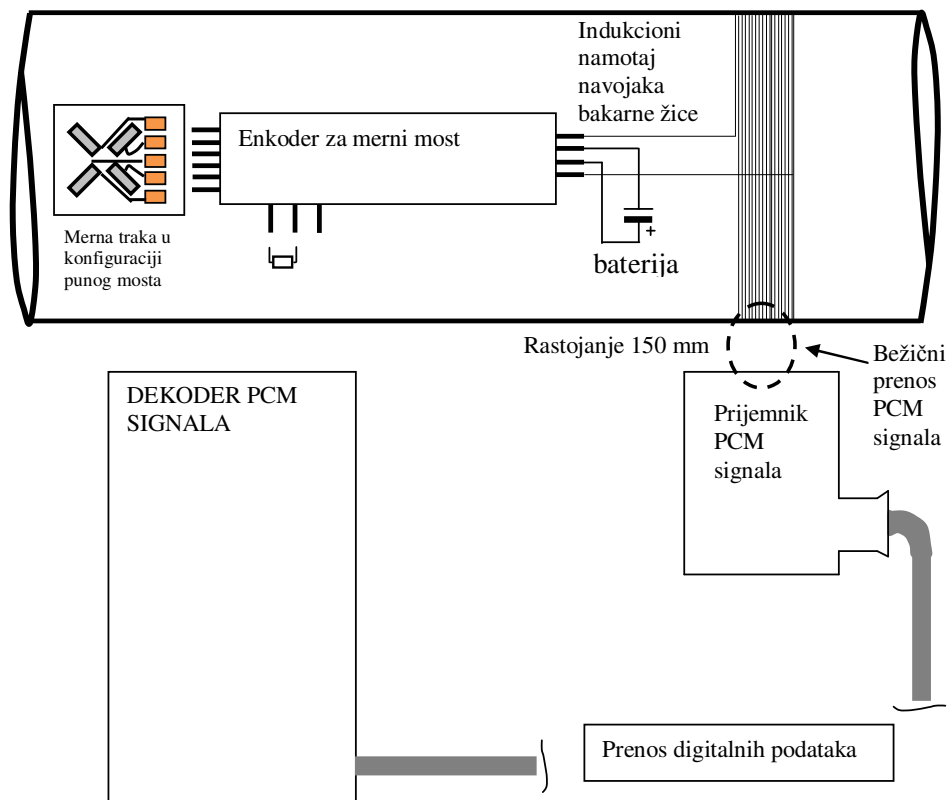
U_C – napon na instrumentu izmeren pri kalibraciji (V),

ε_c – mikrodeformacija koja odgovara optičkoj kalibraciji (m/m),

G – modul klizanja za materijal osovine (kN/mm²),

S_p – polarni otporni moment površine.

Prikaz kompletnog sistema za telemetrijsko merenje momenta dat je na Slici 5.3.



Slika 5.3. Prikaz kompletnog sistema za telemetrijsko merenje momenta

6. Predlog modela veštačkih neuronskih mreža za proračun snage motornih potiskivača

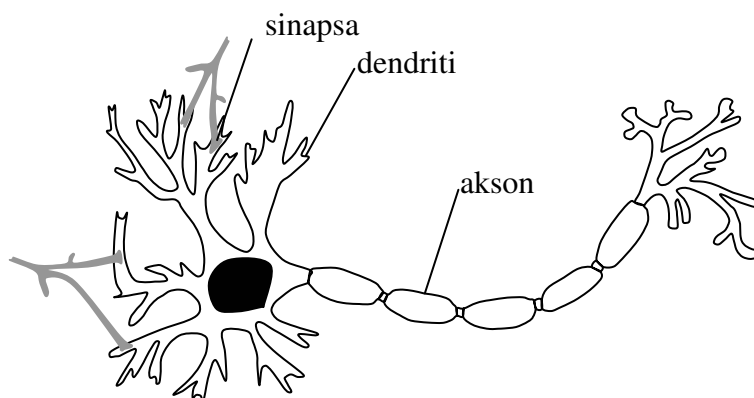
Veštačke neuronske mreže (VNM) spadaju u red matematičkih pronalazaka dobijenih proučavanjem bioloških neuronskih mreža kao što je nervni sistem živih bića. One su slične biološkim neuronskim mrežama po strukturi, funkciji i obradi informacija. Svrha veštačkih neuronskih mreža je da preslikaju ulazne veličine u željene izlazne veličine što je analogno matematičkoj funkciji. One su sastavljene od elemenata koji funkcionišu na način koji se pronalazi u biološkim sistemima. Elementi su organizovani na način sličan anatomiji nervnog sistema živog bića gde su neuroni povezani tako da signali putuju do različitih delova tela. Ipak, način obrade podataka u veštačkoj neuronskoj mreži veoma pojednostavljuje rad nervnih sistema živih bića (Vukadinović, 1997).

Uprkos iznetim sličnostima i razlikama između veštačkih i bioloških neuronskih mreža, veštačke neuronske mreže su sposobne da oponašaju govor, prepoznaju različite oblike kao što su npr. elektronske slike (Giacinto i Roli, 2001) i uče iz ograničenog skupa podataka. Danas ne postoji niko ko zna tačno kako ljudski mozak radi ili šta se dešava u nervnom sistemu čoveka u svakom trenutku vremena. Međutim, naučnici i doktori medicine su otkrili unutrašnje procese i rad mozga i nervnog sistema do nivoa koji im dozvoljava da kompletno opišu rad osnovnog računskog bloka nervnog sistema – biološkog neurona.

6.1. Neuron

Telo svakog živog organizma je sastavljeno od različitih tipova ćelija. Ćelije su grupisane u tkiva i komuniciraju na različite načine među sobom. Ćelije čija je uloga da nas stalno obaveštavaju o spoljnom svetu zovu se nervne ili živčane ćelije (u daljem tekstu samo neuroni). Postoje četiri vrste neurona. Jedna vrsta prima iz spoljnog sveta

poruke kao što su toplo, hladno, bol, dodir, svetlo itd. i sprovodi ih u mozak. Druga vrsta obrazuje motorne neurone i prenosi podsticaje iz moždanih centara u različite delove tela. Treća vrsta obavlja posao povezivanja: povezuje motorne i senzitivne ćelije. Četvrta vrsta neurona ima zadatak da poruku ili nadražaj iz spoljnog sveta prenesu u mozak u obliku kakvom su ga preuzele. Mozak čoveka sadrži 10^{11} neurona koji međusobno komuniciraju i organizovani su u obliku neuronske mreže (Vukadinović, 1997). Na Slici 6.1 prikazana je struktura neurona.



Slika 6.1. Struktura biološkog neurona

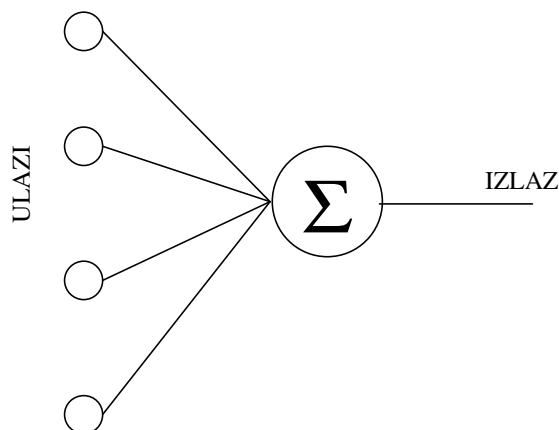
Svaki neuron se sastoji od tela sa koga polaze dve vrste nastavaka: dendriti i akson. Dendritima se šalju ulazne informacije u neuron kojima se vrši nadražaj tela neurona. Nadražaj se dalje sprovodi do sledećeg neurona putem aksona. Mesto gde se obavlja komunikacija između dva neurona se naziva sinapsa. To znači da je mesto gde se akson dodiruje sa dendritima neke druge ćelije upravo sinapsa. Sinapse još služe da se informacije prenesu drugim ćelijama koje nisu nervne. Na sinapsama postoje mesta slanja signala (akson) i mesta gde se taj signal prepoznaje (dendriti). Ove veze se nazivaju sinaptičke. Učenje se obavlja tako što se regulišu sinaptičke veze. Akumulirane informacije tokom učenja čuvaju se u sinapsama u obliku koncentrisane hemijske supstance. Ljudski mozak može da uči i uopštava stečeno znanje.

Veza između neke telesne ćelije i spoljne okoline se ostvaruje preko dendrita. Ove veze i samo stanje neurona dovode do porasta ili smanjenja potencijala neurona. Neuron ima sposobnost nadražljivosti. Nadražljivost je sposobnost neurona da na određeni nadražaj odreaguje promenom svog membranskog potencijala. Kada je neuron u stanju mirovanja taj membranski potencijal se naziva potencijal mirovanja. Nadražajem membrane neurona prvo dolazi do depolarizacije koja kada pređe određeni

prag pravi akcioni potencijal koji se dalje prenosi preko aksona do sinapsi i ostalih neurona. Akcioni potencijal se prenosi bez opadanja što znači da je uvek iste amplitude i trajanja. Što je depolarizacija veća to će se više akcionih potencijala slati za isto vreme.

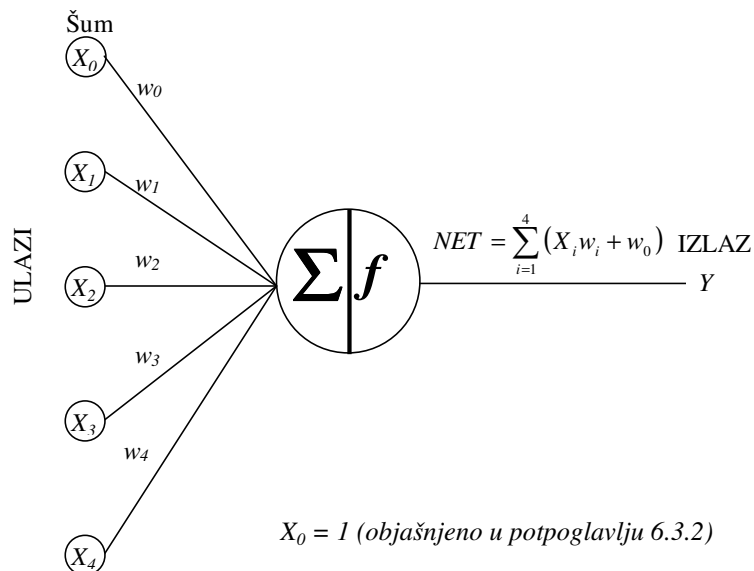
Dakle, glavni koncept se sastoji u tome da neuroni primaju ulazne signale neurona, a zatim šalju izlazne signale neuronima i ćelijama uz određenu brzinu slanja signala (Priddy i Keller, 2005).

Ovakav koncept se koristi i kod veštačkih neuronskih mreža. Na Slici 6.2 je prikazan jednostavan model veštačkog neurona sa četiri ulaza i jednim izlazom koji predstavlja kopiju biološkog neurona.



Slika 6.2. Struktura veštačkog neurona sa 4 ulaza i jednim izlazom

Sa Slike 6.2 se vidi da četiri neurona šalju ulazne signale ka jednom neuronu iz kojeg proističe jedan izlazni signal. Modeliranje akcionog potencijala se vrši preko aktivacione funkcije koja „oponaša” akcioni potencijal neurona. Modeliranje svih mogućih ulaznih signala sa Slike 6.2 vrši se uz pretpostavku da pojedini ulazni signali imaju veću važnost prilikom depolarizacije neurona sa jednim izlaznim signalom, dok ostali imaju manju važnost. Da bi se ocenila važnost svakog ulaznog signala potrebno je dodeliti veće ili manje težine ulaznim signalima (w_1, w_2, \dots). Svaka težina, odnosno jačina povezanosti neurona odgovara intenzitetu biološke sinaptičke veze. Izlazni signal je jednak ponderisanom zbiru ulaznih signala (NET). Sada, izlazni signal postaje ulazni signal ka nekom sledećem neuronu. Jasno je da sadašnji izlazni signal može imati veću ili manju vrednost. Mogućnost primanja i obrade takvog signala vrši se transformacijom signala pomoću aktivacione funkcije (f). Na taj način se može reći da je neuron procesni element koji prima signale, obrađuje ih, a zatim šalje jedan izlazni signal. Jedan ovakav procesni element je prikazan na Slici 6.3.



Slika 6.3. Veštački neuron (procesni element) sa težinama povezanosti neurona i aktivacionom funkcijom

Vrednost izlaznog signala (Y) jednaka je (Teodorović i Šelmić, 2012)

$$Y = f(NE\!T) = f\left(\sum_{i=1}^4 (X_i w_i + w_0)\right) \quad (6.1)$$

Izrazom (6.1) nije definisana aktivaciona funkcija (f). Aktivacione funkcije mogu biti različite (videti Sliku 6.4), a najčešće su sigmoidna (logistička kriva i hiperbolički tangens), odskočna (Hevisajdova i signum) i linearna (funkcija identiteta i linearna funkcija praga). Najčešće korišćenja aktivaciona funkcija je logistička kriva, dok je prva proučavana aktivaciona funkcija bila Hevisajdova ili jedinična odskočna (neuron sa ovom aktivacionom funkcijom je poznat kao McCulloch – Pitts model (McCulloch i Pitts, 1943).

Najčešće korišćena aktivaciona funkcija, logistička kriva (koja odgovara Slici 6.3) data je sledećim izrazom:

$$f(X_1, X_2, X_3, X_4) = \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_{i=1}^4 X_i w_i + w_0\right)}} \quad (6.2)$$

gde su:

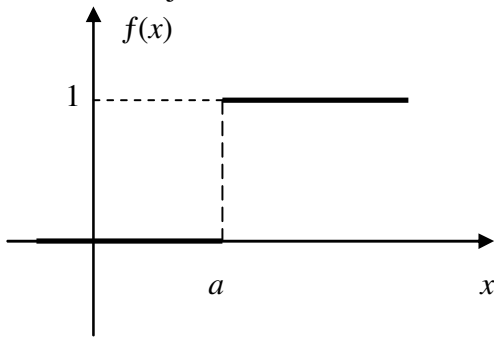
i – broj ulaza u neuron

X_i – ulazni signali ($i = 1, 2, 3, 4$)

w_i – jačina povezanosti neurona (težine grana) ($i = 1, 2, 3, 4$)

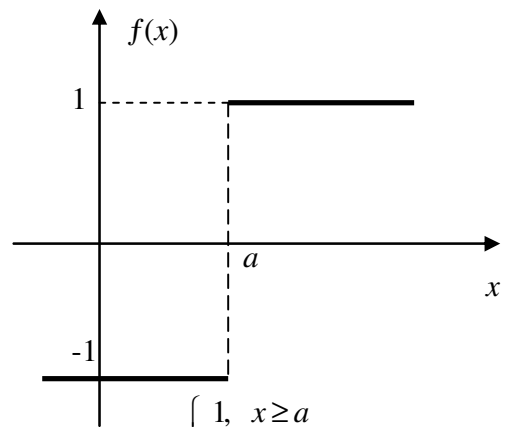
w_0 – šum (videti potpoglavlje 6.3.2)

a) Odskočna funkcija



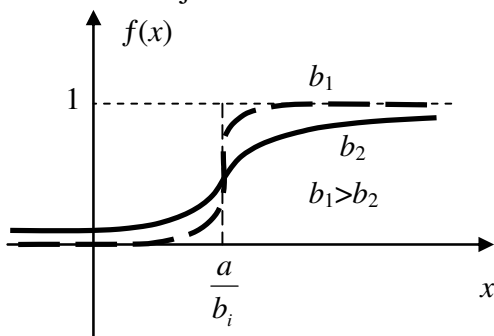
$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq a \\ 0, & x < a \end{cases}$$

$$a \in \mathfrak{R}$$



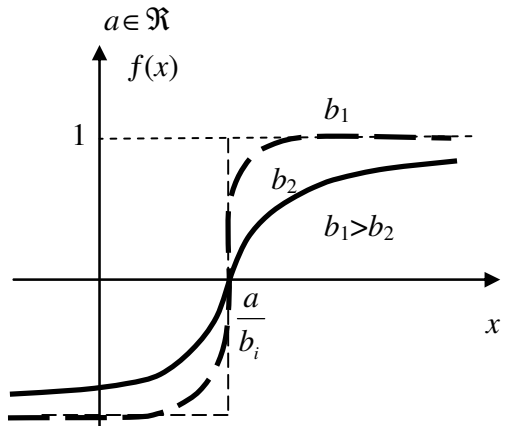
$$f(x) = \begin{cases} 1, & x > a \\ 0, & x = a \\ -1, & x < a \end{cases}$$

b) Sigmoidna funkcija



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

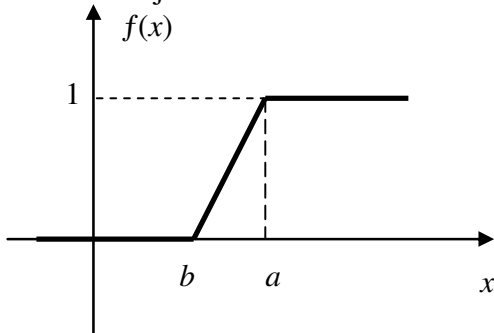
$$a, b_i \in \mathfrak{R}$$



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

$$a, b_i \in \mathfrak{R}$$

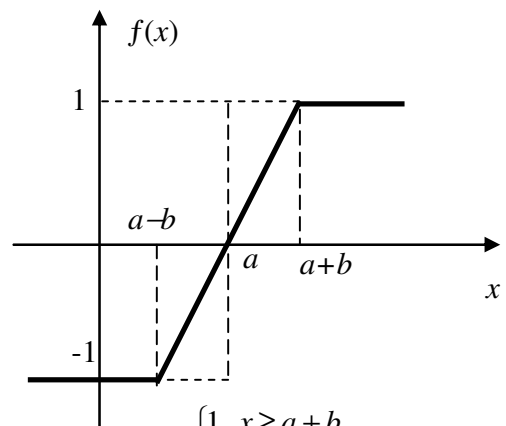
c) Linearna funkcija



$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq a \\ \frac{x-b}{a-b}, & b > x > a \\ 0, & x \leq b \end{cases}$$

$$a, b \in \mathfrak{R}$$

b – parametar nagiba



$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq a+b \\ \frac{x-a}{b}, & a-b > x > a+b \\ 0, & x \leq a-b \end{cases}$$

$$a, b \in \mathfrak{R}$$

Slika 6.4. Tri različita tipa aktivacionih funkcija – odskočna, sigmoidna i linearna

Povezivanjem neurona u slojeve dobija se sistem sastavljen od više procesnih elemenata. Procesni elementi se koriste za jednostavnu obradu informacija tj. svaki od njih poseduje lokalnu memoriju u kojoj pamti podatke i obrađuje ih. Sistem sastavljen od više procesnih elemenata (veštačka neuronska mreža) biće u stanju da prikuplja, memoriše i vrši komplikovanu obradu informacija. Procesni elementi su povezani u VNM određenim kanalima kojima se razmenjuju podaci.

6.2. Glavne osobine veštačkih neuronskih mreža

Kao što je izneto u prethodnom poglavlju, VNM se sastoji od više procesnih elemenata koji komuniciraju između sebe tako što šalju signale jedni drugima preko velikog broja grana (videti Sliku 6.3). Prema Rumelhart i Mekliland (1986) VNM karakterišu:

- Skup procesnih elemenata (čvorovi, neuroni)
- Prag aktivacije svakog čvora koji je jednak izlaznoj vrednosti iz čvora
- Povezanost između čvorova. Svaka povezanost je definisana težinom grane koja povezuje dva čvora i koja određuje efekat koji ima ulaz i na čvor
- Pravilo prostiranja signala kroz VNM kojim se određuje efikasan ulaz signala
- Aktivaciona funkcija čvorova kojom se određuje prag aktivacije na osnovu skupa ulaznih signala i trenutnog proračuna vrednosti izlaza
- Šum za svaku jedinicu
- Algoritam obučavanja
- Okruženje u kome VNM funkcioniše.

Čvorovi primaju ulazne vrednosti od susednih čvorova ili spoljnih izvora, zatim računaju i šalju izlazne vrednosti (svaki čvor po jedan) ka ostalim čvorovima na putu ka izlazu. Tokom ove obrade signala nesmetano se podešavaju težine grana VNM. Paralelno sa proračunom izlazne vrednosti iz jednog čvora odvija se proračun izlaznih vrednosti kod svih ostalih čvorova. U okviru VNM postoje tri tipa čvorova: ulazni (koji su obeleženi indeksom i na Slici 6.3), izlazni i skriveni. Ulazni čvorovi primaju podatke od spoljnih izvora, tj. izvora koji se nalaze izvan VNM. Izlazni čvorovi šalju izlazne vrednosti iz VNM, dok skriveni čvorovi ulazne i izlazne vrednosti zadržavaju u okviru date VNM. Obzirom da se obučavanje VNM vrši sa ciljem da se izvrši komplikovana obrada informacija i da su u njima, po završetku obučavanja, sačuvane težine grana

VNM (intenziteti povezanosti čvorova), to su ulazne i izlazne vrednosti skrivenih čvorova od malog značaja i gotovo nikada se ne prikazuju.

Povezanost između čvorova može biti različita: potpuna ili parcijalna. Parcijalna povezanost podrazumeva VNM sa više slojeva kod koje su svi čvorovi prethodnog sloja povezani sa svim čvorovima narednog sloja. Od ostalih povezanosti čvorova mogu se sresti VNM kod kojih su izlazne veličine nezavisne jedna od druge za zajedničke ulaze ili VNM kod kojih su slojevi čvorova povezani sa svim čvorovima iz svih prethodnih slojeva (a ne samo sa prvim prethodnim slojem). Povezanost čvorova može biti rezultat pravila koja se primenjuju za obučavanje VNM. Najčešće veća povezanost daje bolje izlazne rezultate, ali je i vreme obučavanja VNM duže. Povezanost čvorova i njihovo specifično uređenje predstavlja arhitekturu ili topologiju VNM.

Svaka ulazna veličina doprinosi aktivaciji čvora u koji ulazi. Težine grana između čvorova (w_i) imaju negativne i pozitivne vrednosti. Pozitivne vrednosti povećavaju prag nadražljivosti čvora (neurona) dok negativne vrednosti smanjuju prag. Izlazna vrednost iz čvora predstavlja ponderisani zbir ulaznih vrednosti propušten kroz aktivacionu funkciju (videti izraz 6.1).

Svaka VNM u potpunosti je određena kada se jednom odredi struktura mreže, aktivaciona funkcija svakog čvora i algoritam obučavanja (Vukadinović, 1997).

6.3. Topologija (arhitektura) veštačkih neuronskih mreža

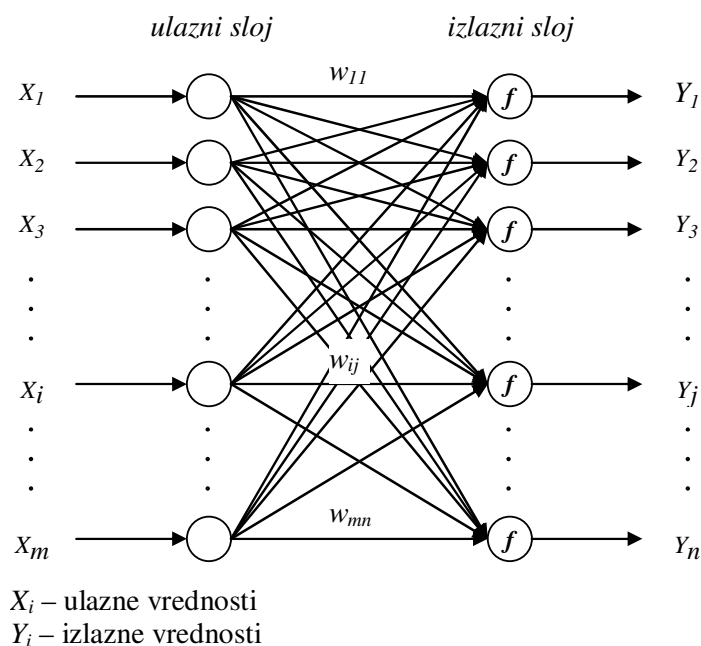
Topologija³⁷ (u daljem tekstu arhitektura) VNM predstavlja načine, vrste i strukture povezivanja mrežnih elemenata u razne topološke mape. Topološke grane u slučaju VNM su grane između čvorova sa svojim težinama. Topološki čvorovi su čvorovi VNM.

Postoji veliki broj različitih arhitektura VNM, te samim tim i veliki broj podela. Klasifikacija se najčešće određuje prema *broju slojeva, vrsti veza između čvorova, vrsti obučavanja VNM, prema smeru prostiranja signala i prema vrsti podataka koji se obrađuju*.

Prema broju slojeva, VNM se mogu podeliti na *jednoslojne i višeslojne*. Danas su u upotrebi, uglavnom, višeslojne VNM koje, osim ulaznog i izlaznog sloja poseduju i

³⁷ Topologija (ili viša geometrija) je matematička disciplina koja proučava suštinske geometrijske osobine prostora

jedan ili više skrivenih slojeva. Najpoznatija VNM sa jednim slojem je *perceptron* i prikazana je na Slici 6.5.



Slika 6.5. Perceptron sa prostiranjem signala unapred

Prema vrsti veza između čvorova, VNM se mogu podeliti na *slojevite, potpuno povezane i celularne*. Kod slojevitih VNM čvorovi su raspoređeni tako da prave slojeve. Povezanost čvorova kod ovakvih mreža može biti po principu da se na ulaz jednog čvora dovode izlazi svih čvorova prethodnog sloja ili da se ostvaruje parcijalna povezanost izlaza čvorova prethodnog sloja sa čvorom narednog sloja. Čvorovi ulaznog sloja imaju samo po jedan ulaz, dok čvorovi izlaznog sloja predstavljaju izlaze mreže. Kod potpuno povezanih VNM izlaz jednog čvora vodi ka svim ostalim čvorovima u mreži. Kod celularnih VNM međusobno su povezani samo susjedni čvorovi.

Obučavanje VNM se vrši na tri načina: *obučavanje sa učiteljem, prinudno obučavanje i samoobučavanje*.

Kod obučavanja sa učiteljem algoritam koji nadzire obučavanje upoređuje podatke na izlazu sa očekivanim podacima. Razlika između vrednosti podataka se šalje proceduri za obučavanje koja menja težine grana u VNM. Tipični predstavnici su algoritam povratnog prostiranja³⁸ (*eng. backpropagation algorithm*) objašnjen u radu autora Bryson i Ho (1969) i algoritam obučavanja perceptrona objašnjen u radu Rosenblatt (1958).

³⁸ Najpopularniji metod za učenje višeslojnih mreža. Prvi put je izmišljen 1969. godine ali je bio dugo zanemaran sve do polovine 1980-tih.

Prinudno obučavanje se odvija po principu samostalnog učenja i povremenog dobijanja kritike (nagrađivanjem ili kažnjavanjem) prethodnog rada. Za date ulazne vrednosti u VNM određuju se izlazne vrednosti. Dok su te izlazne vrednosti „odgovarajuće“ u VNM se ne pravi nikakva promena. Međutim, kada izlazne vrednosti postanu „neodgovarajuće“ VNM treba da promeni ponašanje dok izlazna vrednost ne postane „odgovarajuća“.

Samoobučavanjem mreža je nezavisna u učenju. Ovakav algoritam obučavanja napravio je Kohonen (1982).

Prema smeru prostiranja signala VNM se mogu podeliti na: *VNM sa prostiranjem signala unapred* i *VNM sa povratnom spregom*.

VNM sa prostiranjem signala unapred (nerekurzivne, nerekurzivne ili nepovratne – *eng. feedforward*) vrše prostiranje (propagaciju) signala samo u jednom smeru i to od ulaza prema izlazu. Naredni slojevi čvorova ne vraćaju informacije u prethodne slojeve. Obučavanje se vrši algoritmom povratnog prostiranja.

Kod VNM sa povratnom spregom (rekurzivnih, rekurentnih ili povratnih – *eng. feedback*) postoji povezanost izlaznih sa ulaznim čvorovima i naredni slojevi vraćaju informacije u prethodne slojeve ili u isti sloj. Tipični predstavnici ovih VNM su Hopfieldove mreže i Kohonenove mreže.

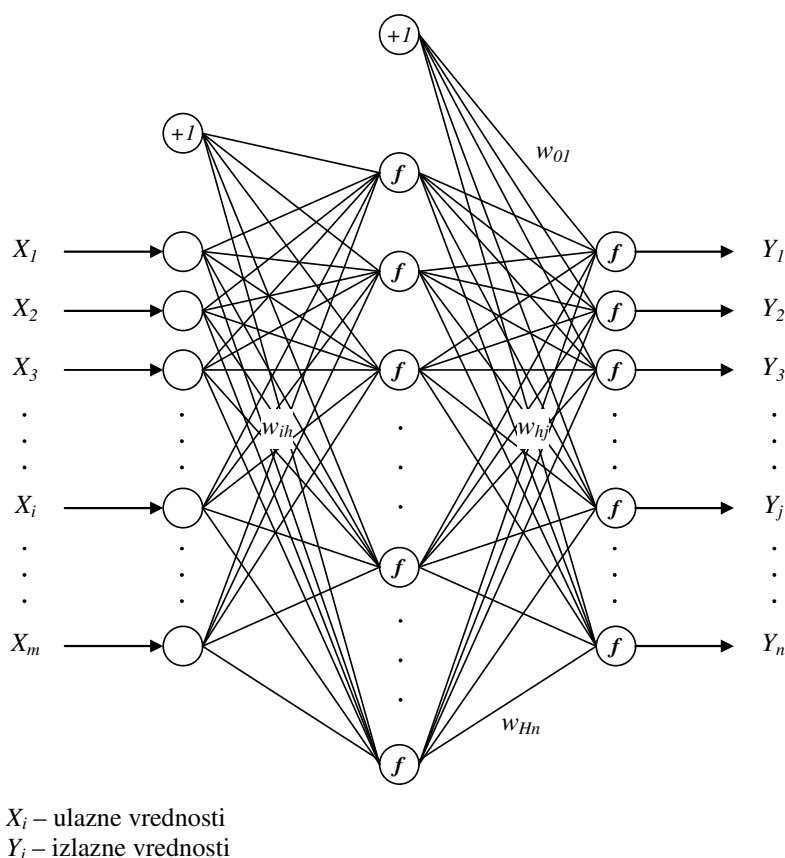
Prema vrsti podataka koje obrađuju VNM se mogu podeliti na *analogne* i *diskretne*.

VNM se mogu obučiti za izračunavanje svake izračunljive funkcije. One mogu uraditi sve što može računar da uradi. Razlika je u tome što se informacije čuvaju u radnoj memoriji računara, dok su u neuronskim mrežama sačuvane težine grana pomoću kojih se potrebne informacije proizvode (proračunavaju). Međutim, u stvarnosti, VNM najbolje rezultate daju kod problema koji imaju dosta dostupnih podataka za trening, tamo gde se neočekuje stopostotna tačnost izlaznih podataka ili kod problema koji zahtevaju brzu primenu odgovarajućeg pravila.

6.3.1. Veštačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unapred

Kod VNM sa prostiranjem signala unapred svaki sloj prima ulaze iz prethodnog sloja, a svoje izlaze šalje narednom sloju. Prvi sloj se naziva ulazni, poslednji je izlazni,

ostali slojevi se nazivaju skrivenim slojevima. Jedna od najčešćih arhitektura koja se sreće kod ovakvih mreža je VNM sa dva sloja koja je prikazana na Slici 6.6.



Slika 6.6. Višeslojna veštačka neuronska mreža sa jednim skrivenim slojem i sa prostiranjem signala unapred

Ulazni sloj prima signale iz okruženja, zatim ih prenosi skrivenom sloju koji obrađuje ove podatke i na kraju se obrađeni podaci upućuju izlaznom sloju. Na izlazima čvorova trećeg sloja se dobijaju konačni rezultati obrade. Složenije VNM sa prostiranjem signala unapred mogu imati više skrivenih slojeva. Danas se uglavnom izučavaju i primenjuju višeslojne VNM koje pored ulaznih i izlaznih čvorova sadrže čvorove i u skrivenim slojevima. Prema istraživanju koje su sproveli Couser i Mason (2004) VNM sa dva skrivena sloja ne daju preciznije izlazne rezultate od VNM sa jednim skrivenim slojem za iste ulazne vrednosti, osim ako je broj čvorova u prvom skrivenom sloju mali. U radovima Hartman i dr. (1990) i Hornik i dr. (1989) za opisivanje neprekidnih funkcija dovoljno je obučiti VNM sa jednim skrivenim slojem dok je upotreba mreža sa dva ili više skrivenih slojeva veoma retka.

Na levoj strani višeslojne VNM sa Slike 6.6 nalaze se ulazi od kojih polaze grane ka skrivenom sloju. U čvorovima skrivenog sloja vrši se obrada signala koji se

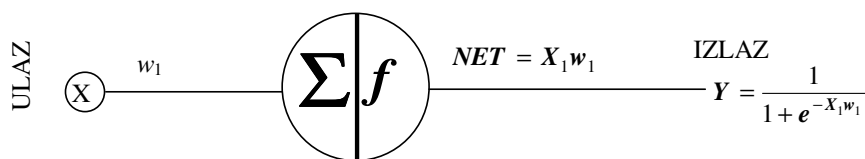
zatim tako obrađeni prosleđuju do izlaznog sloja gde se takođe vrši obrada signala. Svaki čvor predstavlja procesni element, njemu je pridružena aktivaciona funkcija (videti Sliku 6.4) i njome se transformiše ponderisani zbir ulaznih vrednosti (videti izraz 6.1). Svakoj grani (w_{ih} , w_{hj}) se dodeljuju težinske vrednosti. Dodeljivanje vrednosti granama koje povezuju čvorove može biti na osnovu slučajnog broja, ali se takođe može uraditi i optimizacija vrednosti primenom genetskog algoritma ili nekom drugom matematičkom metodom.

Najčešća aktivaciona funkcija je logistička kriva, međutim mogu se koristiti i ostale funkcije prikazane na Slici 6.4. Jedanput odabrana aktivaciona funkcija ne mora da bude ista u svakom čvoru. Višeslojna VNM prikazana na Slici 6.6 poseduje šum. Posedovanje šuma nije pravilo, već se dodavanjem istog eksperimentalnim istraživanjima utvrdilo da se obučavanje mreže ubrzava (Wei i Schonfeld, 1993).

Prikazana višeslojna VNM prikazana na Slici 6.6 poseduje čvorove čija povezanost je samo između dva susedna sloja. Ovakva povezanost se naziva potpuna povezanost. Međutim, mreže sa prostiranjem signala unapred nisu ograničene ovakvom vrstom povezanosti čvorova, tj. grane koje polaze iz čvorova ulaznog sloja mogu da se protežu sve do čvorova izlaznog sloja ako to doprinosi tačnijem i bržem obučavanju mreže. Tokom obučavanja mreže vrednosti težina grana se menjaju, odnosno prilagođavaju tako da se dobiju izlazne vrednosti koje najviše odgovaraju stvarnim vrednostima. Takođe, prilagođavanje vrednosti težina grana ne mora uvek da bude potpuno, već može da bude i parcijalno ako je to nekim pravilom određeno.

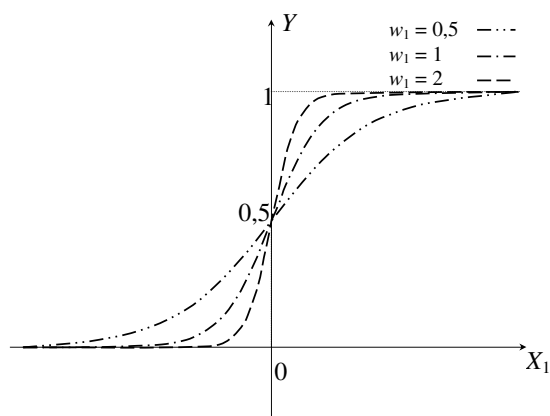
6.3.2. Šum

Pojedine VNM sa prostiranjem signala unapred poseduju šum (*eng. bias*). Šum pomaže da se funkcija cilja „pomeri“ ulevo ili udesno (videti Sliku 6.9), što može biti od važnosti za uspešno obučavanje VNM. Da bi se lakše objasnio uticaj šuma na obučavanje mreže posmatra se primer mreže sa jednim neuronom u ulaznom sloju i jednim neuronom u izlaznom sloju (videti Sliku 6.7).



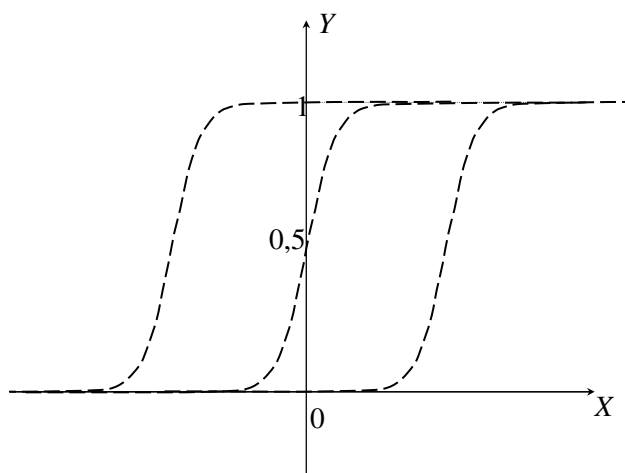
Slika 6.7. Veštačka neuronska mreža sa jednim ulazom i jednim izlaznim čvorom

U zavisnosti od promena težine w_1 tokom obučavanja mreže, funkcija aktivacije ima različite izgledе koji su prikazani na Slici 6.8.



Slika 6.8. Oblik aktivacione funkcije izlazne promenljive za različite promene težine w_1

Kao što se sa 6.8 može zaključiti, za više ulaznih vrednosti koje su različite od 0 izlazna aktivaciona funkcija će, takođe, dati različite vrednosti. Što su veće vrednosti težina grane, ugao koji tangenta zaklapa sa x-osom biće veći, ali samo u okolini tačke $X_1 = 0$. Za vrednosti ulazne promenljive koje su jednake nuli, izlazne vrednosti su uvek 0,5. Za proces učenja mreže promena nagiba tangente koja se odražava na izlaznu vrednost je korisna, ali i neupotrebljiva u slučajevima kada je potrebno dobiti vrednosti izlaza 0 ili bliskim nuli za bilo koju vrednost ulaza. Zbog toga se uvodi šum (videti Sliku 6.9).



Slika 6.9. Prikaz promene oblika aktivacione funkcije izlazne promenljive sa šumom

Na Slici 6.9 je prikazano „pomeranje“ izlazne funkcije levo ili desno od koordinatnog početka kao rezultat uvođenja šuma u obučavanje VNM. Šum se nalazi u jednom sloju, povezan je sa čvorovima iz sledećeg sloja, nije povezan ni sa jednim

čvorom iz prethodnog sloja i uvek emituje vrednost 1 (videti Sliku 6.3). Zbog toga, u ponderisanom zbiru signala, težine grana koje izlaze iz šuma se množe sa 1 i direktno dodaju sumi ostalih težina grana (Teodorović i Šelmić, 2012) kao što je prikazano u izrazu (6.1).

6.4. Obučavanje veštačke neuronske mreže

Obučavanje VNM predstavlja proces prilagođavanja vrednosti težina grana (slobodnih parametara) mreže kroz stimulaciju okruženja u kome se VNM nalazi. Kao što je u prethodnom poglavlju rečeno, obučavanje se vrši na tri načina: *obučavanje sa učiteljem*, *prinudno obučavanje* i *samoobučavanje*. U ovoj disertaciji će biti objašnjena dva algoritma obučavanja sa učiteljem. To su *algoritam za obučavanje perceptrona* i *algoritam povratnog prostiranja greške*. U okviru ovog poglavlja razmatraće se i uticaji različitih činilaca na algoritam povratnog prostiranja greške.

6.4.1. Algoritam za obučavanje perceptrona

Rosenblatt (1958) je najzaslužniji za otkriće jednoslojne veštačke neuronske mreže pod nazivom *perceptron*. On je u svom radu predstavio algoritam kojim se vrednosti težina grana menjaju na osnovu ulaznih vrednosti i razlike između proračunatih izlaznih vrednosti i stvarnih izlaznih vrednosti. Algoritam je sledeći:

1. Usvojiti vrednosti težina grana (najčešće na osnovu slučajnih brojeva) w_{ij} , $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ (videti Sliku 6.5). Postaviti da je $k = 1$
2. Na osnovu ulaznog vektora $\mathbf{X}^{(k)} = (\mathbf{X}_1^{(k)}, \mathbf{X}_2^{(k)}, \dots, \mathbf{X}_m^{(k)})^T$ iz skupa za obučavanje izračunati izlazne vrednosti i predstaviti u obliku izlaznog vektora $\mathbf{Y}^{(k)} = (\mathbf{Y}_1^{(k)}, \mathbf{Y}_2^{(k)}, \dots, \mathbf{Y}_n^{(k)})^T$
3. Promeniti vrednosti težina grana prema sledećem izrazu:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \eta [D_j^{(k)} - f(NE T_j^{(k)})] f'(NE T_j^{(k)}) X_i^{(k)} \quad (6.3)$$

gde su:

$$f(NE T_j^{(k)}) = Y_j^{(k)} = f\left(\sum_{i=1}^m w_{ij} X_i^{(k)}\right), j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, r. \quad (6.4)$$

$$f'(NET_j^{(k)}) = \frac{\partial f(NET_j^{(k)})}{\partial NET_j^{(k)}} \quad (6.5)$$

$\eta \in (0,1)$ – koeficijent obučavanja, $\eta = 0,1$ (Priddy i Keller, 2005)

$D_j^{(k)}$ – prave izlazne vrednosti iz reprezentativnog uzorka

$NET_j^{(k)}$ – izlazni signal j koji je jednak ponderisanom zbiru ulaznih signala u čvor j (videti Sliku 6.3)

m – broj ulaza

n – broj izlaza

r – dužina skupa za obučavanje

Proračunati kriterijumsku funkciju $E(w_{ij})$ obučavanja, odnosno ukupnu kvadratnu grešku na skupu za obučavanje na osnovu sledećeg izraza:

$$E(w_{ij}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^n (D_j^{(k)} - Y_j^{(k)})^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^n \left[D_j^{(k)} - f \left(\sum_{i=1}^m w_{ij} X_i^{(k)} \right) \right]^2 \quad (6.6)$$

4. Ponoviti korake 2 i 3, tj. povećavati vrednost za k sve dok se greška $E(w_{ij})$ ne smanji do nekog unapred određenog broja ili dok se ne obavi unapred određeni broj iteracija.

U ovom algoritmu se obučavanje i menjanje vrednosti težina grana obavlja samo dok je vrednost $E(w_{ij})$ veća od nekog unapred određenog broja ili nule. Opisana procedura je procedura gradijentnog tipa i konvergira ka nekom od lokalnih ekstremuma čime ne garantuje globalni ekstremum, u zavisnosti od početnih uslova i parametara obučavanja. Izraz (6.3) predstavlja Delta pravilo obučavanja (*eng. Delta learning rule*).

6.4.2. Algoritam povratnog prostiranja greške

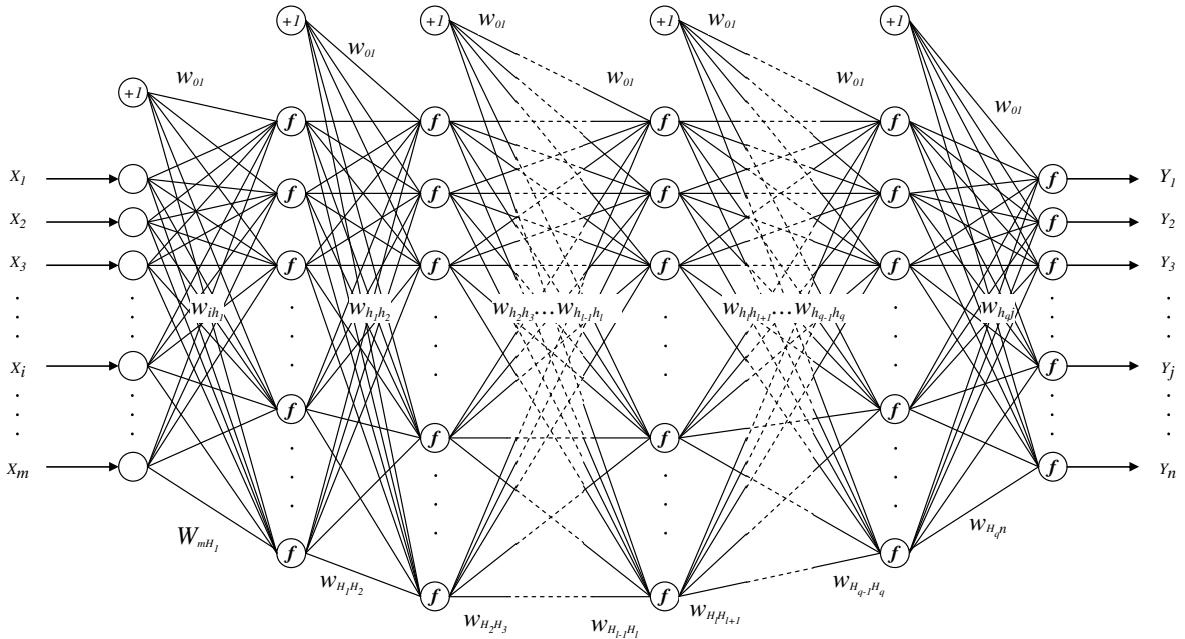
Višeslojne veštačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unapred počele su da se primenjuju po otkrivanju i razvitku *algoritma povratnog prostiranja greške*. Smatra se da su Bryson i Ho (1969) u svojoj knjizi prvi opisali višestepeni optimizacioni model. Ovaj model se nije koristio kod VNM sve dok ga brojni istraživači (Le Cun, 1985, Parker, 1985, Rumelhart i McLelland, 1986) nisu, nezavisno jedni od drugih, razvili u pogodan i trenutno najpopularniji algoritam obučavanja višeslojnih VNM sa prostiranjem signala unapred.

Algoritmom povratnog prostiranja greške, obučavanje se vrši u dve faze:

1. Ulazni vektor $\mathbf{X}^{(k)} = (\mathbf{X}_1^{(k)}, \mathbf{X}_2^{(k)}, \dots, \mathbf{X}_m^{(k)})^T$ se širi ka izlaznom sloju dajući izlazni vektor $\mathbf{Y}^{(k)} = (\mathbf{Y}_1^{(k)}, \mathbf{Y}_2^{(k)}, \dots, \mathbf{Y}_n^{(k)})^T$, gde je $k = 1, 2, \dots, r$.

2. Signal greške se širi od izlaznog ka ulaznom sloju menjajući vrednosti težina grana $w_{h_l-1, h_l}^{(k)}$, $h_l = 1, 2, \dots, H_l$, $l = 1, 2, \dots, q+1$ (videti Sliku 6.10).

Da bi se algoritam povratnog prostiranja greške lakše razumeo, na Slici 6.10 je prikazana višeslojna VNM sa q skrivenih slojeva.



Slika 6.10. Višeslojna veštačka neuronska mreža sa više skrivenih slojeva

Algoritam se sastoji iz sledećih koraka:

KORAK 1. Formirati skup podataka za obučavanje $(\mathbf{S}_r^{(X,D)})$ na osnovu reprezentativnog uzorka podataka, odnosno celokupnog skupa podataka $(\mathbf{S}_r^{(X,D)})$, koji obuhvata trening parove ulaza i izlaza $(\mathbf{X}^{(k)}, \mathbf{D}^{(k)})$:

$$\mathbf{S}_r^{(X,D)} = \{(\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{D}^{(1)}), (\mathbf{X}^{(2)}, \mathbf{D}^{(2)}), \dots, (\mathbf{X}^{(r)}, \mathbf{D}^{(r)})\} \quad (6.7)$$

gde su:

$\mathbf{X}^{(k)} = (\mathbf{X}_1^{(k)}, \mathbf{X}_2^{(k)}, \dots, \mathbf{X}_m^{(k)})^T$ – vektor ulaznih podataka i

$\mathbf{D}^{(k)} = (\mathbf{D}_1^{(k)}, \mathbf{D}_2^{(k)}, \dots, \mathbf{D}_n^{(k)})^T$ – vektor izlaznih podataka,

za $k = 1, 2, \dots, r$, (r – dužina skupa za obučavanje).

Postaviti da je $k = 1$. Postaviti da je vreme ili broj iteracija $t = 0$.

KORAK 2. Izabrati koeficijent obučavanja (η) i usvojiti maksimalnu prihvatljivu grešku (E_{\max}). Postaviti da je $k=1$, $t = t + 1$, $E^{(k-1)}(t)=0$. Usvojiti početne vrednosti težina grana $w_{h_{l-1}h_l}^{(k)}$ za $k = 1$ (videti potpoglavlje 6.4.3.1).

KORAK 3. (Prostiranje unapred). Izračunati izlaze iz svih čvorova od prvog skrivenog sloja sve do izlaznog sloja za sve parove skupa za obučavanje na osnovu izraza

$$Y_{h_l}^{(k)} = \begin{cases} f_{h_l} \left(\sum_{h_{l-1}=0}^{H_{l-1}} Y_{h_{l-1}}^{(k)} w_{h_{l-1}h_l}^{(k)} \right), & l=1,2,\dots,q, \quad k=1,2,\dots,r \quad (\text{skriveni slojevi}) \\ 1, & h_l = 0, \quad l=1,2,\dots,q, \quad (\text{dodatni šum}) \\ Y_j^{(k)} = f_j \left(\sum_{h_q=0}^{H_q} Y_{h_q}^{(k)} w_{h_qj}^{(k)} \right), & h_l = j=1,2,\dots,n, \quad l=q+1, \quad (\text{izlazni sloj}) \\ X_i^{(k)}, & h_l = i=1,2,\dots,m, \quad l=0, \quad (\text{ulazni sloj}) \end{cases} \quad (6.8)$$

gde su:

m – broj ulaza reprezentativnog uzorka,

$Y_{h_l}^{(k)}$ – izlazna vrednost iz čvora h_l u bilo kojem sloju l ($l = 0,1,2, \dots, q, q+1$),

f_{h_l} – aktivaciona funkcija čvora h_l u skrivenom ili izlaznom sloju l ($l = 1,2, \dots, q+1$),

$w_{h_{l-1}h_l}^{(k)}$ – vrednost težine grane koja povezuje čvor h_{l-1} i čvor h_l ($l = 1,2, \dots, q+1$),

H_l – broj čvorova u skrivenom sloju l ($l = 1,2, \dots, q$), $l=0 \Rightarrow H_r = m, r=q+1 \Rightarrow H_l = n$,

q – broj skrivenih slojeva,

$Y_j^{(k)} = Y_{h_l}^{(k)}$ – izlazna vrednost iz čvora j u izlaznom sloju za $l = q+1$ ($j = 1,2, \dots, n$),

$f_j = f_{h_l}$ – aktivaciona funkcija čvora j u izlaznom sloju za $l = q+1$ ($j = 1,2, \dots, n$),

$w_{h_qj}^{(k)} = w_{h_{l-1}h_l}^{(k)}$ – vrednost težine grane koja povezuje čvorove poslednjeg izlaznog sloja (q) sa čvorovima izlaznog sloja ($l = q+1$ i $j = 1,2, \dots, n$),

n – broj čvorova u izlaznom sloju

KORAK 4. Proračunati ukupnu grešku mreže za ceo skup podataka za obučavanje (u daljem tekstu ukupna greška) preko sledećeg izraza

$$E^{(k)}(t) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (D_j^{(k)} - Y_j^{(k)})^2 + E^{(k-1)}(t) \quad (6.9)$$

KORAK 5. (Prostiranje greške unazad ili povratni prolaz). Prostiranje greške unazad kako bi se promenile vrednosti težina grana i izračunale greške za delta $(\delta_{h_l}^{(k)})$ za prethodni sloj:

$$w_{h_{l-1}h_l}^{(k+1)} = w_{h_{l-1}h_l}^{(k)} + \Delta w_{h_{l-1}h_l}^{(k)} \quad (6.10)$$

$$\Delta w_{h_{l-1}h_l}^{(k)} = -\eta \frac{\partial E^{(k)}(t)}{\partial w_{h_{l-1}h_l}^{(k)}} = \eta \delta_{h_l}^{(k)} Y_{h_l}^{(k)} \quad (6.11)$$

$$h_l = 0, 1, \dots, H_l, \quad l = q+1, q, q-1, \dots, 2, 1, \quad k = 1, 2, \dots, r$$

$$\delta_{h_l}^{(k)} = \begin{cases} \frac{\partial f_{h_l}(NET_{h_l}^{(k)})}{\partial NET_{h_l}^{(k)}} (D_{h_l}^{(k)} - Y_{h_l}^{(k)}), & l = q+1 \text{ (izlazni sloj)} \\ \frac{\partial f_{h_l}(NET_{h_l}^{(k)})}{\partial NET_{h_l}^{(k)}} \sum_{h_{l-1}=1}^{H_{l-1}} w_{h_{l-1}h_l}^{(k)} \delta_{h_{l-1}}^{(k)}, & l = q, q-1, \dots, 1 \text{ (skriveni slojevi)} \end{cases} \quad (6.12)$$

gde su:

$\Delta w_{h_{l-1}h_l}^{(k)}$ – promena vrednosti težina grana,

$NET_{h_l}^{(k)}$ – ponderisani zbir ulaznih signala u čvor h_l ($l = 1, 2, \dots, q+1$),

$NET_{h_l}^{(k)} = NET_j^{(k)}$ – ponderisani zbir ulaznih signala u čvor izlaznog sloja ($l = q$ i $j = 1, 2, \dots, n$).

KORAK 6. Proveriti da li je $k < r$. Ako jeste, tada je $k = k+1$ i prelazi se na korak 3. U suprotnom prelazi se na korak 7.

KORAK 7. Proveriti da li je ukupna greška $(E^{(r)}(t))$ manja od maksimalne prihvatljive greške (E_{\max}) ? Ako je $E^{(r)}(t) < E_{\max}$ prekida se obučavanje mreže i zadržavaju se vrednosti težina grana $(w_{h_{l-1}h_l}^{(k)})$ za $k = r$ i $t = t$. U suprotnom, prelazi se na korak 3 sa istim trening parovima iz koraka 1, poslednjim promenama vrednosti težina grana $(w_{h_{l-1}h_l}^{(k)})$ za $k = k$, ali se podešava da je $t = t + 1$, $k=1$ i $E^{(k-1)}(t)=0$ i prelazi na korak 3.

Još uvek nerešeni problem u algoritmu povratnog prostiranja greške predstavlja problem lokalnog minimuma, koji sprečava algoritam da dostigne globalni optimum. Poznato je da se osim jednog lokalnog minimuma pojavljuje veliki broj lokalnih minimuma jer postoji veliki broj kombinacija vrednosti težina grana koje daju isti

izlazni rezultat. Postojanje lokalnog minimuma nije jedini problem ovog algoritma. Prilikom obučavanja mreže može se pojaviti sporija konvergencija algoritma kada su izlazne vrednosti neosetljive na male promene vrednosti težina grana.

6.4.3. Uticaj različitih činilaca na algoritam povratnog prostiranja greške

6.4.3.1 Početne vrednosti težina grana mreže

Početne vrednosti težina grana mogu dosta da utiču na krajnji rezultat obučavanja VNM. Sigmoidna funkcija je prava linija za ekstremno male ili ekstremno velike vrednosti ulaznih podataka. Izvod sigmoidne funkcije za ulaznu vrednost dva je oko 1/10, dok je za ulaznu vrednost 10 oko 1/22000. To znači da će neuron čija je aktivaciona funkcija sigmoid za ulaznu vrednost 10 učiti 2200 puta sporije od neurona za ulaznu vrednost 2. Da bi se izbeglo sporo učenje mreže potrebno je napraviti da prvi izvod aktivacione funkcije bude velika vrednost. Zato se početne vrednosti težina grana biraju tako da aktivacione funkcije daju izlazne vrednosti u rasponu manjih brojeva.

Mnogi autori su prepoznali i istraživali razne metode dodeljivanja početnih vrednosti težina grana kojima može da se ubrza obučavanje VNM primenom algoritma povratnog prostiranja greške i to u sledećim radovima: Bottou (1988), Shepanski (1988), Kim i Ra (1991), Drago i Ridella (1992), Li i dr. (1993), Palubinskas (1994), Shimodaira (1994), Yoon i dr. (1995), Jim i Tommy (2000), Kathirvalavakumar i Thangavel (2003), Liu i dr. (2012).

Autori, uglavnom, početne vrednosti težina grana daju u vidu opsega vrednosti ili ih izračunavaju pomoću izraza koje su dobili istraživanjem i eksperimentisanjem sa različitim podacima. Takođe, Liu i dr. (2012) su ispitivali uticaj dovoljno malih vrednosti težina grana na rezultate obučavanja VNM. U svom radu su dokazali da početne vrednosti težina grana u rasponu od -5 do 5 mogu da daju najbolje rezultate obučavanja VNM sa prostiranjem signala unapred, tri sloja i sigmoidnim aktivacionim funkcijama u čvorovima i to za 4 klasifikaciona problema. Time su pokazali da početne vrednosti težina grana zavise ne samo od arhitekture mreže, već i od skupa trening parova. Od mnogobrojnih metoda određivanja početnih vrednosti težina mogu se izdvojiti sledeće:

1. Kim i Ra (1991) su predložili da se vrednosti težina grana izračunavaju prema izrazu (6.13). Izrazom je određen minimum vrednosti ispod koje jedna težina grane ne sme da bude. Sam proces dodeljivanja vrednosti težinama grana nije definisan, te je ostavljeno da on bude po izboru.

$$\sqrt{\frac{\eta}{H_{l-1}}} < |w_{h_{l-1}h_l}^{(l)}| \quad (l=1,2,\dots,q+1) \quad (6.13)$$

2. Shimodaira (1994) je u svom radu predložio algoritam koji se sastoji od sledećih koraka:

korak 1. Proračunati vrednost $b_{h_{l-1}h_l}$ prema izrazu (6.14) gde je θ parametar sa vrednostima od 0 do 1.

$$b_{h_{l-1}h_l} = \left| f_{h_l}^{-1}(1-\theta) - f_{h_l}^{-1}(\theta) \right| \quad (6.14)$$

korak 2. Korišćenjem H_{l-1} i parametra k proračunati vrednost veličine $\hat{w}_{h_{l-1}h_l}$ prema izrazu (6.15)

$$\hat{w}_{h_{l-1}h_l} = \frac{b_{h_{l-1}h_l}}{k \cdot H_{l-1} \cdot \sqrt{2}} \quad (6.15)$$

korak 3. Korišćenjem sledećeg parametra γ proizvesti slučajni broj $a_{h_{l-1}h_l}$ u opsegu $-\gamma < a_{h_{l-1}h_l} < \gamma$.

korak 4. Pomoću slučajnog borja $(a_{h_{l-1}h_l})$ proračunati početne vrednosti težina grana mreže $(w_{h_{l-1}h_l}^{(l)})$ izrazom (6.16)

$$w_{h_{l-1}h_l}^{(l)} = \hat{w}_{h_{l-1}h_l} \cdot \sqrt{a_{h_{l-1}h_l}^2 + 1} \quad (l=1,2,\dots,q+1) \quad (6.16)$$

Prema radu (Shimodaira, 1994) preporučuju se kombinacije za parametre k i γ kao parove sledećih vrednosti: (2, 0.3), (5, 0.3), (8, 0.3), (2, 0.6), (5, 0.6), (8, 0.6), (2, 0.9), (5, 0.9) and (8, 0.9).

3. Drago i Ridella (1992) su predložili metod za proračun početnih vrednosti težina grana nazvan „SCAWI“. Za proračun početnih vrednosti težina grana navedeni autori su predložili izraze (6.17) i (6.18).

$$w_{ih_l}^{(l)} = \frac{1.3}{\sqrt{1 + \frac{\left(\sum_{i=1}^m X_i^2 \right)^2}{m}}} \cdot SB_{ih_l} \quad (6.17)$$

$$w_{h_{l-1}h_l}^{(l)} = \frac{1.3}{\sqrt{1+0,3 \cdot H_{l-1}}} \cdot SB_{h_{l-1}h_l} \quad (l = 2,3,\dots,q+1) \quad (6.18)$$

gde je **SB** slučajan broj sa ravnomernom raspodelom na intervalu (-1,1). Cilj autora je bio da preko predloženih izraza (6.17 i 6.18) spreči „zaustavljanje“ algoritma u lokalnom minimumu još u početnoj fazi obučavanja VNM.

4. Le Cunn i dr. (1998) i Bottou (1988) su predložili da se vrednosti početnih težina grana biraju na slučajan način iz sledećeg intervala:

$$\left[-\frac{2,38}{\sqrt{H_{l-1}+1}}, \frac{2,38}{\sqrt{H_{l-1}+1}} \right], \quad l = 1,2,\dots,q+1 \quad (6.19)$$

Međutim, i pored svih metoda koje na neki način garantuju da će obučavanje VNM biti brže, ne može se predvideti koliko će se brzo i sa kakvim svojstvom uopštavanja stečenog znanja završiti.

6.4.3.2 Normalizacija (standardizacija) podataka

Obučavanje VNM može biti efikasnije ukoliko se proces normalizacije podataka obavi pravilno. Postoje različite metode normalizacije, ali se uglavnom sve metode svode na osrednjavanje podataka tako da im minimalne i maksimalne vrednosti budu u rasponu dva broja. Time se smanjuje šum tokom obučavanja. Proces normalizacije podataka je naročito koristan kod vrednosti podataka koje su u velikoj nesrazmeri.

Algoritam povratnog prostiranja greške je osetljiv na svođenje intervala vrednosti ulaznih podataka. Kao što je već pomenuto u potpoglavlju 6.4.3.1 velike brojne vrednosti ulaznih podataka usporavaju proces obučavanja mreže, jer prvi izvod sigmoidne funkcije teži nuli za ekstremno velike brojne vrednosti. Male vrednosti prvog izvoda sigmoidne funkcije doprineće sporijoj promeni signala čime će usporavati proces učenja. Takođe, ne može se predvideti koliko će se brzo i sa kakvim svojstvom uopštavanja stečenog znanja obučavanje VNM završiti.

Da bi se izbeglo usporavanje obučavanja mreže vrši se transformacija podataka na određene brojne intervale, najčešće [-1,1], [0,1] i [0,1, 0,9]. Ovakva transformacija se naziva standardizacija podataka. Ukoliko se transformacija vrši Gausovom funkcijom, onda se zove normalizacija podataka. Prednost korišćenja intervala [0,1, 0,9] se ogleda u tome što se konvergencija ka lokalnom minimumu odvija brže nego kada se koristi interval [0, 1] (Dawson, 2001).

Normalizacija (standardizacija) podataka obuhvata normalizovanje svih ulaznih i izlaznih parova podataka iz celokupnog skupa podataka $(S_r^{(X,D)})$, što znači da obuhvata i celokupan skup ulaznih podataka $(X'_i, i=1,2,\dots,m)$ i celokupan skup izlaznih podataka $(D'_j, j=1,2,\dots,n)$. Ovi skupovi su definisani na sledeći način:

$$X'_i = \{X_i^{(1)}, X_i^{(2)}, \dots, X_i^{(r')}\}, \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (6.20)$$

$$D'_j = \{D_j^{(1)}, D_j^{(2)}, \dots, D_j^{(r')}\}, \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (6.21)$$

Skupovi ulaznih i izlaznih normalizovanih podataka su sledeći:

$$X'_{inorm} = \{X_{inorm}^{(1)}, X_{inorm}^{(2)}, \dots, X_{inorm}^{(r')}\}, \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (6.22)$$

$$D'_{jnorm} = \{D_{jnorm}^{(1)}, D_{jnorm}^{(2)}, \dots, D_{jnorm}^{(r')}\}, \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (6.23)$$

Po obučavanju VNM i proračunom izlaznih vrednosti iz VNM dobija se skup izlaznih podataka (Y'_{jnorm}) koji čine normalizovane vrednosti i koji je sledeći:

$$Y'_{jnorm} = \{Y_{jnorm}^{(1)}, Y_{jnorm}^{(2)}, \dots, Y_{jnorm}^{(r')}\}, \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (6.24)$$

U ovoj disertaciji, normalizacija podataka će biti prikazana na skupu ulaznih podataka u VNM $(X'_i, i=1,2,\dots,m)$, ali će ona biti primenjena i na sve ostale skupove podataka $(D'_j$ i $Y'_j, j=1,2,\dots,n)$. Metode kojima se vrši normalizacija (standardizacija) podataka su mnogobrojne i u ovoj disertaciji će biti prikazane samo metode objašnjene u radu (Zhang i dr., 1998):

1) Statistička standardizacija (normalizacija) podataka

Ova tehnika normalizacije podataka koristi aritmetičku sredinu i standardno odstupanje elemenata skupa podataka koji se koriste kod obučavanja VNM. Normalizacija podataka se odvija pomoću sledećeg izraza:

$$X'_{inorm} = \frac{X_i^{(k')} - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}, \quad (i=1,2,\dots,m, k'=1,2,\dots,r') \quad (6.25)$$

gde su:

μ_{X_i} – aritmetička sredina elemenata celokupnog skupa podataka $(S_r^{(X,D)})$

σ_{X_i} – standardno odstupanje elemenata celokupnog skupa podataka $(S_r^{(X,D)})$

$$S_r^{(X,D)} = \{(X^{(1)}, D^{(1)}), (X^{(2)}, D^{(2)}), \dots, (X^{(r')}, D^{(r')})\} \quad (6.26)$$

2) Min-max standardizacija (normalizacija) podataka

Min-max procedura standardizacije podataka se obavlja pomoću sledećeg izraza:

$$X_{inorm}^{(k')} = \frac{X_i^{(k')} - \min_{k'}\{X'_i\}}{\max_{k'}\{X'_i\} - \min_{k'}\{X'_i\}} \left(\max_{k'}\{X'_{inorm}\} - \min_{k'}\{X'_{inorm}\} \right) + \min_{k'}\{X'_{inorm}\} \quad (6.27)$$

$$(k' = 1, 2, \dots, r', i = 1, 2, \dots, m)$$

gde su:

$\max_{k'} X'_{inorm}$ – maksimum skupa (X_{inorm}) (zadato unapred i najčešće je broj 1)

$\min_{k'} X'_{inorm}$ – minimum skupa (X_{inorm}) (zadato unapred i najčešće je broj 0 za

sigmoidnu aktivacionu funkciju i broj -1 za hiperbolički tangens)

3) Decimalna standardizacija (normalizacija) podataka

Decimalna normalizacija se vrši tako što se decimalni zarez podataka pomera u desno pomoću sledećeg izraza:

$$X_{inorm}^{(k')} = \frac{X_i^{(k')}}{10^\ell}, \quad (k' = 1, 2, \dots, r', i = 1, 2, \dots, m) \quad (6.28)$$

gde je ℓ najmanji ceo broj takav da bude sve vrednosti $X_{inorm}^{(k')}$ zadovoljavaju sledeći izraz:

$$\max_{k'} |X_{inorm}^{(k')}| < 1, \quad (k' = 1, 2, \dots, r', i = 1, 2, \dots, m) \quad (6.29)$$

4) Sigmoidna standardizacija (normalizacija) podataka

Sigmoidnom normalizacijom podataka se postiže da se vrednosti svedu na interval od 0 do 1. Postupak se sastoji iz sledećeg izraza:

$$X_{inorm}^{(k')} = \frac{1}{1 + e^{-X_i^{(k')}}}, \quad (k' = 1, 2, \dots, r', i = 1, 2, \dots, m) \quad (6.30)$$

Po obavljenoj normalizaciji podataka, vrši se njihovo razdvajanje u skupove normalizovanih podataka za obučavanje (X_{inorm} za ulazne podatke i D_{jnorm} za izlazne podatke) i testiranje (X''_{inorm} za ulazne podatke i D''_{jnorm} za izlazne podatke) VNM.

Pomenuti skupovi su definisani na sledeći način:

$$X_{inorm} = \{X_{inorm}^{(1)}, X_{inorm}^{(2)}, \dots, X_{inorm}^{(r)}\}, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (6.31)$$

$$D_{jnorm} = \{D_{jnorm}^{(1)}, D_{jnorm}^{(2)}, \dots, D_{jnorm}^{(r)}\}, \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6.32)$$

$$X''_{inorm} = \{X_{inorm}^{(1)}, X_{inorm}^{(2)}, \dots, X_{inorm}^{(r'')}\}, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (6.33)$$

$$D''_{jnorm} = \{D_{jnorm}^{(1)}, D_{jnorm}^{(2)}, \dots, D_{jnorm}^{(r'')}\}, \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6.34)$$

6.4.3.3 Koeficijent obučavanja (η)

Vrednost koeficijenta obučavanja (η) trebalo bi da bude dovoljno velika kako bi se ubrzao proces obučavanja, ali i dovoljno mala kako bi se garantovala efikasnost obučavanja. Prilikom obučavanja VNM, algoritam u nekom trenutku vremena, počinje da divergira. Ukoliko se koeficijent obučavanja smanji u tom momentu, obučavanje mreže će se nastaviti u pravcu minimizacije greške. Uobičajeno je da se polazi sa većim vrednostima koeficijenta obučavanja, a da se tokom obučavanja mreže smanjuje početna vrednost, odnosno prati razlika između ukupnih grešaka po koracima obučavanja (k). Ako je ta razlika sve manja i teži nuli, znači da je vreme da se smanji koeficijent obučavanja.

Danas se smatra da je obučavanje VNM sa konstantnom vrednošću koeficijenta obučavanja monotono i nesvrshodno obzirom da troši puno vremena i zahteva dosta ponavljanja koraka. Zbog toga su autori razvili različite empirijske izraze kojima se vrednost koeficijenta obučavanja menja tokom obučavanja VNM. Jasno je da vrednost koeficijenta obučavanja (videti izraz 6.11) može biti jednaka za sve grane u mreži, te se menjati sa brojem iteracija obučavanja (globalna promena koeficijenta obučavanja) ili biti različita od grane do grane u mreži i menjati se po koracima obučavanja (lokalna promena koeficijenta obučavanja). U ovoj disertaciji će biti predstavljen jedan empirijski izraz kojim se proračunava vrednost koeficijenta obučavanja (η) za svaki par ulaznih i izlaznih signala (Moreira i Fiesler, 1995):

$$\eta^{(k)} = \frac{1}{2 \left[\left(\frac{\partial f_j(NE T_j^{(k)})}{\partial NE T_j^{(k)}} \right)^2 \sum_{j=1}^n (Y_j^{(k)})^2 + \sum_{l=1}^q \sum_{h_l=0}^{H_l} (\delta_{h_l}^{(k)})^2 \sum_{h_{l-1}=0}^{H_{l-1}} (Y_{h_{l-1}}^{(k)})^2 \right]} \quad (6.35)$$

Pored promene koeficijenta obučavanja koristi se i promena momentum člana prilikom obučavanja mreže čime se, takođe, može smanjiti divergencija algoritma. Ukoliko je algoritam obučavanja na polovini puta da završi obučavanje mreže i ako „ide“ u pravom smeru, tj. dostizanju minimuma, onda se povećavanjem veličine koraka obučavanja algoritmu dozvoljava da brže „dođe“ do konačnog rešenja. Ovim putem se dolazi do toga da korišćenje standardnog algoritma povratnog prostiranja greške postaje na neki način suviše i otvara mogućnost korišćenja serija drugih algoritama za obučavanje kao što su RPROP, BFGS i Njutnova metode korekcija težina.

6.4.3.4 Funkcija cilja

Funkcija pomoću koje se izračunava ukupna greška (E) ne mora biti jedini mogući izbor prilikom obučavanja mreže algoritmom povratnog prostiranja greške. Ukoliko se promeni izraz za ukupnu grešku, onda će se promeniti samo signal greške delta ($\delta_{h_l}^{(k)}$) u izlaznom sloju ($l = q + 1$), dok ostale jednačine ostaju nepromenjene. Funkcija po kojoj se računa ukupna greška (izraz 6.8) predstavlja Euklidovu normu, a moguće je zameniti funkcijama L_p norme i Čebiševljeve norme (Cichocki i Unbehauen, 1992) preko naredna dva izraza

$$E^{(k)}(t) = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^n (D_j^{(k)} - Y_j^{(k)})^p + E^{(k-1)}(t), \quad 1 < p < \infty \quad (6.36)$$

$$E^{(k)}(t) = \max_{1 \leq k \leq r} \left\{ \sum_{j=1}^n (D_j^{(k)} - Y_j^{(k)}) \right\} \quad p = \infty \quad (6.37)$$

6.4.3.5 Mmomentum član

Kao što je već opisano u potpoglavlju 6.4.3.3, promenom vrednosti koeficijenta obučavanja (η) proces obučavanja VNM se ubrzava ili usporava. Povećanjem vrednosti koeficijenta obučavanja povećava se i brzina obučavanja mreže. Međutim, u nekom trenutku vremena (t), algoritam povratnog prostiranja greške počinje da divergira, a vrednosti težina grana „osciluju“ oko određenih vrednosti. Da bi se izbegla divergencija uvodi se momentum član. Momentum član (α) se dodaje u izraz (6.10) čime taj izraz postaje izraz (6.38). Vrednosti momentum člana su u intervalu od 0 do 1.

$$\Delta w_{h_{l-1}h_l}^{(k)} = \eta \delta_{h_l}^{(k)} Y_{h_l}^{(k)} + \alpha \cdot \Delta w_{h_{l-1}h_l}^{(k-1)}, \quad \alpha \in [0,1] \quad (6.38)$$

Uključivanjem delova promena vrednosti težina grana iz prethodnog koraka ($\alpha \cdot \Delta w_{h_{l-1}h_l}^{(k-1)}$, $\alpha \in [0,1]$) postiže se brža konvergencija algoritma i sa manje „oscilacija“ budućih težina grana (Gallant, 1993). I pored toga što momentum član ubrzava obučavanje mreže, ipak, postoje trenuci vremena ili iteracije kod kojih dolazi do usporavanja obučavanja mreže zbog pogrešnog odabira vrednosti momentum člana (Minai i Williams, 1990 i Qui i dr., 1992). Zbog toga su različiti autori istraživali mogućnost pronalaska drugačijih izraza za uvođenje momentum člana u algoritam povratnog prostiranja greške. Tako je Jakobs (1998) izveo sledeći izraz:

$$\Delta w_{h_{i-1}h_i}^{(k)} = (1-\alpha)\eta\delta_{h_i}^{(k)}Y_{h_i}^{(k)} + \alpha \cdot \Delta w_{h_{i-1}h_i}^{(k-1)}, \quad \alpha \in [0,1] \quad (6.39)$$

Istook i Martinez (2002) su u svom radu predložili sledeći izraz:

$$\Delta w_{h_{i-1}h_i}^{(r)} = \eta\delta_{h_i}^{(r)}Y_{h_i}^{(r)} + g\left(\eta\delta_{h_i}^{(r)}Y_{h_i}^{(r)}, \Delta w_{h_{i-1}h_i}^{(r-1)}, \Delta w_{h_{i-1}h_i}^{(r-2)}, \dots, \Delta w_{h_{i-1}h_i}^{(r-k^{iv})}, \dots, \Delta w_{h_{i-1}h_i}^{(r-r^{iv})}\right) \quad (6.40)$$

gde su:

k^{iv} – broj prethodnih promena vrednosti težina grana ($k^{iv}=1,2,\dots, r^{iv}$)

r^{iv} – ukupan broj prethodnih promena vrednosti težina grana, odnosno opseg ili obim podataka koji su iz skupa za obučavanje ($r^{iv} \leq r$)

$$g\left(\eta\delta_{h_i}^{(r)}Y_{h_i}^{(r)}, \delta_{h_i}^{(1)}, \dots, \delta_{h_i}^{(r^{iv})}\right) = \begin{cases} -\eta\delta_{h_i}^{(r)}Y_{h_i}^{(r)}, & \eta\delta_{h_i}^{(r)}Y_{h_i}^{(r)} \cdot \sum_{k^{iv}=1}^s \delta_{h_i}^{(k^{iv})} < 0 \\ 0, & \eta\delta_{h_i}^{(r)}Y_{h_i}^{(r)} \cdot \sum_{k^{iv}=1}^s \delta_{h_i}^{(k^{iv})} \geq 0 \end{cases} \quad (6.41)$$

6.4.3.6 Pravila korekcija vrednosti težina grana mreže

Pravilo po kome se vrši korekcija vrednosti težina grana nalazi se u izrazima (6.9) i (6.10) (korak 5 algoritma povratnog prostiranja greške). Po ovom pravilu (gradijentnog tipa) konvergencija ka nekom od lokalnih minimuma ne garantuje dobijanje globalnog minimuma. Konvergencija je najčešće spora i traži dosta vremena i iteracija za obučavanje ($t \gg 0$) (Radonjić i dr., 2012). Teorija optimizacije nudi niz daleko razvijenijih i efikasnijih tehnika. Tehnike se dele na: *procedure numeričke optimizacije*, *procedure stohastičke optimizacije*, *heurističke tehnike optimizacije* i *ostale tehnike* (Moreira i Fiesler, 1995). U disertaciji će biti prikazane četiri tehnike korekcija vrednosti težina kojima se značajno skraćuje vreme obučavanja mreže. To su: RPROP algoritam (*eng. Resilient Backpropagation Algorithm*) koji spada u proceduru stohastičke optimizacije, Njutnov metod korekcije težina (BFGS algoritam, *eng. Constrained BFGS Algorithm*) koji spada u proceduru numeričke optimizacije, kvazi Njutnova metoda ili algoritam konjugovanih pravaca koji spada u proceduru stohastičke optimizacije (Konjugovani gradijent – *eng. Conjugate Gradient*) i Njutn – Konjugovani gradijent koji spada u proceduru numeričke optimizacije (TNC algoritam – *eng. Truncated Newton Conjugate* ili *Constrained truncated Newton algorithm*).

1) RPROP algoritam

RPROP algoritam važi za jedan od najbržih algoritama obučavanja sa učiteljem. On pripada heurističkim tehnikama optimizacije vrednosti težina grana mreže (Moreira i Fiesler, 1995) i nije gradijentnog tipa. Razlika između algoritma povratnog prostiranja greške i RPROP algoritma je u drugačijem proračunu promena vrednosti težine grana ($\Delta w_{h_{i-1}h_i}^{(k)}$). Dakle, proračun vrednosti težina grana ($w_{h_{i-1}h_i}^{(k)}$) se obavlja pomoću izraza (6.10). Međutim, promena vrednosti težina grana se proračunava pomoću sledećeg izraza:

$$\Delta w_{h_{i-1}h_i}^{(k)} = -\text{sign}\left(\frac{\partial E^{(k)}(t)}{\partial w_{h_{i-1}h_i}^{(k)}}\right) \cdot \Delta_{h_{i-1}h_i}^{(k)} \quad (6.42)$$

gde je $\Delta_{h_{i-1}h_i}^{(k)}$ korekciona vrednost (*eng. update-value*) koja se proračunava na osnovu sledećeg pravila:

$$\Delta_{h_{i-1}h_i}^{(k)} = \begin{cases} \min(\varepsilon^+ \cdot \Delta_{h_{i-1}h_i}^{(k-1)}, \Delta_{\max}), & \frac{\partial E^{(k-1)}(t)}{\partial w_{h_{i-1}h_i}^{(k-1)}} \cdot \frac{\partial E^{(k)}(t)}{\partial w_{h_{i-1}h_i}^{(k)}} > 0 \\ \min(\varepsilon^- \cdot \Delta_{h_{i-1}h_i}^{(k-1)}, \Delta_{\min}), & \frac{\partial E^{(k-1)}(t)}{\partial w_{h_{i-1}h_i}^{(k-1)}} \cdot \frac{\partial E^{(k)}(t)}{\partial w_{h_{i-1}h_i}^{(k)}} < 0 \\ \Delta_{h_{i-1}h_i}^{(k-1)}, & \frac{\partial E^{(k-1)}(t)}{\partial w_{h_{i-1}h_i}^{(k-1)}} \cdot \frac{\partial E^{(k)}(t)}{\partial w_{h_{i-1}h_i}^{(k)}} = 0 \end{cases} \quad (6.43)$$

$$0 < \varepsilon^- < 1 < \varepsilon^+$$

gde su:

ε^+ – parametar uvećanja – *eng. training step increasing parameter* ($\varepsilon^+ = 1,2$) (Riedmiller i Braun, 1993), određuje se pre početka obučavanja VNM,

ε^- – parametar smanjenja – *eng. training step decreasing parameter* ($\varepsilon^- = 0,5$) (Riedmiller i Braun, 1993), određuje se pre početka obučavanja VNM,

Δ_{\min} – minimalni korak obučavanja – *eng. minimum training step* ($\Delta_{\min} = 0$) (Riedmiller i Braun, 1993), određuje se pre početka obučavanja VNM

Δ_{\max} – maksimalni korak obučavanja – *eng. maximum training step* ($\Delta_{\max} = 50$) (Riedmiller i Braun, 1993), određuje se pre početka obučavanja VNM

Po podešavanju korekcione vrednosti ($\Delta_{h_{i-1}h_i}^{(k)}$) pomoću izraza (6.43) određuju se promene vrednosti težine grana ($\Delta w_{h_{i-1}h_i}^{(k)}$) iz izraza (6.42), ali tako da se razlikuju dva slučaja proračuna iz sledećeg izraza:

$$\Delta w_{h_{l-1}h_l}^{(k)} = \begin{cases} -\text{sign}\left(\frac{\partial E^{(k)}(t)}{\partial w_{h_{l-1}h_l}^{(k)}}\right) \cdot \Delta_{h_{l-1}h_l}^{(k)}, & \frac{\partial E^{(k-1)}(t)}{\partial w_{h_{l-1}h_l}^{(k-1)}} \cdot \frac{\partial E^{(k)}(t)}{\partial w_{h_{l-1}h_l}^{(k)}} \geq 0 \\ -\Delta w_{h_{l-1}h_l}^{(k-1)}, & \frac{\partial E^{(k)}(t)}{\partial w_{h_{l-1}h_l}^{(k)}} = 0, \frac{\partial E^{(k-1)}(t)}{\partial w_{h_{l-1}h_l}^{(k-1)}} \cdot \frac{\partial E^{(k)}(t)}{\partial w_{h_{l-1}h_l}^{(k)}} < 0 \end{cases} \quad (6.44)$$

Izrazi (6.42) i (6.44) određuju i tip RPROP algoritma (Igel i Husken, 2003). Izraz (6.42) predstavlja **RPROP**⁻ algoritam dok izraz (6.44) predstavlja **RPROP**⁺ algoritam.

2) Njutnov metod korekcije težina (BFGS algoritam)

Njutnov metod korekcije vrednosti težina grana mreže predstavlja jedan od najmoćnijih alata za obučavanje. Poboljšanje u brzini obučavanja mreže se postiže uključivanjem viših redova funkcije ukupne greške (E) koja postaje funkcija cilja i koju treba minimizirati. Funkcija cilja se razvija u Tejlorov red (Šami, 1994) prema sledećem izrazu:

$$E^{(k)}(t) = E(\tilde{W}^{(k)}) = E(\tilde{W}^{(k-1)}) + (\tilde{W}^{(k)} - \tilde{W}^{(k-1)})^T \sum_{u=1}^{\infty} \frac{1}{u!} \nabla^u E(\tilde{W}^{(k-1)}) \cdot (\tilde{W}^{(k)} - \tilde{W}^{(k-1)})^{u-1} \quad (6.45)$$

gde je $\tilde{W}^{(k)}$ vektor težina definisan na sledeći način:

$$\tilde{W}^{(k)} = (\dots, w_{h_{l-1}1}^{(k)}, \dots), \quad l = 1, 2, \dots, q+1, k = 1, 2, \dots, r \quad (6.46)$$

Ako se zanemare vrednosti koje su veće od dva za promenljivu u i ako se potraži minimum funkcije cilja kao izvod funkcije cilja izjednačen sa nulom ($\nabla E(\tilde{W}^{(k)}) = 0$) dobiće se promena vrednosti težina grana mreže prema sledećem izrazu (Moreira i Fiesler, 1995):

$$\tilde{W}^{(k+1)} - \tilde{W}^{(k)} = -B^{-1}(\tilde{W}^{(k)}) \cdot \nabla E(\tilde{W}^{(k)}) \quad (6.47)$$

gde je B Hesijanova matrica (matrica parcijalnih drugih izvoda) (Zhu i dr., 1997). Kao što se vidi iz prethodnog izraza Njutnov metod korekcije težina zavisi potpuno od Hesijanove matrice. Proračun Hesijanove matrice u svakom koraku je nepraktičan i težak, te se umesto njega uvodi izraz Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) (Moreira i Fiesler, 1995).

Njutnov metod korekcije vrednosti težina grana mreže ima niz nedostataka kao što su komplikovan proračun vrednosti težina grana mreže ili nemogućnost primene na slučajeve gde postoje ograničenja za minimalne i maksimalne vrednosti težina grana mreže (Zhu i dr., 1997). Zbog toga su pomenuti autori predložili modifikovan BFGS

algoritam koji se još naziva i L-BFGS-B algoritam i može se formulirati na sledeći način:

$$\min E(\tilde{W}^{(k)}) \quad (6.48)$$

uz ograničenja:

$$L_{broj} \leq w_{h_{l-1}}^{(k)} \leq U_{broj}, \quad l = 1, 2, \dots, q+1, k = 1, 2, \dots, r \quad (6.49)$$

gde su:

L_{broj} – minimalna vrednost za $w_{h_{l-1}}^{(k)}$,

U_{broj} – maksimalna vrednost za $w_{h_{l-1}}^{(k)}$

Obzirom da je u praksi i dalje potrebno računati Hesijanovu matricu, čime se ceo potupak minimizacije funkcije cilja komplikuje, uvedena je računski jednostavnija optimizaciona metoda, tj. kvazi Njutnova metoda ili algoritam konjugovanih pravaca.

3) Algoritam konjugovanih pravaca

Algoritam konjugovanih pravaca u praksi najčešće ne zahteva računanje matrice Hesijana. Ključni faktor za efikasnost ovog algoritma i rešavanje problema minimizacije zadate funkcije cilja je određivanje pravca pretrage u svakoj iteraciji. Metoda ima jedno posebno svojstvo, a to je da se novi pravac pretrage može izračunati samo na osnovu prethodnog pravca pretrage. Time se ne oduzima puno prostora za memorisanje podataka na računaru tokom obučavanja mreže (Stanimirović, 2008). Algoritam se sastoji iz sledećih koraka:

KORAK 1. Zadati vektor početnih vrednosti težina grana mreže $\tilde{W}^{(0)} = (w_{h_{l-1}1}^{(0)}, w_{h_{l-1}2}^{(0)}, \dots, w_{h_{l-1}h_l}^{(0)})$. Proračunati početni pravac pretrage $(d^{(0)})$ pomoću sledećeg izraza:

$$d^{(0)} = E(\tilde{W}^{(0)}) \quad (6.50)$$

Ako je $d^{(0)} = 0$ stati, u suprotnom staviti da je $k = 0$ i preći na korak 2.

KORAK 2. Izračunati skalar $\alpha^{(k)}$ kojim se minimizira funkcija cilja $E(\tilde{W}^{(k)} + \alpha^{(k)}d^{(k)})$ prema linijskom pretraživanju (Gill i Murray, 1974)

KORAK 3. Promeniti vrednosti težina grana mreže prema sledećem izrazu:

$$\tilde{W}^{(k+1)} = \tilde{W}^{(k)} + \alpha^{(k)}d^{(k)} \quad (6.51)$$

KORAK 4. Proračunati $d^{(k+1)}$. Ako je $k \bmod H_l = 0$ za $l = 1, 2, \dots, q+1$ onda restartovati algoritam i postaviti da je $d^{(k+1)} = E(\tilde{W}^{(k+1)})$. U suprotnom postaviti da je

$$d^{(k+1)} = E(\tilde{W}^{(k+1)}) + \beta^{(k)} d^{(k)} \quad (6.52)$$

KORAK 5. Ukoliko je postignut minimum, obučavanje se završava, a vrednosti težina grana u tom trenutku se usvajaju kao konačne. U suprotnom se postavlja $k = k + 1$ i ide na korak 2.

Proračun parametra β_k se vrši na osnovu različitih izraza prikazanih u sledećim radovima: Hestenes i Stiefel (1952), Fletcher i Reeves (1964) i Polak (1971).

4) Njutn – Konjugovani gradijent

Algoritam Njutn-konjugovani gradijent pripada klasi algoritama za rešavanje optimizacionih problema sa ogromnim brojem podataka (Nash, 2000). Koristi se za rešavanje optimizacionih problema u kojima se minimizira određena funkcija (u ovoj disertaciji funkcija cilja E). Osnovni oblik problema primenjen na VNM može se formulisati na sledeći način:

$$\min E(\tilde{W}^{(k)}) \quad (6.53)$$

uz ograničenja:

$$\nabla E(\tilde{W}^{(k)}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots \quad (6.54)$$

$$B(\tilde{W}^{(k)}) \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots \quad (6.55)$$

Algoritam za rešavanje ovakvog tipa optimizacije je skoro potpuno isti kao i algoritam konjugovanih pravaca, osim u unutrašnjem iterativnom delu gde se za određivanje pravca pretrage ($d^{(k)}$) koristi više promenljivih. Pravac pretrage se određuje pomoću sledećeg sistema linearnih jednačina (Al-Haik i dr., 2003):

$$B(\tilde{W}^{(k)}) \cdot d^{(k)} = -\nabla E(\tilde{W}^{(k)}) \quad (6.56)$$

Glavni problem predstavlja Hesijanova matrica ($B(\tilde{W}^{(k)})$) zbog koje se može desiti da algoritam ne konvergira, odnosno da nema svojstvo spusta (Stanimirović, 2008). Zato se u unutrašnjem delu algoritma uvodi iterativna procedura kojom se garantuje konvergencija tokom obučavanja mreže i ispunjava sledeća nejednakost:

$$E(\tilde{W}^{(k+1)}) < E(\tilde{W}^{(k)}) \quad (6.57)$$

Ipak, i ovaj algoritam ima nedostataka. Kada je Hesijanova matrica singularna³⁹, algoritam nema uvek svojstvo spusta, te je konvergencija spora i lošeg kvaliteta, tj. daje tek neznatno smanjenje greške E . Za razliku od algoritma konjugovanih pravaca algoritam Njutn-konjugovanog gradijenta sadrži komplikovan proračun u okviru unutrašnjeg iterativnog dela. Zbog takve osobine su mnogi autori ispitivali svrsishodnost upotrebe. Prilikom obučavanja VNM na numeričkim primerima sa podacima dobijenih iz eksperimentalnih ispitivanja potiskivanih sklopova Njutn-konjugovani gradijent je najbrže konvergirao ka lokalnom minimumu i uz to je davao rezultate sa najmanjom greškom u poređenju sa prethodna tri algoritma (RPROP algoritam, BFGS algoritam i algoritam konjugovanih pravaca (Radonjić i dr., 2012)). Zbog toga će se u daljem proučavanju u ovoj disertaciji koristiti algoritam Njutn-konjugovani gradijent. Primene Njutn-konjugovanog gradijenta su različite i obuhvataju *modeliranje vremenske prognoze, minimizaciju energije, molekularnu geometriju* itd. (Nash, 2000).

6.5. Metode obučavanja veštačkih neuronskih mreža sa učiteljem

Početne težine grana mreže određuju se jednim od navedenih algoritama stohastičke ili numeričke optimizacije koji su objašnjeni u potpoglavlju 6.4.3.6. Optimalne težine grana mreže se dobijaju kada je ukupna greška E (posle dovoljnog broja iteracija) manja od neke unapred određene brojne vrednosti. Cilj obučavanja VNM je da se dobiju težine grana kojima se proračunavaju izlazne vrednosti za sve „moguće“ ulazne vrednosti.

Generalizacija VNM se ogleda u tačnosti izlaznih vrednosti za pojedine „nove“ ulazne vrednosti koje nisu bile deo procesa obučavanja. Ukoliko mreža na izlazu daje vrednosti koje imaju veliku preciznost, kaže se da mreža *ispravno generalizuje (uopštava) stečeno znanje*. Sledeće pitanje koje se postavlja je sa koliko parova (ulaz, izlaz) iz skupa za obučavanje početi sa obučavanjem mreže. U literaturi postoje različite preporuke o veličini skupa za obučavanje, ali gotovo svi autori koriste obučavajući skup koji čini 75-80% parova (ulaz, izlaz) od ukupnog broja parova (ulaz, izlaz). Ukoliko je broj parova ispod navedenog procenta najčešće se dešava da mreža ne može ispravno da uopštava stečeno znanje niti na obučavajućem skupu, niti na test skupu (skupu koji čine

³⁹ Matrica je singularna ako joj je determinanta jednaka 0. Singularna matrica nema inverzne matrice.

preostali parovi iz ukupnog skupa, a koji ne pripadaju skupu za obučavanje). U slučaju da obučavajući skup čini više od 80% parova dolazi do pojave premašivanja (precejivanja) koja se naziva „overfitting“, tako da je mreža za zadati obučavajući skup dobro obučena, dok za test skup ima veliku verovatnoću lošeg uopštavanja.

Na kraju, i pored dobrog brojnog odnosa obučavajućeg skupa i test skupa, može da se dogodi da mreža ima loše uopštavanje. Loše uopštavanje može da se otkloni tako što se napravi drugačija preraspodela podataka iz ukupnog skupa na obučavajući skup i test skup (Radonjić i dr., 2012). U literaturi postoje različite tehnike i predložena rešenja za preraspodelu podataka iz ukupnog skupa na obučavajući i test skup, ali u ovoj disertaciji one neće biti navedene. Razlog tome leži u činjenici što je u ovoj disertaciji korišćena metoda slučajnog broja za raspodelu parova (ulaz, izlaz) na obučavajući skup.

Da bi VNM dobro uopštavala stečeno znanje potrebno je da male promene ulaznih vrednosti u mreži ne izazivaju velike promene izlaznih vrednosti iz mreže. Uopštavanje je proces koji se odvija sa obučavanjem mreže, a poboljšanje uopštavanja se postiže različitim metodama. Najvažniji cilj koji se postiže obučavanjem je da se napravi takva arhitektura VNM koja će u isto vreme da ima dovoljno mali broj čvorova (i kratko vreme obučavanja), ali i dobro svojstvo uopštavanja stečenog znanja (Setiono, 2001).

Ipak, prvi korak ka svojstvu dobrog uopštavanja i odabira arhitekture mreže jeste podela ukupnog skupa parova (ulaz, izlaz) podataka $(S_r^{(X,D)})$, odnosno preraspodela podataka iz ovog skupa od r' elemenata. Ukupan skup parova podataka se deli na skup parova podataka za obučavanje $(S_r^{(X,D)}, S_r^{(X,D)} \subset S_r^{(X,D)})$ sa r elemenata

$$r = |S_r^{(X,D)}| \wedge k = 1, 2, \dots, r \quad (6.58)$$

i skup parova podataka za testiranje $(S_{r''}^{(X,D)}, S_{r''}^{(X,D)} \subset S_{r'}^{(X,D)})$ sa $r'' = r' - r$ elemenata:

$$r'' = |S_{r''}^{(X,D)}| \wedge k'' = 1, 2, \dots, r'' \quad (6.59)$$

Skup parova podataka za obučavanje $(S_r^{(X,D)})$ se koristi da se tokom obučavanja mreže, težine grana podese tako da daju prihvatljivu ukupnu grešku E .

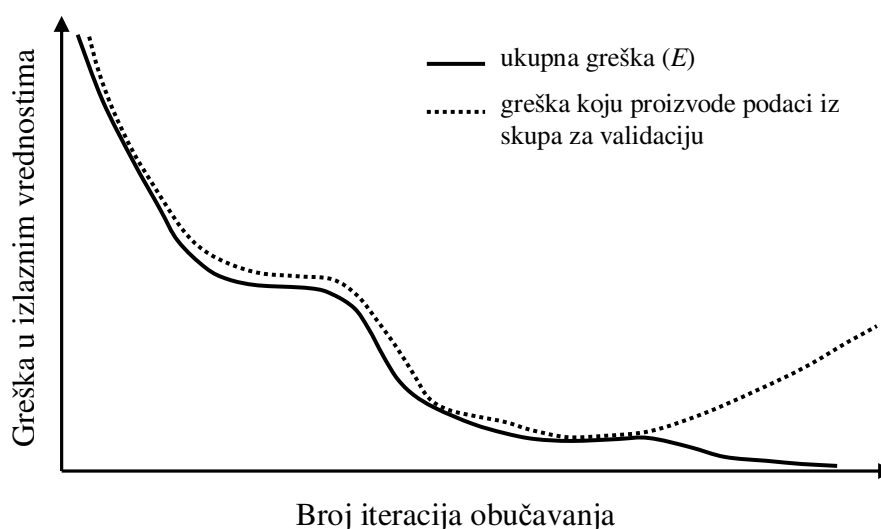
Međutim, da bi se to postiglo, iz skupa parova podataka za obučavanje se izdvaja jedan podskup podataka koji se naziva skup parova podataka za validaciju $(S_{r'''}^{(X,D)}, S_{r'''}^{(X,D)} \subset S_r^{(X,D)})$ sa r''' elemenata

$$r''' = |S_{r'''}^{(X,D)}| \wedge k''' = 1, 2, \dots, r''' \quad (6.60)$$

koji služi da se minimizira precenjivanje. Ovaj skup ne može da služi za podešavanje vrednosti težina grana mreže. On služi samo da pokaže da li smanjivanje ukupne greške E vodi ka daljem povećanju u preciznosti proračuna izlaznih vrednosti koje pripadaju skupu parova podataka koji nisu bili obučavani (npr. podaci iz skupa parova podataka za validaciju). I dok se skup parova podataka za obučavanje koristi kako bi se utvrdila ukupna greška E ili za određivanje arhitekture VNM, skup parova podataka za testiranje se koristi tek po završetku obučavanja mreže samo da bi potvrdilo dobro ili loše svojstvo uopštavanja stečenog znanja mreže. Skup parova podataka za testiranje nikada ne bi smeo da se koristi za određivanje arhitekture VNM (Ripley, 1996).

Na ovaj način je moguće izdvojiti od celokupnog skupa rednih brojeva merenja (S_r) skup brojeva merenja za obučavanje VNM (S_r), skup brojeva merenja za testiranje VNM ($S_{r'}$) i skup brojeva merenja za validaciju VNM ($S_{r''}$).

Ukoliko ukupna greška opada, a greška koju proizvode podaci iz skupa za validaciju raste (odnosno, pomenuta preciznost kod skupa za validaciju stagnira ili opada), onda je to znak da se dešava precenjivanje i da je potrebno zaustaviti obučavanje mreže (videti Sliku 6.11). Za merodavne vrednosti težina grana mreže uzimaju se one vrednosti koje su dobijene u trenutku (ili pri iteraciji) kada je greška koju proizvode podaci iz skupa za validaciju dostigla minimum. Ovakav pristup daje dobru generalizaciju neuronske mreže i naziva se *rano zaustavljanje* (eng. *early stopping*) (Priddy i Keller, 2005).



Slika 6.11. Ukupna greška (E) i greška koju proizvode podaci iz skupa za validaciju u zavisnosti od broja iteracija ili vremena obučavanja (Priddy i Keller, 2005)

6.6. Broj čvorova u skrivenom sloju

Broj čvorova u skrivenom sloju predstavlja nezaobilazno pitanje u svakoj primeni VNM sa prostiranjem signala unapred. Određivanje broja čvorova može biti empirijsko (iskustveno) ili primenom analitičkih izraza. Kod iskustvenih obrazaca započinje se početnim brojem čvorova u skrivenom sloju manjim od broja čvorova u ulaznom sloju. Zatim se proračunava ukupna greška (E) kao funkcija broja čvorova u skrivenom sloju. Ako obučavanje mreže nije zadovoljavajuće, potrebno je pokušati dalje smanjivanje greške (E) povećavanjem broja čvorova u skrivenom sloju (Priddy i Keller, 2005). Ukupna greška (E) dostiže određenu vrednost sa jednim čvorom u skrivenom sloju, zatim njena vrednost opada sa povećavanjem broja skrivenih čvorova, postiže minimum za određen broj skrivenih čvorova, da bi se polako povećavala ili stagnerala sa daljim povećanjem broja čvorova u skrivenom sloju (Radonjić i dr., 2013).

Ukupna greška dostiže velike vrednosti sa malim brojem čvorova u skrivenom sloju. Povećavanjem broja čvorova greška opada do minimuma, a onda opet počinje blago da raste ili da stagnira. Međutim, tokom povećanja broja čvorova u skrivenom sloju, dešava se i promena greške koja se javlja kod podataka za testiranje. Ova greška je velika kod malog broja čvorova u skrivenom sloju (baš kao i ukupna greška), sa povećavanjem broja čvorova u skrivenom sloju dostiže minimum, da bi daljim povećavanjem broja čvorova postajala sve veća. Obe greške, i ukupna greška i greška kod podataka za testiranje za mali broj čvorova u skrivenom sloju sugerišu da je došlo do pojave potcenjivanja (*eng. underfitting*). Pojava potcenjivanja se objašnjava nedovoljnom složenošću modela da opiše zavisnosti između ulaznih i izlaznih podataka.

Sa druge strane, tokom obučavanja sa velikim brojem čvorova u skrivenom sloju, ukupna greška blago raste, dok greška kod podataka za testiranje ponovo iz minimuma prelazi u maksimum. Zbog toga se, tokom obučavanja mreže sa velikim brojem čvorova u skrivenom sloju pravi pojava premašivanja čime mreža gubi svojstvo dobre generalizacije. Dakle, broj čvorova koji se usvaja za obučavanje mreže nalazi se između ova dva ekstrema.

Jedan od metoda kojim se usvaja (određuje) broj čvorova u skrivenom sloju od više ponuđenih arhitektura neuronskih mreža (sa različitim brojem neurona u skrivenom sloju) jeste Akaike informacioni kriterijum (*eng. Akaike Information Criterium* – skraćeno i u daljem tekstu AIC). Međutim, da bi se AIC metod primenio potrebno je prvo odrediti arhitekturu neuronske mreže. Kao što je opisano u poglavlju 6.3 višeslojna

VNM može imati jedan (videti Sliku 6.6) ili više skrivenih slojeva (videti Sliku 6.10). Pre nego što se odredi broj čvorova u skrivenom sloju, potrebno je odrediti i broj skrivenih slojeva u mreži. Povećanje broja skrivenih slojeva je u vezi sa aproksimacijom neke nepoznate funkcije. Najvažnije pitanje je koliko dobro VNM aproksimira nepoznatu funkciju. Teorema o univerzalnoj aproksimaciji koja je prikazana u sledećim radovima: Hornik i dr. (1989) i Cybenko (1989) u Vukadinović (1997) tvrdi da nezavisno od algoritma obučavanja, zajednička osobina svih višeslojnih veštačkih neuronskih mreža je da su oni univerzalni aproksimatori i glasi:

„Veštačka neuronska mreža sa jednim skrivenim slojem može da aproksimira bilo koju neprekidnu funkciju do nekog željenog stepena tačnosti pod uslovom da sadrži dovoljan broj čvorova u skrivenom sloju“.

Dokaz teoreme se zasniva na teoremi Kolmogorova (1957). Ovom teoremom je dokazano da bilo koja neprekidna funkcija definisana na m -dimenzionalnom prostoru ($m \geq 2$) može da se predstavi kao zbir neprekidnih funkcija čiji su argumenti zbrovi neprekidnih funkcija jedne promenljive (Vukadinović, 1997). Hecht-Nielsen (1987) je uveo ovu teoremu u obučavanje VNM tako što je dokazao da bilo koja neprekidna funkcija definisana na intervalu $[0,1]$ može biti predstavljena VNM sa jednim skrivenim slojem i sa tačno $2m+1$ čvorova u skrivenom sloju. Pravilo $2m+1$ čvorova se može primeniti na dvoslojnu veštačku neuronsku mrežu čije su aktivacione funkcije u skrivenom i izlaznom sloju sigmoidne.

Povećavanje broja skrivenih slojeva dovodi do produžavanja vremena obučavanja iako se, možda, broj iteracija obučavanja smanjio. Produženo obučavanje mreže ima niz nedostataka, a najveći nedostatak jeste loše uopštavanje stečenog znanja. Razlog lošeg uopštavanja je prevelik broj čvorova. Zato se upotrebljavaju VNM sa jednim skrivenim slojem, a retko se dodaje još jedan skriveni sloj u cilju boljeg uopštavanja stečenog znanja. Huang i Babri (1997) i Huang (2003) su pokazali da je svrha drugog skrivenog sloja da drastično smanji ukupan broj čvorova u skrivenim slojevima.

Ipak, precizan broj čvorova u skrivenom sloju koji su potrebni da bi se obučila VNM ostaje otvoreno pitanje. U ovoj disertaciji je korišćen sledeći izraz za proračun maksimalnog broja čvorova u skrivenom sloju kod VNM sa prostiranjem signala unapred i jednim skrivenim slojem (Ren i Zhao, 2002):

$$H_1 < \frac{r-1}{m+2} \quad (6.61)$$

6.6.1. Primena Akaike informacionog kriterijuma kod usvajanja arhitekture veštačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unapred

AIC metod „kažnjava“ složenost arhitekture VNM. To znači da arhitekture sa velikim brojem čvorova u skrivenom sloju imaju manju šansu za odabir prema AIC metodi (Zhao i dr., 2008 i Ren i Zhao, 2002). Ukoliko se izraz (6.61) iskoristi za proračun maksimalnog broja čvorova u skrivenom sloju, dobiće se jedan skup od više VNM koje se razlikuju samo po broju čvorova u skrivenom sloju. Sada je moguće primeniti AIC metod, obzirom da se različite arhitekture iz pomenutog skupa mogu smatrati za različite modele koje će AIC metod da rangira. Ipak, da bi se rangiranje obavilo potrebno je da se za svaki model odredi njegova AIC vrednost. Ukoliko je AIC vrednost manja, onda se smatra da je model (u ovom slučaju VNM) prihvatljivija.

AIC vrednost se bazira na ukupnom procenjenom broju parametara VNM (N_{nm}) i veličini skupa za obučavanje (r). Procenjeni broj parametara (N_{nm}) se računa kao zbir ukupnog broja težina grana mreže ($w_{h_l-h_l}$ gde je $l = 1, 2, \dots, q+1$) i dodatnog parametra ($\hat{\sigma}^2$) srednje kvadratne greške (eng. mean squared error – MSE) modela VNM. Srednja kvadratna greška se proračunava pomoću sledećeg izraza:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{2}{r} E^{(r)}(t) = \frac{1}{r} \sum_{k=0}^{r-1} \sum_{j=1}^n \left(D_j^{(r-k)} - Y_j^{(r-k)} \right)^2 \quad (6.62)$$

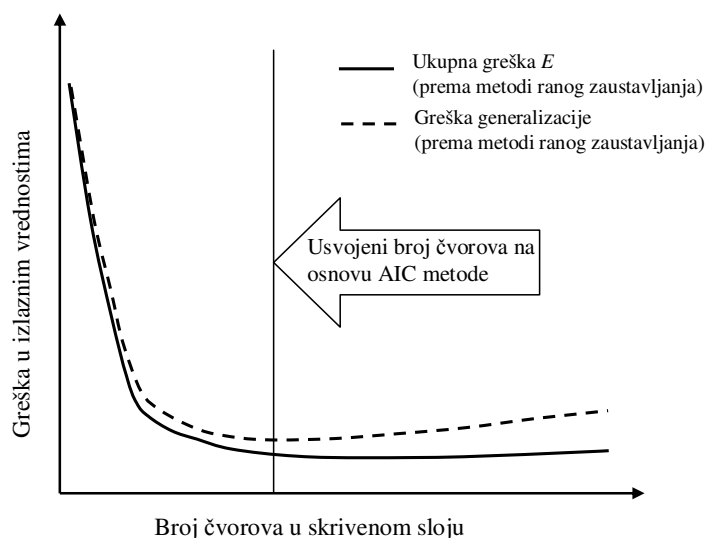
Kada se odredi maksimalan broj čvorova u skrivenom sloju prema izrazu (6.61) za svaku od VNM sa brojem čvorova manjim od maksimalnog broja čvorova proračunava se AIC vrednost (Ren i Zhao, 2002) i korigovana AIC vrednost (AIC_k) (Sugiura, 1978) pomoću sledećeg izraza:

$$AIC = \begin{cases} r \cdot \log(\hat{\sigma}^2) + 2 \cdot N_{nm} & \text{za } \frac{r}{N_{nm}} \geq 40 \\ r \cdot \log(\hat{\sigma}^2) + 2 \cdot N_{nm} + \frac{2N_{nm}(N_{nm}+1)}{r - N_{nm} - 1} & \text{za } \frac{r}{N_{nm}} < 40 \end{cases} \quad (6.63)$$

Proračunate AIC ili AIC_k vrednosti se za svaku pojedinačnu VNM rangiraju prema veličini vrednosti. VNM sa najmanjom AIC vrednošću se usvaja za obučavanje.

Ideja da se primeni AIC metod potiče iz činjenice da se prihvata ona VNM kod koje postoji najbolje uopštavanje stečenog znanja. Da bi se otkrilo koje je to najbolje uopštavanje stečenog znanja proračunava se greška koja se javlja po obučavanju VNM i koja se računa na celokupnom skupu podataka (koji obuhvata skup za obučavanje i skup

za testiranje). Ova greška se još naziva i greška generalizacije ili uopštavanja i ona stoji u odnosu sa ukupnom greškom kao što je prikazano na Slici 6.12.



Slika 6.12. Broj čvorova u skrivenom sloju koji se usvaja na osnovu AIC metode i koristi za obučavanje VNM

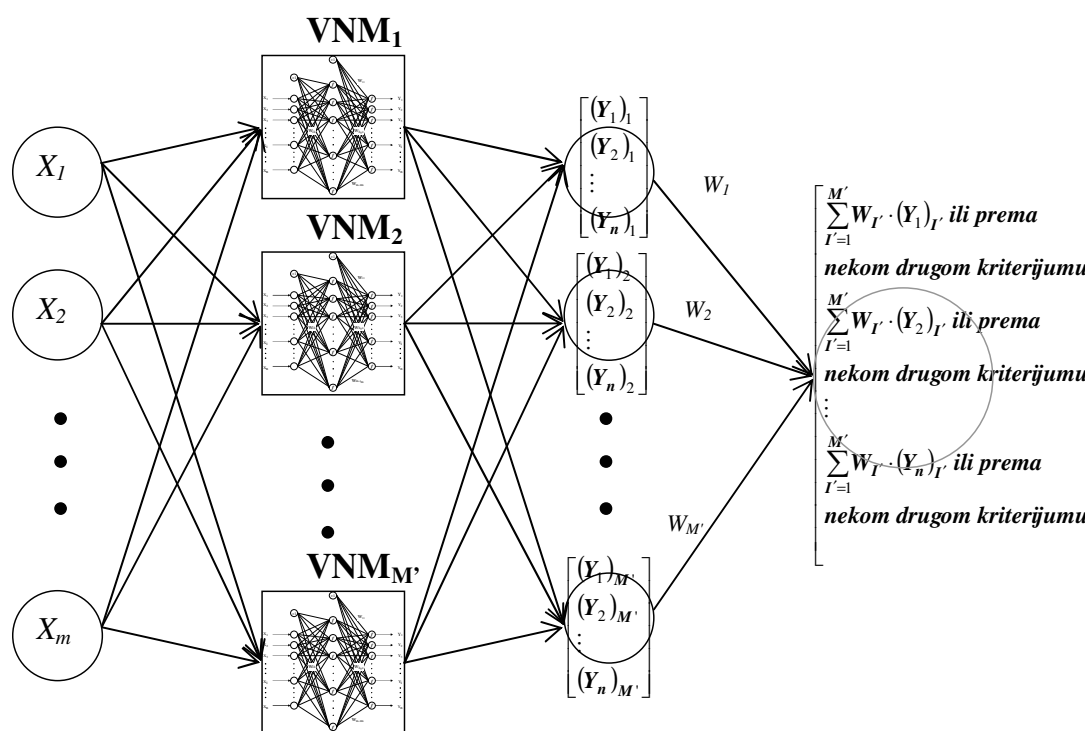
Kao što se sa Slike 6.12 vidi, AIC metod služi da se odabere VNM sa brojem čvorova u skrivenom sloju tako da joj sposobnost uopštavanja stečenog znanja bude najbolja, odnosno da joj greška generalizacije bude na minimumu.

6.7. Skupovi veštačkih neuronskih mreža

Više veštačkih neuronskih mreža, koje su prethodno nezavisno formirane i obučavane, a zatim sastavljene u jedan skup (*eng. ensemble*) potiče od originalnog rada Hansena i Solomona (Hansen i Salamon, 1990). Formiranje se vrši tako što se pojedinačne VNM različitih ili istih arhitektura uključuju u početni skup iz koga se određenim matematičkim metodama izdvaja jedan podskup ovog skupa VNM. Podskup, takođe, predstavlja skup VNM (u daljem tekstu model skupa VNM) – videti Sliku 6.13. Ovaj novi model skupa VNM čine mreže koje se spajaju u jednu celinu. Prednost ovakvog načina kombinovanja VNM predstavlja bolja sposobnost uopštavanja stečenog znanja od svake pojedinačne mreže koja pripada modelu skupa VNM. Broj početnih skupova nije ograničen. To znači da je moguće formirati više početnih skupova, a zatim da se iz svakog skupa izdvoji po jedan pripadajući podskup. Novi podskupovi se porede na osnovu sposobnosti uopštavanja stečenog znanja, a podskup sa najboljim uopštavanjem se usvaja kao model skupa VNM (Giacinto i Roli, 2001).

Hansen i Salamon (1990) su dokazali da uopštavanje stečenog znanja (odnosno, mera učinka mreže) može značajno da se poboljša kroz stvaranje modela skupa VNM (videti Sliku 6.13). U ovom skupu VNM ulazni podatak prolazi kroz sve mreže pripadnice skupa, a izlazni podatak se dobija tako što se odabira onaj sa najmanjim odstupanjem od prvobitnog poznatog izlaznog podatka ili po nekom usvojenom kriterijumu. Sve veštačke neuronske mreže, članice modela skupa VNM su obučavane da reše isti problem. Ključ bolje preciznosti izlaznih podataka drži raznovrsnost u izlaznim podacima svake pojedinačne mreže u skupu, broj VNM u skupu, ali i dobro uopštavanje stečenog znanja svake pojedinačne mreže u skupu. To znači da će mreže pripadnice skupa biti birane da uđu u skup na osnovu preciznosti izlaznih podataka ili nekog drugog kriterijuma i različitosti u izlaznim podacima jedne mreže u odnosu na drugu. Na taj način se dobijaju težine grana u skupu VNM koje, u stvari, predstavljaju doprinos svake mreže modelu skupa VNM (Zhao i dr., 2008) (videti Sliku 6.13).

Skupove VNM su, takođe, istraživali Perrone i Cooper (1993) i Hansen i Salamon (1990). Danas se ovakav koncept veštačkih neuronskih mreža sreće u mnogim oblastima kao što su predviđanje pouzdanosti softvera (Zheng, 2009), odlučivanje u finansijama (West i dr., 2005) ili klasifikacija elektronskih slika (Giacinto i Roli, 2001).



Slika 6.13. Arhitektura skupa veštačkih neuronskih mreža

Glavni zadatak kod pravljenja skupova VNM je da se omogući izdvajanje je efektivnih podskupova VNM koji su sadržani u osnovnom skupu. Popunjavanje skupa

započinje razmatranjem različitih arhitektura koje će kasnije da uđu u skup. Tako, u skup mogu ući mreže sa prostiranjem signala unapred, potpuno povezane mreže, celularne mreže itd. Izdvajanje merodavnog podskupa iz skupa se vrši pomoću različitih metoda. Ove metode se zasnivaju na promeni parametara vezanih za konstrukciju i obučavanje VNM. Prema promeni pomenutih parametara metode se mogu podeliti na (Giacinto i Roli, 2001):

- Metode kojima se vrši promena početnih vrednosti težina grana mreža u skupu na osnovu kojih se izdvajaju podskupovi VNM,
- Metode kojima se formira podskup na osnovu izmenjenih arhitektura VNM (uglavnom se svode na promenu broja čvorova),
- Metode kojima se formira podskup na osnovu različitih konfiguracija VNM,
- Metode kojima se vrši promena obučavajućeg skupa podataka za svaku novu mrežu u skupu, čime se pravi podskup mreža sa najboljim uopštavanjem stečenog znanja.

Metode ne garantuju da će model skupa VNM imati najbolje svojstvo uopštavanja stečenog znanja. Pomenutim metodama se može izdvojiti više podskupova, od kojih se bira jedan, koji se usvaja kao konačni. Dakle, da bi se podskup izdvojio potrebno je spojiti mreže sa najboljom sposobnošću uopštavanja stečenog znanja. Spajanje mreža se odvija u dva pravca. Prvi pravac predstavlja „direktnu“ strategiju kojom veštačke neuronske mreže sa najboljim uopštavanjem stečenog znanja direktno ulaze u model skupa VNM. Druga strategija predstavlja „dobijanje više rezultata i izbor“ po kojoj se dobija početni skup sa velikim brojem mreža. Mreže se potom uparuju ali tako da svojstvo dobrog uopštavanja stečenog znanja jedne mreže pokriva „mesta“ lošeg uopštavanja druge mreže. Ipak, ponekada i to nije dovoljno da bi se dobio podskup koji daje najbolje izlazne rezultate. Kao primer koji pokazuje koliko je teško kombinovati mreže u skupu može poslužiti samo mogući broj kombinacija VNM koji je

$$\text{jednak } \sum_{I=1}^M \binom{M}{I}.$$

U ovoj disertaciji će biti pomenute najvažnije metode kojima se vrši izdvajanje modela skupa VNM. Prva metoda je metoda „Bootstrap aggregating“ (Breiman, 1996). Njom se obučava M' VNM (videti Sliku 6.13), pri čemu se obučavajući skup menja sa svakim novim obučavanjem mreže. Cilj metode je da se popravi svojstvo uopštavanja stečenog znanja jedne VNM tako što se vrši smanjivanje disperzije tokom dužeg

obučavanja mreže. Druga metoda je metoda „Boosting“ (Schapire, 1990). Ovom metodom se pravi model skupa VNM čiji su obučavajući skupovi podataka određeni na osnovu određenih „klasifikatora“. Najčešći klasifikator je verovatnoća da će u jednom obučavanju mreže biti postignuto minimalno poboljšanje svojstva uopštavanja stečenog znanja mreže. Jasno je da se ovom metodom tokom više obučavanja mreže koriste različiti obučavajući skupovi podataka. Najvažnije je usvojiti klasifikator kojim se definiše minimalno poboljšanje uopštavanja stečenog znanja mreže.

Osim prethodne dve metode koje su široko primenjene na skupove VNM, u ovoj disertaciji će biti detaljno objašnjena i metoda kreiranja skupa VNM upotrebom Akaike informacionog kriterijuma. Metoda je korišćena u ovoj disertaciji za formiranje modela skupa VNM i proračun vrednosti težina grana ($W_{I'}, I' = 1, 2, \dots, M'$) svake pojedinačne VNM (*eng. component network weight*) u modelu skupa VNM.

6.7.1. Formiranje modela skupa VNM na osnovu Akaike informacionog kriterijuma

Akaike informacioni kriterijum primenjen kod usvajanja arhitekture VNM sa prostiranjem signala unapred je objašnjen u poglavlju 6.6.1. Kao što je već navedeno, prvo mora da se formira skup VNM iz kojeg će se izdvojiti model skupa VNM. Neka je S obeležen skup VNM, M je broj VNM koje su ušle u skup, S^* je model skupa VNM, a M' je broj veštačkih neuronskih mreža koje se nalaze u modelu skupa VNM. Dakle, potrebno je pronaći S^* pri čemu je $S^* \subseteq S$. Broj M se određuje na osnovu izraza (6.61).

Izdvajanje podskupa S^* teče u nekoliko faza. Prvo se iz celokupnog uzorka podataka formiraju obučavajući skup i skup za testiranje, koji ostaju isti za sve VNM iz skupa do kraja obučavanja i testiranja. Zatim se određuju početne težine grana mreža na osnovu metodologije pokazane u poglavlju 6.4.3.1. Metoda obučavanja mreža iz skupa S je ista za sve i u ovoj disertaciji je primenjena metoda ranog zaustavljanja. Na kraju se određuju *AIC* vrednosti mreža.

Po proračunavanju *AIC* vrednosti svake pojedinačne VNM, vrši se rangiranje mreža prema *AIC* vrednosti i to od najmanje ka najvećoj *AIC* vrednosti (Zhao i dr., 2008). Tri ili četiri VNM sa najmanjim *AIC* vrednostima se izdvajaju iz skupa čineći podskup VNM koji postaje i model skupa VNM (S^*). Ukoliko je skup S popunjen veštačkim neuronskim mrežama sa prostiranjem signala unapred i sa jednim skrivenim slojem, model skupa VNM će se sastojati od mreža koje imaju različite brojeve čvorova

u jedinom skrivenom sloju $((H_1)_{I'})$. Minimalne *AIC* vrednosti mreža garantuju da tri ili četiri mreže iz modela skupa VNM imaju najbolje uopštavanje stečenog znanja (Zhao i dr., 2008).

Kada je formiran model skupa VNM sledeća faza je dodatno obučavanje sastavnih mreža. Ove mreže se nazivaju *sastavne mreže* (eng. *component networks*) i obučavaju se još dodatnih 10 do 20 puta, a za konačno testiranje se usvajaju one koje imaju najmanju ukupnu grešku (E).

U ovoj disertaciji izlazne vrednosti iz modela skupa VNM su određene na osnovu kriterijuma najmanje apsolutne greške. To znači da se izlazne vrednosti modela upoređuju na osnovu apsolutnih grešaka dobijenih primenom svih sastavnih mreža u modelu. Ona izlazna vrednost čija je apsolutna greška manja od svih ostalih vrednosti apsolutnih grešaka dobijenih obučavanjem sastavnih mreža $((S_r)_1=(S_r)_2=\dots=(S_r)_{I'}=\dots=(S_r)_{M'})$ i $((S_{r''})_1=(S_{r''})_2=\dots=(S_{r''})_{I'}=\dots=(S_{r''})_{M'})$ biće odabrana da bude izlazna vrednost iz modela skupa VNM.

AIC metod ne pravi najbolje kombinacije sastavnih mreža, već dodatnim obučavanjem tih mreža pokušava da popravi svojstvo uopštavanja stečenog znanja.

Za sastavne mreže sa najmanjom ukupnom greškom (E) ponovo se proračunava *AIC* vrednost koja postaje *delta_AIC* vrednost sastavne mreže $(\Delta_{I'})$. Na osnovu te vrednosti proračunavaju se modifikovane *delta_AIC* vrednosti $(\Delta_m)_{I'}$ sastavnih mreža pomoću sledećeg izraza (Zhao i dr., 2008):

$$(\Delta_m)_{I'} = 1 + \frac{\Delta_{I'} - \min\{\Delta_{I'}\}}{\max_{I'}\{\Delta_{I'}\} - \min\{\Delta_{I'}\}} \cdot \beta_{M'} \quad (6.64)$$

gde su:

$$\Delta_{I'} = AIC_{I'} - \min_{I'}\{AIC_{I'}\},$$

$\beta_{M'}$ – konstanta koja se proračunava na osnovu sledećeg izraza:

$$\beta_{M'} = \frac{s_{\max}}{s_{\min}} \quad (6.65)$$

s_{\max} i s_{\min} su maksimalne i minimalne vrednosti *standardnog odstupanja* proračunatih izlaznih vrednosti na osnovu obučavanja jedne sastavne mreže, a koje pripadaju skupu za obučavanje (S_r) . Vrednost standardnog odstupanja (s_r) kada je $n = 1$ (što će biti slučaj u ovoj disertaciji) za svaku sastavnu mrežu se proračunava pomoću sledećeg izraza (Vukadinović i Popović, 1996):

$$s_{I'} = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{k=1}^r \left[(Y^{(k)})_{I'} - \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r (Y^{(k)})_{I'} \right]^2} \quad (6.66)$$

gde su:

Vrednosti težina grana ($W_{I'}$) svake pojedinačne VNM obrnuto su proporcionalne modifikovanim *delta_AIC* vrednostima $(\Delta_m)_{I'}$ sastavnih mreža. Zbir svih vrednosti težina grana u modelu skupa VNM jednak je 1. Vrednosti težina grana ($W_{I'}$) računaju se pomoću sledećeg izraza (Zhao i dr., 2008):

$$W_{I'} = \frac{1/(\Delta_m)_{I'}}{\sum_{I'=1}^{M'} 1/(\Delta_m)_{I'}} \quad (6.67)$$

Težine grana svake sastavne mreže ($W_{I'}$) određuju meru zastupljenosti svake sastavne mreže u modelu skupa VNM. Vrednosti $W_{I'}$ mogu biti između 0 i 1 prema izrazu (6.67). Ukoliko vrednost težine grane jedne od sastavnih mreža teži ka 1, model skupa VNM će težiti ka jednoj veštačkoj neuronskoj mreži. Vrednosti za $W_{I'}$ zavise od konstante $\beta_{M'}$. Ukoliko je $\beta_{M'} = 0$ dobiće se model skupa VNM u kome svaka sastavna mreža ima podjednak uticaj na izlazne vrednosti. Ako $\beta_{M'} \rightarrow \infty$ onda će vrednost težine grane jedne sastavne mreže težiti jedinici (Zhao i dr., 2008).

Kada se pomoću prethodnih izraza izdvoje VNM u model skupa, te proračunaju sve vrednosti težina grana ($W_{I'}$) svake sastavne mreže, vrši se testiranje modela skupa VNM na skupu podataka za testiranje. Na taj način se dobija greška generalizacije i određuje da li model skupa VNM ima dobro ili loše svojstvo uopštavanja stečenog znanja.

7. Primena veštačkih neuronskih mreža na proračun tehničko-eksploatacionog pokazatelja snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača

Stvaranje funkcionalnih modela od podataka dobijenih sa eksperimentalnih ispitivanja predstavlja prvu fazu proračuna snage brodova-potiskivača. U okviru ove faze je potrebno odabrati model, a zatim izvršiti modeliranje podataka sa eksperimentalnih ispitivanja. Prilikom odabira modela u ovoj disertaciji, pažnja je bila usmerena na modele koji se koriste za predviđanje izlaznih vrednosti podataka na osnovu vrednosti ulaznih podataka.

Razmatrane su matematička regresija i veštačke neuronske mreže. VNM imaju niz prednosti u odnosu na matematičku regresiju ukoliko se porede na osnovu podataka dobijenih sa eksperimentalnih ispitivanja brodova. Ove prednosti se ogledaju u svojstvima VNM koje se ne mogu pronaći u okviru matematičke regresije. Najvažnija svojstva su: ulazno-izlazno preslikavanje vrednosti ulaznih promenljivih u vrednosti izlazne promenljive podataka kroz proces obučavanja veštačkih neuronskih mreža, adaptivnost i modeliranje preslikavanja vrednosti ulaznih promenljivih u vrednosti izlazne promenljive kroz intenzitete povezanosti čvorova (vrednosti težina grana mreže).

Pod nepoznatim podacima u okviru modela VNM se podrazumevaju podaci koji nisu prošli obučavanje. Uopštena formulacija problema izrade modela se može izvesti na sledeći način (Reich i Berai, 2000):

„Za dati skup podataka za obučavanje $(S_r^{(X,D)})$ veličine r obučiti VNM pomoću trening parova $(X^{(k)}, D^{(k)})$ koji pripadaju skupu podataka za obučavanje tako da VNM može da proračuna $Y_j^{(k)}$ (predvidi $D_j^{(k)})$ za dato $X_i^{(k)}$ ($k' = 1, 2, \dots, r'$)“.

Formulacijom se izdvajaju tri „veličine“ od kojih zavisi kolika će biti tačnost izlaznih rezultata. To su: arhitektura VNM (u ovom slučaju alat za modeliranje),

veličina obučavajućeg skupa podataka $(\mathcal{S}_r^{(X,D)})$ i vrednosti trening parova $(\mathbf{X}_i^{(k)}, \mathbf{D}_j^{(k)})$. Svojstvo uopštavanja stečenog znanja VNM može da se izmeri greškom generalizacije i ukupnom greškom. Koliko je dobro svojstvo uopštavanja stečenog znanja ili valjanost rada modela VNM zavisi od ukupnog broja težina grana i uspešnosti obučavanja VNM (Rojas, 1996). Kod VNM sa prostiranjem signala unapred broj težina grana zavisi od broja čvorova u skrivenom sloju ako se pretpostavi da u arhitekturi mreže postoji potpuna povezanost čvorova. Broj čvorova u skrivenom sloju određuje da li će doći do pojave potcenjivanja ili precenjivanja. Broj težina grana određuje elastičnost neuronske mreže. Veliki broj težina grana dovodi do male ukupne greške i velike greške generalizacije (pojava precenjivanja), dok mali broj težina grana vodi ka velikoj ukupnoj grešci i velikoj grešci generalizacije (pojava potcenjivanja) (Rojas, 1996). Ocena modela VNM se vrši prema ukupnoj grešci i grešci generalizacije.

7.1. Ocena modela veštačkih neuronskih mreža sa prostiranjem signala unapred

Ocena modela veštačkih neuronskih mreža se odvija u dve etape (Rojas, 1996). Prva etapa obuhvata usvajanje arhitekture VNM i procenu izlaznih rezultata, dok druga etapa obuhvata upotrebu VNM. Usvajanje arhitekture VNM je objašnjeno u poglavlju 6, a odnosi se na tip VNM i broj čvorova u njoj. Procena izlaznih rezultata se obavlja kao što je objašnjeno u potpoglavljima 6.4.3.6 i 6.4.2.

Postoji nekoliko teoretskih pitanja koja utiču na praktičnu upotrebu modela VNM. To su:

- Šta se dešava sa modelom ako se pojave novi dodatni podaci (što je čest slučaj kod eksperimentalnih ispitivanja plovidbenih osobina izgrađenih brodova)?
- Šta se dešava sa modelom ako se podaci promene (videti poglavlje 3.2.3)?
- Da li su modeli VNM pouzdani?

Pojavom novih podataka modeli VNM moraju da se povećaju. Povećanje se obavlja dodavanjem novih grana mreže ili dodavanjem broja čvorova u skrivenom sloju (obzirom da je istaknuto u potpoglavljju 6.6 da je VNM sa jednom skrivenim slojem univerzalni aproksimator).

Promena podataka sa eksperimentalnih ispitivanja, koji se koriste za obučavanje mreže moguća je ukoliko se pojedini podaci zamene korigovanim iz raznoraznih

razloga. U tom slučaju se menja i svojstvo uopštavanja stečenog znanja mreže. Mreža je *stabilna* ako se vrednosti težina grana mreže minimalno menjaju sa povećanjem opsega obučavajućeg skupa i ako je frekvencija ponovnog obučavanja mala. Međutim, ukoliko se obučavanje mreže puno puta ponavlja da bi se postigla određena tačnost novih izlaznih podataka, to znači da reprezentativni uzorak nije dovoljno velik (Vukadinović, 1997). Popravljanje stabilnosti mreže je moguće promenom broja čvorova u skrivenom sloju. Ali to nije konačno rešenje jer zahteva dodatni utrošak vremena, a ne mora da popravi svojstvo uopštavanja stečenog znanja.

Kada je reč o pouzdanosti VNM, po mišljenju mnogih autora, one su nepouzdanе. Razlog nepouzdanosti leži u činjenici da VNM ponekad čine greške čak i kada se više puta obučavaju, te je nemoguće dati interval pouzdanosti (Vujanović, 1990) grešaka izlaznih vrednosti. Razlike u tačnosti izlaznih podataka od jednog obučavanja do drugog obučavanja javljaju se kao rezultat različitih početnih vrednosti težina grana mreže.

7.2. Modeliranje preslikavanja vrednosti ulaznih promenljivih u vrednosti izlazne promenljive veštačkim neuronskim mrežama sa prostiranjem signala unapred

Modeliranje preslikavanja vrednosti ulaznih promenljivih u vrednosti izlazne promenljive pomoću podataka sa eksperimentalnih ispitivanja izgrađenih brodovapostiskivača predstavlja jedan složen proces. U odnosu na formulaciju problema, koja je prikazana u poglavlju 7, i koja je teorijska, kod praktičnog modeliranja preslikavanja ulaznih u izlazne vrednosti promenljive ne mogu da se prepoznaju sve eventualne greške pre početka modeliranja. Da bi modeliranje pomoću VNM sa prostiranjem signala unapred bilo uspešno potrebno je da predloženi algoritam obučavanja automatski izvodi uopštavanja kao rezultat strukture podataka, te da na osnovu uopštavanja proizvodi inteligentne odluke u budućnosti.

Postoje dva elementa od kojih zavisi modeliranje podataka VNM. To su *dostupnost* podataka i *primenljivost* modela u praksi. Često se dešava da dostupnost podataka nije dovoljna tako da podaci moraju na neki način da se dopune. Takođe, ukoliko je skup podataka prevelik, za modeliranje se koristi samo uzorak podataka. Primenljivost modela u praksi je najvažniji deo modeliranja jer se njom postiže određena korist, kako za kreatora modela, tako i za ostale korisnike modela.

Pre nego što se izvrši odabir metode za proračun snage izgrađenih brodova-potiskivača potrebno je izvršiti sledeće: opisati i analizirati problem, sakupiti podatke, razvrstati podatke sa eksperimentalnih ispitivanja na ulazne i izlazne podatke i predložiti rešenje problema (odabrati metod rešavanja problema).

VNM se predlažu kao metoda za rešavanje nekog problema u sledeća dva slučaja (Karlaftis i Vlahogianni, 2011):

1. kada je akcenat na dobijanju dobrih izlaznih rezultata, a ne toliko na to kako je sproveden proračun izlaznih rezultata i
2. kada je pravi proces dobijanja, odabira i svrstavanja podataka nejasan.

Kada su VNM odabrane kao metod za proračun snage brodova-potiskivača prelazi se na sledeće korake: konfiguracija VNM, procena i tumačenje rezultata i razvrstavanje rešenja i analiza.

Sada je moguće obuhvatiti modeliranje preko sledećih koraka:

KORAK 1. analiza ili opis problema

KORAK 2. sakupljanje podataka

KORAK 3. izdvajanje ulaznih i izlaznih podataka od celokupnog skupa podataka

KORAK 4. predlog rešenja problema (usvajanje metode rešavanja problema)

KORAK 5. konfiguracija VNM (selekcija operativnih parametara metode)

KORAK 6. proračun i tumačenje rezultata

KORAK 7. razvrstavanje rešenja, analiza rešenja dobijenog modelom VNM i granice primene modela

Matematička formulacija kojom se predstavlja svaka pojedinačna VNM mreža u modelu skupa VNM data je sledećim izrazom:

$$Y_{jnorm}^{(k')} = f \left(\sum_{h_q=1}^{H_q} w_{0j}^{(r')} + w_{h_q j}^{(r')} \cdot \underbrace{f \left(\sum_{h_{q-1}=1}^{H_{q-1}} w_{0h_q}^{(r')} + w_{h_{q-1}h_q}^{(r')} \cdots f \left(\sum_{i=1}^m (w_{0h_1}^{(r)} + w_{ih_1}^{(r)} \cdot X_{inorm}^{(r')}) \right) \cdots \right)}_q \right) \quad (7.1)$$

$k' = 1, 2, \dots, r'; j = 1, 2, \dots, n$

Izraz (7.1) se koristi samo kada se završi obučavanje veštačke neuronske mreže. Razlog predstavljaju promene vrednosti težina grana VNM $(w_{h_{l-1}h_l}^{(k')}, k' = 1, 2, \dots, r'; l = 1, 2, \dots, q)$ ili koeficijenata. Težine grana konačne vrednosti dobijaju tek po završetku obučavanja VNM.

7.3. Proračun snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača primenom veštačkih neuronskih mreža sa prostiranjem signala unapred

U ovom poglavlju biće prikazano modeliranje propulzionih osobnosti dunavskih brodova-potiskivača. Modeliranje se vrši zbog činjenice da su za odnos snage brodova-potiskivača i brzine plovidbe potiskivanih sklopova najviše zainteresovani posada brodova i zapovdenik broda. Kako se ove promene na brodovima-potiskivačima dešavaju svakodnevno, znači da bi one svakodnevno trebalo da budu ispitane. Međutim, složenost organizacije i cena obavljanja eksperimentalnih ispitivanja utiču na to da se ona obavljaju tokom određenih perioda vremena, a rezultati ispitivanja putem modeliranja primenjuju od jednog do drugog merenja.

7.3.1. Značaj razmatranja odnosa snage broda-potiskivača i brzine plovidbe sastava potiskivanih teretnjaka (opis problema)

Odnos snage broda i brzine plovidbe broda je predmet interesovanja raznih autora naučnih radova već duži niz godina (videti potpoglavlje 3.3). Uglavnom se radovi ne bave brodovima-potiskivačima i potiskivanim sklopovima, ali poslednjih godina polako izlazi sve veći broj naučnih radova koji razmatraju ovu problematiku. Glavni problem čine podaci sa eksperimentalnih ispitivanja brodova-potiskivača, kojih je malo. Sa te strane je teško naći reperne podatke („benchmark“ podataka) koji bi mogli biti iskorišćeni za poređenje različitih metoda rešavanja problema uspostavljanja odnosa snage brodova-potiskivača i brzine plovidbe potiskivanih sklopova.

Broj podataka sa eksperimentalnih ispitivanja bi trebao biti dovoljan da „pokrije“ područje od interesa, u ovom slučaju, potiskivane sklopove u savremenom vodnom transportu. Međutim, sakupljanje podataka sa eksperimentalnih ispitivanja zahteva vreme i određene resurse kojima, najčešće, ne raspolažu brodarstva kao naručioci ispitivanja ili izvođači ispitivanja.

7.3.2. Sakupljanje podataka sa eksperimentalnih ispitivanja brodova-potiskivača

U ovoj disertaciji su korišćena ispitivanja propulzionih i potisnih osobnosti dunavskih brodova-potiskivača. Brodovi-potiskivači su bili duže vreme u eksploataciji.

Podaci o potiskivanim sklopovima dobijeni su tokom pomenutih ispitivanja. Baza podataka obuhvata 255 pojedinačnih merenja snage na propellerskim vratilima sa eksperimentalnih ispitivanja 22 broda-potiskivača (videti Tabelu 4.1 i Tabelu 4.3 poglavlje 4). Izdvojeno je 193 merodavna podatka sa eksperimentalnih ispitivanja 15 brodova-potiskivača (videti Tabelu 4.2 poglavlje 4). Predmet proračuna i analize u disertaciji bili su sledeći tehničko-eksploatacioni pokazatelji prevoza tereta koji su dobijeni ili proračunati tokom merenja: izmerena snaga na propellerskim vratilima broda potiskivača (N_{vr}), koeficijent vitkosti $\left(\frac{L_{skl}}{D_{mskl}^{1/3}}\right)$ proračunat na osnovu eksploatacione nosivosti sastava potiskivanih teretnjaka, Frudov broj na bazi dužine sklopa (Simić, 2012) proračunat na osnovu brzine plovidbe potiskivanog sklopa u mirnoj vodi i odnosi glavnih dimenzija sklopova $\left(\frac{L_{skl}}{B_{skl}}\right)$ i $\left(\frac{T_{skl}}{B_{skl}}\right)$ (zbog zakonitosti koja se javlja između glavnih dimenzija sastava potiskivanih teretnjaka i otpora kretanju). Ovi pokazatelji prevoza tereta su dobijeni na osnovu kombinacija nezavisnih promenljivih kao što su deplasman sklopa (D_{mskl}), širina sklopa (B_{skl}), dužina sklopa (L_{skl}) i srednje gaženje sklopa (T_{skl}) i uz primenu osnovnih matematičkih operacija. Pomenuti tehničko-eksploatacioni pokazatelji prevoza tereta prikazani su u Tabeli 4.2, poglavlje 4.

7.3.3. Izdvajanje ulaznih i izlaznih podataka od celokupnog skupa podataka

Četiri ulazne veličine ($m = 4$) je odabrano da budu ulazi u VNM. To su: odnos dužine sklopa i širine sklopa $\left(X_1^{(k')} = \frac{L_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}, k' = 1, 2, \dots, r'\right)$, odnos srednjeg gaženja sklopa i širine sklopa $\left(X_2^{(k')} = \frac{T_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}, k' = 1, 2, \dots, r'\right)$, koeficijent vitkosti $\left(X_3^{(k')} = \frac{L_{skl}^{(k')}}{(D_{mskl}^{(k')})^{1/3}}, k' = 1, 2, \dots, r'\right)$ – kako bi se deplasman broda uveo u razmatranje i Frudov broj na bazi dužine sklopa $\left(X_4^{(k')} = F_r^{(k')} = \frac{v_{pl}^{(k')}}{\sqrt{g \cdot L_{skl}^{(k')}}}, k' = 1, 2, \dots, r'\right)$ – čime se brzina kretanja sklopa u mirnoj vodi uvodi kao ulazna promenljiva. Jedna izlazna veličina ($n = 1$) je usvojena da bude izlaz iz VNM i to je izmerena snaga na

propelerskim vratilima broda-potiskivača ($D_1^{(k')} = N_{vr}^{(k')}, k' = 1, 2, \dots, r'$). Sada su vektori ulaznih i izlaznih podataka za obučavanje definisani u poglavlju 6.4.2 zamenjeni vektorima veličina dobijenih sa eksperimentalnih ispitivanja tako da je

$$X^{(k)} = \left(\frac{L_{skl}^{(k)}}{B_{skl}^{(k)}}, \frac{T_{skl}^{(k)}}{B_{skl}^{(k)}}, \frac{L_{skl}^{(k)}}{(D_{mskl}^{(k)})^{1/3}}, F_r^{(k)} \right)^T, k = 1, 2, \dots, r - \text{vektor ulaznih podataka i}$$

$$D^{(k)} = (D_1^{(k)})^T = D_1^{(k)} = N_{vr}^{(k)} - \text{vrednost snage na izlazu iz VNM.}$$

Takođe, skup podataka za obučavanje $S_r^{(X,D)}$ se menja u $S_r^{(X,N_{vr})}$.

Ulazni i izlazni podaci su normalizovani pomoću min-max procedure standardizacije podataka izrazom (6.27). Ulazni podaci su bezdimenzioni, dok je snaga na propelerskim vratilima dimenziona veličina. Iako je Rudolf (1997) u svom radu istakao da je teoretski bolje da se podaci sa merenja transformišu u bezdimenzione veličine, ipak je u disertaciji preovladao stav da je bolje da snaga na propelerskim vratilima broda potiskivača bude „samo“ normalizovana. Umesto snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača kao izlazna veličina iz VNM korišćen je koeficijent predate snage (C_D) (Radonjić i Čolić, 2011), ali su rezultati obučavanja pokazali da su razlike u uopštavanju stečenog znanja VNM male i da su razlike između ukupnih grešaka i grešaka generalizacije male, odnosno da su manje greške dobijene obučavanjem VNM kada je snaga na propelerskim vratilima bila izlazna veličina.

7.3.4. Predloženo rešenje problema proračuna snage motornih potiskivača

Veštačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unapred su usvojene za rešavanje problema proračuna snage brodova-potiskivača zbog svojih osobenosti prikazanih u potpoglavlju 7.2 i dostupnosti, kako se čini, dovoljnog broja podataka. Celokupan postupak obučavanja, validacije i testiranja VNM, kao i proračuna parametara skupova VNM obavljen je u programskoj aplikaciji pod nazivom „RADNN“ koja je pisana u programskom jeziku „Python“. Za obučavanje veštačkih neuronskih mreža algoritmima L-BFGS-B, konjugovani gradijent i Njutn-konjugovani gradijent (videti potpoglavlje 6.4.3.6) korišćen je modul programskog jezika „Python“ koji se zove „FFNET“, dok su algoritmi povratnog prostiranja greške i RPROP napisani u programskom jeziku Python i implementirani u aplikaciju pod nazivom „RADNN“.

Obzirom da su sve VNM koje su učestvovalе u obučavanju imale jedan skriveni sloj, predloženi izraz (7.1) je bilo potrebno prilagoditi tako da umesto više skrivenih slojeva ($l = 1, 2, \dots, q$) sadrži samo jedan skriveni sloj (h_1). Takođe, broj izlaznih promenljivih je bio 1, tako da je usvojeno da je $Y_j = Y_1 = \widehat{N}_{vr}$. Tako je izraz po kome će se vršiti proračun vrednosti snaga na propellerskim vratilima sledeći:

$$Y_{1norm}^{(k')} = f \left(\sum_{h_1=1}^{H_1} \left(w_{01}^{(r)} + w_{h_1 1}^{(r)} \cdot f \left(\sum_{i=1}^m \left(w_{0h_1}^{(r)} + w_{ih_1}^{(r)} \cdot X_{inorm}^{(k')} \right) \right) \right) \right), \quad k' = 1, 2, \dots, r' \quad (7.2)$$

Aktivaciona funkcija f je ostala sigmoidna.

U ovoj disertaciji je predloženo da se proračun snage na propellerskim vratilima obavlja pomoću modela skupa VNM. U potpoglavlju 6.7.1 je objašnjeno na koji način se formira model skupa VNM. Na osnovu pomenutog objašnjenja i na osnovu izraza (7.2) može se predložiti da se za svaku sastavnu mrežu u okviru modela skupa VNM vrši proračun snage na osnovu sledećeg izraza:

$$\left(Y_{1norm}^{(k')} \right)_{I'} = f \left(\sum_{h_1=1}^{(H_1)_{I'}} \left(\left(w_{01}^{(r)} \right)_{I'} + \left(w_{h_1 1}^{(r)} \right)_{I'} \cdot f \left(\sum_{i=1}^m \left(\left(w_{0h_1}^{(r)} \right)_{I'} + \left(w_{ih_1}^{(r)} \right)_{I'} \cdot X_{inorm}^{(k')} \right) \right) \right) \right) \quad (7.3)$$

$$k' = 1, 2, \dots, r', I' = 1, 2, \dots, M'$$

Kao što je već napomenuto, broj ulaznih promenljivih je određen da bude 4 ($m=4$). To znači da je $Y'_{1norm} = f(X'_{1norm}, X'_{2norm}, X'_{3norm}, X'_{4norm})$, odnosno $Y'_1 = f(X'_1, X'_2, X'_3, X'_4)$. Ukoliko se umesto oznaka X i Y uvedu oznake za ulazne i jednu izlaznu promenljivu koje su određene u potpoglavlju 7.3.3, može se zaključiti da je snaga na propellerskim vratilima brodoва-potiskivača funkcija četiri pomenute ulazne promenljive i predstavljena je sledećom zavisnošću:

$$N_{vr} = N_{vr} \left(\frac{L_{skl}}{B_{skl}}, \frac{T_{skl}}{B_{skl}}, \frac{L_{skl}}{D_{mskl}^{1/3}}, F_r \right) \quad (7.4)$$

Po proračunu snage na propellerskim vratilima pomoću izraza (7.2) ili (7.3) potrebno je izvršiti denormalizaciju ulaznih i izlaznih vrednosti. Proces denormalizacije je suprotan procesu normalizacije i za ulazne vrednosti se može obaviti pomoću sledećeg izraza:

$$X_i^{(k')} = \frac{X_{inorm}^{(k')} - \min_{k'} \{X'_{inorm}\}}{\max_{k'} \{X'_{inorm}\} - \min_{k'} \{X'_{inorm}\}} \left(\max_{k'} \{X'_i\} - \min_{k'} \{X'_i\} \right) + \min_{k'} \{X'_i\} \quad (7.5)$$

$$(k' = 1, 2, \dots, r', i = 1, 2, \dots, m)$$

Denormalizacija izlaznih vrednosti se obavlja pomoću sledećeg izraza:

$$(Y_j^{(k')})_{I'} = \frac{(Y_{jnorm}^{(k')})_{I'} - \min_{k'}\{D'_{jnorm}\}}{\max_{k'}\{D'_{jnorm}\} - \min_{k'}\{D'_{jnorm}\}} \left(\max_{k'}\{D'_j\} - \min_{k'}\{D'_j\} \right) + \min_{k'}\{D'_j\} \quad (7.6)$$

$(k' = 1, 2, \dots, r', j = 1, 2, \dots, n, I' = 1, 2, \dots, M')$

Kako je u ovoj disertaciji $j = 1$, celokupan skup izlaznih podataka (D_j) se menja u skup (D_I) i on je jednak

$$D'_1 = \{N_{vr}^{(1)}, N_{vr}^{(2)}, \dots, N_{vr}^{(r')}\} \quad (7.7)$$

Broj elemenata ovog skupa je $r' = 193$. Na osnovu skupa D'_1 može se definisati skup normalizovanih izlaznih podataka čiji su elementi sve 193 snage na propellerskim vratilima dobijene putem eksperimentalnih istraživanja. Ovaj skup obuhvata snage na propellerskim vratilima koje su služile za obučavanje i testiranje VNM i on je definisan na sledeći način:

$$D'_{1norm} = \{D_{1norm}^{(1)}, D_{1norm}^{(2)}, \dots, D_{1norm}^{(r')}\} \quad (7.8)$$

Na osnovu skupa D'_1 mogu se definisati skup D_1 koji predstavlja skup snaga na propellerskim vratilima koje su korišćene za obučavanje VNM i skup D''_1 koji predstavlja skup snaga na propellerskim vratilima koje su korišćene za testiranje VNM. Oba skupa su definisana na sledeći način:

$$D_1 = \{N_{vr}^{(1)}, N_{vr}^{(2)}, \dots, N_{vr}^{(r')}\} \quad (7.9)$$

$$D''_1 = \{N_{vr}^{(1)}, N_{vr}^{(2)}, \dots, N_{vr}^{(r')}\} \quad (7.10)$$

U ovoj disertaciji denormalizacija podataka će se obavljati pomoću narednog izraza:

$$(\widehat{N}_{vr}^{(k')})_{I'} = (Y_1^{(k')})_{I'} = \frac{(Y_{1norm}^{(k')})_{I'} - \min_{k'}\{D'_{1norm}\}}{\max_{k'}\{D'_{1norm}\} - \min_{k'}\{D'_{1norm}\}} \left(\max_{k'}\{D'_1\} - \min_{k'}\{D'_1\} \right) + \min_{k'}\{D'_1\} \quad (7.11)$$

$(k' = 1, 2, \dots, r', I' = 1, 2, \dots, M')$

Denormalizacijom podataka pomoću izraza (7.11) i njihovim razdvajanjem na podatke koji su služili za obučavanje i testiranje VNM dobijaju se sledeći skupovi snaga na propellerskim vratilima koje su proračunate modelom skupa VNM:

$$(Y_1)_{I'} = \{(\widehat{N}_{vr}^{(1)})_{I'}, (\widehat{N}_{vr}^{(2)})_{I'}, \dots, (\widehat{N}_{vr}^{(r')})_{I'}\}, \forall I' \quad (7.12)$$

$$(Y_1'')_{I'} = \{(\widehat{N}_{vr}^{(1)})_{I'}, (\widehat{N}_{vr}^{(2)})_{I'}, \dots, (\widehat{N}_{vr}^{(r')})_{I'}\}, \forall I' \quad (7.13)$$

7.3.5. Konfiguracija veštačkih neuronskih mreža sa prostiranjem signala unapred

Prihvaćena je arhitektura VNM sa jednim skrivenim slojem ($q = 1$) na osnovu Teoreme o univerzalnoj aproksimaciji (Hornik i dr., 1989 u Vukadinović, 1997) koja je objašnjena u potpoglavlju 6.6. Maksimalan broj čvorova u skrivenom sloju je određen na osnovu izraza (6.61) – potpoglavlje 6.6. Na osnovu maksimalnog broja čvorova određen je i skup VNM koji će poslužiti da se iz njega izdvoji model skupa sa $M'=4$ VNM. Broj M' je određen na osnovu rada Zhao i dr. (2008). Model skupa VNM sa brojem čvorova svake pojedinačne VNM je određen na osnovu Akaike informacionog kriterijuma koji je objašnjen u potpoglavlju 6.6.1 i potpoglavlju 6.7.1. Sastavne mreže su ušle u model skupa VNM na osnovu rangiranja prema AIC vrednostima od najmanjih ka najvećim vrednostima.

Sve četiri VNM su ponovo bile obučavane još dodatnih 10 puta na osnovu pravila ranog zaustavljanja (potpoglavlje 6.5), a za konačne rezultate su odabrane one mreže koje su imale najmanju ukupnu grešku. Normalizovanjem podataka podešeno je da maksimalna vrednost koju normalizovani podatak može da dobije nezavisno od toga da li se nalazi u skupu ulaznih ili izlaznih podataka bude 1. Takođe, minimalna vrednost koju normalizovani podatak može da dobije je podešena na broj 0. Osim vrednosti ulaznih podataka koje se normalizuju izrazom (6.27), obavezno je izvršiti normalizaciju i izlaznih vrednosti snaga pomoću pomenutog izraza. Iz tih razloga su aktivacione funkcije u čvorovima podešene na sigmoidne funkcije (videti potpoglavlje 6.1).

Četiri sastavne mreže modela skupa VNM su imale različit broj čvorova u skrivenom sloju. To znači da se izraz (7.2) morao pojaviti 4 puta u konačnom rešenju, svaki put sa različitim vrednostima težina grana mreže, odnosno koeficijentima matematičkog izraza. Takođe, to znači da je konačno rešenje, odnosno vrednost snage na propellerskim vratilima bila proračunavana 4 puta. Za svaku od 4 proračunate snage određivana je apsolutna greška između nje (snage) i izmerene snage. Na kraju je usvajana vrednost snage čija je apsolutna greška bila najmanja (kriterijum najmanje apsolutne greške). Celokupan proračun i usvajanje vrednosti izlaznih rezultata dato je pomoću sledećeg izraza:

$$\widehat{N}_{vr}^{(k')} = \begin{cases} \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_1, \min \left\{ \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_1 - N_{vr}^{(k')} \right|, \dots, \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_{M'} - N_{vr}^{(k')} \right| \right\} = \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_1 - N_{vr}^{(k')} \right| \\ \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_2, \min \left\{ \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_1 - N_{vr}^{(k')} \right|, \dots, \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_{M'} - N_{vr}^{(k')} \right| \right\} = \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_2 - N_{vr}^{(k')} \right| \\ \vdots \\ \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_{M'}, \min \left\{ \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_1 - N_{vr}^{(k')} \right|, \dots, \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_{M'} - N_{vr}^{(k')} \right| \right\} = \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k')} \right)_{M'} - N_{vr}^{(k')} \right| \end{cases} \quad (7.14)$$

$$k' = 1, 2, \dots, r'$$

Na osnovu izraza (7.14) u disertaciji se definišu skupovi snaga na propellerskim vratilima koji su podeljeni na skup snaga dobijen na osnovu ulaznih podataka za obučavanje i skup snaga dobijen na osnovu ulaznih podataka za testiranje:

$$\widehat{N}_{vr} = \{ \widehat{N}_{vr}^{(1)}, \widehat{N}_{vr}^{(2)}, \dots, \widehat{N}_{vr}^{(r)} \} \quad (7.15)$$

$$\widehat{N}_{vr}'' = \{ \widehat{N}_{vr}^{(1)}, \widehat{N}_{vr}^{(2)}, \dots, \widehat{N}_{vr}^{(r')} \} \quad (7.16)$$

7.3.6. Numerički primer, proračun i tumačenje rezultata

Kao što je već rečeno, odabrana je arhitektura VNM sa jednim skrivenim slojem. Maksimalan broj čvorova u skrivenom sloju je određen prema izrazu (6.61) i on je iznosio 25. Reprezentativan uzorak od 193 podatka ($r' = 193$) je podeljen na ulazne i izlazne podatke. Od ovih podataka su napravljene skup podataka za obučavanje, skup za validaciju i skup podataka za testiranje. 80% od svih podataka su činili trening parovi, tj. skup podataka za obučavanje ($r = 154$). Skup za validaciju je napravljen tako što je iz skupa za obučavanje izdvojeno 10% ulazno/izlaznih podataka ili $r''' = 15$ podataka sa merenja (10%·80%=8% od ukupnog skupa podataka). Preostalih 20% podataka je činilo ulazno/izlazne parove koji su korišćeni za testiranje čime je formiran i skup podataka za testiranje sa $r'' = 39$ podataka sa merenja. Formiranje obučavajućeg skupa, skupa za validaciju i skupa za testiranje obavljeno je u aplikaciji „RADNN“ pomoću modula slučajnih brojeva iz programskog jezika „Python“. Svi skupovi podataka su sačuvani tako da su bili dostupni tokom kasnijih faza obučavanja VNM.

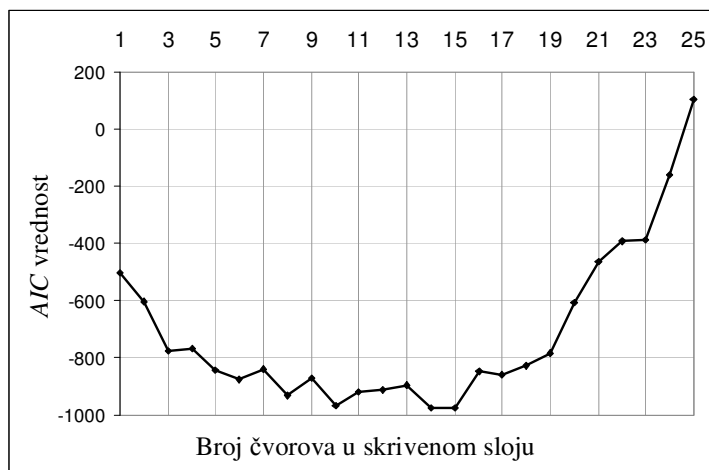
Skup rednih brojeva merenja za obučavanje VNM (S_r), skup rednih brojeva merenja za testiranje VNM ($S_{r'}$) i skup rednih brojeva merenja za validaciju ($S_{r''}$) su definisani na sledeći način:

$$S_r = \{k | k \in [1, r]\}, r = 154 \quad (7.17)$$

$$S_{r'} = \{k'' | k'' \in [1, r']\}, r' = 193 \quad (7.18)$$

$$S_{r'} = \{k'' | k'' \in [1, r'']\}, r'' = 15 \quad (7.19)$$

Minimalan broj čvorova u skrivenom sloju je određen da bude 1. Za sve VNM je proračunata *AIC* vrednost pomoću izraza (6.63). 25 VNM je ušlo u početni skup i one su rangirane na osnovu *AIC* vrednosti. Četiri VNM mreže čije su *AIC* vrednosti bile najmanje su postale sastavne mreže modela skupa VNM. Na Slici 7.1 su prikazane *AIC* vrednosti VNM sa brojem čvorova u skrivenom sloju od 1 do 25.



Slika 7.1. *AIC* vrednosti veštačkih neuronskih mreža iz početnog skupa

AIC vrednosti su proračunate na osnovu srednje kvadratne apsolutne greške izlaznih vrednosti koje su bile proračunate na osnovu ulaznih vrednosti iz skupa za obučavanje. Kao što se sa Slike 7.1 vidi najmanje *AIC* vrednosti imale su redom VNM sa 15, 14, 10 i 8 ($(H_1)_1=15$, $(H_1)_2=14$, $(H_1)_3=10$, $(H_1)_4=8$) čvorova u skrivenom sloju. Ove četiri mreže postale su sastavne mreže i od njih je napravljen model skupa VNM.

Svaka od ove četiri sastavne mreže je obučavana dodatnih 20 puta kako bi se proračunale što tačnije vrednosti snaga na propellerskim vratilima potiskivača. One sastavne mreže, kod kojih su dodatnim obučavanjem proračunate najmanje ukupne greške (*E*), usvojene su kao merodavne za formiranje modela skupa VNM. Izlazne vrednosti (snage na propellerskim vratilima) iz modela skupa VNM su određene na osnovu kriterijuma najmanje apsolutne greške. To znači da se izlazne vrednosti modela upoređuju na osnovu apsolutnih grešaka između snaga na propellerskim vratilima dobijenih eksperimentalnim ispitivanjima i snaga dobijenih pomoću 4 sastavne mreže. Ona vrednost snage na propellerskim vratilima čija je apsolutna greška najmanja od sve 4 apsolutne greške za isto merenje bila je odabrana da bude izlazna vrednost modela.

Vrednosti težina grana svake sastavne mreže ($W_{I'}$) ($I' = 1,2,3,4$) u modelu skupa VNM određene su na osnovu izraza (6.64) do (6.67) i prikazane u Tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Vrednosti težina grana svake sastavne mreže ($W_{I'}$)

I'	$(H_1)_{I'}$	$\beta_{M'}$	$(\Delta_m)_{I'}$	$1/(\Delta_m)_{I'}$	$W_{I'}$
1	8	1,00453	1,0405	0,9611	0,2431
2	10	1,00453	1,0063	0,9938	0,2513
3	14	1,00453	1,0006	0,9994	0,2527
4	15	1,00453	1,0000	1,0000	0,2529
				$\Sigma = 3,9542$	$\Sigma = 1$

Težine grana svake sastavne mreže (videti Tabelu 7.1) imaju gotovo jednake vrednosti, što znači da će u proračunu izlaznih vrednosti svaka sastavna mreža imati gotovo podjednaku meru zastupljenosti.

Vrednosti težina grana sastavnih mreža sa 8, 10, 14 i 15 čvorova koje su dobijene po završetku obučavanja VNM prikazane su u Tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Vrednosti težina grana sastavnih mreža modela skupa VNM

I'															
1				2				3				4			
$(w_{ih(j)}^{(154)})_1$	i	h_l	j	$(w_{ih(j)}^{(154)})_2$	i	h_l	j	$(w_{ih(j)}^{(154)})_3$	i	h_l	j	$(w_{ih(j)}^{(154)})_4$	i	h_l	j
23.06969	0	1		3.982293	0	1		-21.4498	0	1		41.59358	0	1	
-100	1	1		-9.45694	1	1		-100	1	1		91.14957	1	1	
100	2	1		-4.75275	2	1		34.82395	2	1		-82.9132	2	1	
20.43035	3	1		-38.5137	3	1		6.068218	3	1		19.38601	3	1	
-18.5189	4	1		41.71553	4	1		24.05208	4	1		-75.7783	4	1	
-5.5793	0	2		-3.12822	0	2		-0.43286	0	2		-4.38046	0	2	
6.217498	1	2		-16.186	1	2		-6.88838	1	2		-0.47947	1	2	
3.730384	2	2		14.41965	2	2		6.749007	2	2		15.5084	2	2	
18.44759	3	2		-20.0726	3	2		13.00756	3	2		-32.0358	3	2	
-9.62279	4	2		100	4	2		1.334716	4	2		31.20294	4	2	
8.058581	0	3		-33.3774	0	3		-3.98209	0	3		10.01005	0	3	
-0.55221	1	3		-3.85262	1	3		-2.18345	1	3		8.882376	1	3	
-18.5502	2	3		62.67287	2	3		5.295409	2	3		-18.0865	2	3	
7.234164	3	3		8.990459	3	3		17.89644	3	3		5.844267	3	3	
-11.1039	4	3		25.8933	4	3		-13.3248	4	3		-13.7667	4	3	
3.349345	0	4		4.420955	0	4		8.543383	0	4		-7.60207	0	4	
10.56594	1	4		4.837871	1	4		-4.80513	1	4		-4.53936	1	4	
-0.44767	2	4		-54.3355	2	4		-9.95603	2	4		21.62777	2	4	
-2.17342	3	4		31.73732	3	4		-10.9467	3	4		4.646891	3	4	
-12.0923	4	4		-40.7983	4	4		-4.26867	4	4		6.441639	4	4	
-1.66185	0	5		7.974139	0	5		-4.45848	0	5		-49.5981	0	5	
8.546427	1	5		-7.93223	1	5		-0.92889	1	5		-20.3844	1	5	
10.91987	2	5		-5.85497	2	5		5.536951	2	5		94.76595	2	5	
-36.9193	3	5		-10.5318	3	5		16.81824	3	5		34.59514	3	5	
15.87212	4	5		-8.07371	4	5		-8.21683	4	5		-82.7775	4	5	

Tabela 7.2. Vrednosti težina grana sastavnih mreža modela skupa VNM

I'															
1				2				3				4			
$(w_{ih_l(j)}^{(154)})_1$	i	h_l	j	$(w_{ih_l(j)}^{(154)})_2$	i	h_l	j	$(w_{ih_l(j)}^{(154)})_3$	i	h_l	j	$(w_{ih_l(j)}^{(154)})_4$	i	h_l	j
1.515095	0	6		2.183426	0	6		-22.0691	0	6		-8.07905	0	6	
-1.44065	1	6		-1.6335	1	6		-5.44566	1	6		3.58896	1	6	
-12.006	2	6		-9.18046	2	6		25.3175	2	6		-21.4395	2	6	
5.752171	3	6		2.110035	3	6		34.01081	3	6		99.9279	3	6	
-5.70133	4	6		-3.37684	4	6		-9.01286	4	6		51.12691	4	6	
-5.04868	0	7		-9.89921	0	7		0.011836	0	7		2.036047	0	7	
14.33517	1	7		11.03386	1	7		-10.0171	1	7		-1.30806	1	7	
-18.5171	2	7		4.89058	2	7		11.23562	2	7		-2.12792	2	7	
-22.0097	3	7		7.059421	3	7		17.23084	3	7		-6.26246	3	7	
37.92101	4	7		19.01729	4	7		-8.21991	4	7		0.884542	4	7	
14.50211	0	8		1.714148	0	8		-0.36378	0	8		2.422254	0	8	
8.536044	1	8		2.585242	1	8		-1.83161	1	8		4.241386	1	8	
-38.5542	2	8		-2.27448	2	8		-14.8186	2	8		-14.5916	2	8	
41.29349	3	8		2.134649	3	8		11.65504	3	8		6.106947	3	8	
-21.8021	4	8		-24.4534	4	8		-7.6953	4	8		-6.68007	4	8	
-0.39037	0	9		3.763889	0	9		5.626706	0	9		4.801231	0	9	
6.345003	1	9		-5.2612	1	9		5.606794	1	9		6.409371	1	9	
-34.005	2	9		-3.1757	2	9		-9.12901	2	9		5.339048	2	9	
-12.4032	3	9		2.520102	3	9		14.6291	3	9		3.684274	3	9	
27.89082	4	9		2.453457	4	9		-71.6309	4	9		-9.38026	4	9	
3.366704	0	10		-6.09047	0	10		2.522523	0	10		-5.56585	0	10	
2.605036	1	10		-8.85223	1	10		-9.16486	1	10		-1.42466	1	10	
-8.94024	2	10		14.61543	2	10		-26.6095	2	10		-21.9258	2	10	
-0.2691	3	10		35.15626	3	10		19.33232	3	10		-6.44747	3	10	
-1.74502	4	10		-4.62047	4	10		-14.929	4	10					
-8.02294	0	11		41.54695	0	11		5.911898	0	11					
-23.2978	1	11		-22.7348	1	11		-96.1652	1	11					
28.28481	2	11		-100	2	11		11.83585	2	11					
-33.9387	3	11		2.834414	3	11		11.95158	3	11					
29.58817	4	11		-50.7655	4	11		-9.51883	4	11					
9.681	0	12		4.361955	0	12		-19.9684	0	12					
-1.41017	1	12		3.585504	1	12		-9.36104	1	12					
-34.3317	2	12		-43.8956	2	12		-8.98147	2	12					
7.659569	3	12		22.39435	3	12		12.72646	3	12					
-10.9305	4	12		-30.1668	4	12		8.547868	4	12					
1.957994	0	13		-0.55981	0	13		-4.44991	0	13					
3.549313	1	13		-9.77306	1	13									
-39.9588	2	13		8.705557	2	13									
10.91933	3	13		24.51861	3	13									
-17.454	4	13		-11.7037	4	13									
-5.6177	0	14		-5.65418	0	14									
8.673123	1	14		-6.88015	1	14									
14.27699	2	14		16.68054	2	14									
-29.5936	3	14		5.884129	3	14									
20.42917	4	14		-7.1255	4	14									
10.82919	0	15		10.06338	0	15									
2.378856	1	15		5.215315	1	15									
13.3639	2	15		-5.97835	2	15									
14.72611	3	15		3.390374	3	15									
19.27121	4	15		-28.2431	4	15									
1.576717	0	16		-19.4296	0	16									
1.005374	1	16		-23.8318	1	16									
3.192486	2	16		-13.8715	2	16									

Tabela 7.2. Vrednosti težina grana sastavnih mreža modela skupa VNM

I'															
1				2				3				4			
$(w_{ih_1(j)}^{(154)})_1$	i	h_l	j	$(w_{ih_1(j)}^{(154)})_2$	i	h_l	j	$(w_{ih_1(j)}^{(154)})_3$	i	h_l	j	$(w_{ih_1(j)}^{(154)})_4$	i	h_l	j
-9.29846		3	1	20.78263		8	1								
-3.16096		4	1	23.25997		9	1								
9.910491		5	1	14.90773		10	1								
-13.1424		6	1	3.488715		11	1								
5.792213		7	1	40.78255		12	1								
-2.88283		8	1	-23.0484		13	1								
-7.52522		9	1	-10.6203		14	1								
11.67186		10	1												
-2.14778		11	1												
4.509853		12	1												
94.47242		13	1												
-11.9083		14	1												
-0.20452		15	1												

U Tabeli 7.3 su prikazani ulazno/izlazni parovi podataka korišćeni za obuku i testiranje kao i numeričke vrednosti grešaka koje su proračunate po obučavanju mreža.

Tabela 7.3. Ulazno/izlazni podaci u prvom numeričkom primeru

k'	$\frac{L_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}$	$\frac{L_{skl}^{(k')}}{(D_{mskl}^{(k')})^{1/3}}$	$\frac{T_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}$	$F_r^{(k')}$	$N_{vr}^{(k')} \text{ (kW)}$	$(N_{vr}^{(k')} - \widehat{N}_{vr}^{(k')}) \text{ (kW)}$
1	8,941	10,484	0,099	0,05	199,7	-12,126
2	8,941	10,484	0,099	0,06	335,8	5,38
3	8,941	10,484	0,099	0,063	427,5	-1,037"
4	8,941	10,484	0,099	0,065	479,34	-1,267
5	8,941	10,484	0,099	0,066	527,3	-3,437
6	8,941	10,484	0,099	0,068	580,94	-4,104
7	8,219	9,142	0,112	0,065	381	24,253
8	8,219	9,142	0,112	0,068	453	-13,564
9	8,219	9,142	0,112	0,072	541	-4,356"
10	8,219	9,142	0,112	0,075	651	-30,295
11	8,219	9,142	0,112	0,079	808	-120,71
12	11,493	11,273	0,112	0,046	357	-3,574
13	11,493	11,273	0,112	0,049	439	5,743"
14	11,493	11,273	0,112	0,052	534	-3,86
15	11,493	11,273	0,112	0,055	664	8,743"
16	11,493	11,273	0,112	0,058	846	1,395
17	5,481	8,062	0,075	0,058	423	-1,897
18	5,481	8,062	0,075	0,062	534	21,497
19	5,481	8,062	0,075	0,065	673	0,431
20	5,481	8,062	0,075	0,068	865	-14,743
21	6,055	7,201	0,145	0,135	625,5	2,46
22	10,134	9,818	0,145	0,087	677,9	0,808
23	6,756	8,656	0,096	0,054	400,3	-67,249
24	6,756	8,656	0,096	0,069	626,1	-14,479

Tabela 7.3. Ulazno/izlazni podaci u prvom numeričkom primeru

k'	$\frac{L_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}}$	$\frac{L_{skl}^{(k')}}{(D_{mskl}^{(k')})^{1/3}}$	$\frac{T_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}}$	$F_r^{(k')}$	$N_{vr}^{(k')} \text{ (kW)}$	$(N_{vr}^{(k')} - \widehat{N}_{vr}^{(k')}) \text{ (kW)}$
25	6,756	8,656	0,096	0,071	692,4	-57,269
26	14,213	12,140	0,145	0,059	687,3	-49,552"
27	5,067	7,901	0,072	0,062	702,1	6,726
28	10,475	8,748	0,223	0,116	108,6	18,276"
29	10,475	8,748	0,223	0,121	137,8	-18,561
30	10,475	8,748	0,223	0,129	180,2	-43,226"
31	5,237	7,081	0,111	0,091	100,5	1,881
32	5,237	7,081	0,111	0,097	124,3	-1,246
33	5,237	7,081	0,111	0,101	154	-4,906
34	5,237	7,081	0,111	0,106	171,7	-0,415
35	5,237	7,081	0,111	0,107	182,7	-8,467
36	5,915	8,535	0,073	0,056	358,5	-39,646
37	5,915	8,535	0,073	0,064	470,5	-1,484
38	5,915	8,535	0,073	0,074	787	-9,355
39	5,915	8,535	0,073	0,082	1049,6	12,272
40	5,915	8,535	0,073	0,084	1237,7	8,727"
41	8,873	9,720	0,109	0,058	260,1	7,342
42	8,873	9,720	0,109	0,068	371,7	12,103"
43	8,873	9,720	0,109	0,071	462,7	-4,209"
44	8,873	9,720	0,109	0,085	799,6	18,066
45	8,873	9,720	0,109	0,093	1026,2	-4,751"
46	8,873	9,720	0,109	0,1	1310,4	4,639
47	25,024	15,022	0,219	0,06	369,3	1,017
48	25,024	15,022	0,219	0,065	474,4	-24,58
49	25,024	15,022	0,219	0,077	793,2	11,189"
50	25,024	15,022	0,219	0,085	1067,7	-12,992"
51	25,024	15,022	0,219	0,089	1313,5	1,275
52	5,232	7,117	0,109	0,129	1308,6	-0,2
53	17,744	12,064	0,219	0,074	266	17,605
54	17,744	12,064	0,219	0,076	369,2	-7,947
55	17,744	12,064	0,219	0,089	453,1	16,849
56	17,744	12,064	0,219	0,104	764	0,807
57	17,744	12,064	0,219	0,111	982,7	5,289
58	17,744	12,064	0,219	0,117	1301,9	1,071
59	6,833	8,993	0,087	0,061	317,9	-6,486
60	6,833	8,993	0,087	0,066	436,4	1,52
61	6,833	8,993	0,087	0,071	571,1	-2,287
62	6,833	8,993	0,087	0,079	818,8	4,304"
63	6,833	8,993	0,087	0,086	1101,1	-1,435
64	5,122	8,243	0,065	0,053	322,4	28,153
65	5,122	8,243	0,065	0,058	415,8	-0,742
66	5,122	8,243	0,065	0,064	589,5	-5,44
67	5,122	8,243	0,065	0,07	769,8	-1,877
68	5,122	8,243	0,065	0,078	1086,6	6,141

Tabela 7.3. Ulazno/izlazni podaci u prvom numeričkom primeru

k'	$\frac{L_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}}$	$\frac{L_{skl}^{(k')}}{(D_{mskl}^{(k')})^{1/3}}$	$\frac{T_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}}$	$F_r^{(k')}$	$N_{vr}^{(k')} \text{ (kW)}$	$(N_{vr}^{(k')} - \widehat{N}_{vr}^{(k')}) \text{ (kW)}$
69	9,543	11,091	0,086	0,038	312,1	-0,748
70	9,543	11,091	0,086	0,043	426,1	21,460"
71	9,543	11,091	0,086	0,047	573,3	1,341
72	9,543	11,091	0,086	0,054	786,1	-5,599
73	9,543	11,091	0,086	0,06	1123,1	-2,329
74	6,777	8,769	0,094	0,062	339,3	2,332
75	6,777	8,769	0,094	0,067	431,3	3,606
76	6,777	8,769	0,094	0,071	527	1,141
77	6,777	8,769	0,094	0,075	596,2	-7,501
78	6,777	8,769	0,094	0,077	672,7	-0,307
79	9,488	11,244	0,093	0,045	339,3	-20,187
80	9,488	11,244	0,093	0,049	421,7	5,237
81	9,488	11,244	0,093	0,052	524,8	-2,252"
82	9,488	11,244	0,093	0,055	624,1	-1,107
83	9,488	11,244	0,093	0,057	666,8	5,075
84	14,779	10,930	0,212	0,068	300	-8,782
85	14,779	10,930	0,212	0,078	391	32,778
86	14,779	10,930	0,212	0,104	651,2	-18,661
87	14,779	10,930	0,212	0,11	726,3	-10,415
88	4,343	6,418	0,106	0,082	291,4	-64,956"
89	4,343	6,418	0,106	0,098	394,4	-7,837
90	4,343	6,418	0,106	0,116	521,6	2,229
91	4,343	6,418	0,106	0,131	654,6	-2,465
92	4,343	6,418	0,106	0,135	699,3	24,526
93	20,893	13,620	0,214	0,068	537	2,202
94	20,893	13,620	0,214	0,077	679,8	-7,463"
95	20,893	13,620	0,214	0,079	725,4	4,76
96	7,399	9,639	0,107	0,06	216,4	-6,17
97	7,399	9,639	0,107	0,077	553	-59,503
98	7,399	9,639	0,107	0,082	497,3	64,997"
99	7,398	9,654	0,107	0,084	530,3	78,670"
100	7,398	9,654	0,107	0,085	661,6	-16,24
101	7,398	9,654	0,107	0,089	719,2	0,215
102	7,393	8,810	0,107	0,049	291,7	-35,196
103	7,393	8,810	0,107	0,06	419,7	-21,820"
104	7,393	8,810	0,107	0,069	555,5	-11,263
105	7,393	8,810	0,107	0,077	700,7	-6,634
106	7,393	8,810	0,107	0,078	721,3	-1,996"
107	7,402	8,829	0,107	0,056	243	56,063
108	7,402	8,829	0,107	0,063	347,5	59,683
109	7,402	8,829	0,107	0,073	534,7	41,674
110	7,402	8,829	0,107	0,073	516,2	52,066
111	7,402	8,829	0,107	0,074	548,6	36,145
112	7,393	8,830	0,107	0,053	315,3	-9,711

Tabela 7.3. Ulazno/izlazni podaci u prvom numeričkom primeru

k'	$\frac{L_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}}$	$\frac{L_{skl}^{(k')}}{(D_{mskl}^{(k')})^{1/3}}$	$\frac{T_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}}$	$F_r^{(k')}$	$N_{vr}^{(k')} \text{ (kW)}$	$(N_{vr}^{(k')} - \widehat{N}_{vr}^{(k')}) \text{ (kW)}$
113	7,393	8,830	0,107	0,06	399,1	-0,054
114	7,393	8,830	0,107	0,067	485,8	5,462
115	7,393	8,830	0,107	0,073	582,7	8,573
116	7,393	8,830	0,107	0,077	655	4,452
117	2,898	5,674	0,072	0,089	371,5	1,244
118	2,898	5,674	0,072	0,098	466,1	5,544
119	2,898	5,674	0,072	0,103	597,1	-18,154
120	2,898	5,674	0,072	0,101	629,9	-57,594
121	7,395	8,828	0,106	0,049	207,1	-0,967
122	7,395	8,828	0,106	0,061	387	-0,367"
123	7,395	8,828	0,106	0,067	518,1	-6,45
124	7,395	8,828	0,106	0,07	576,4	-27,264
125	7,395	9,653	0,107	0,057	203,4	-2,130"
126	7,395	9,653	0,107	0,069	359,2	-7,119"
127	7,395	9,653	0,107	0,059	202,5	1,778
128	7,395	9,653	0,107	0,074	373,6	0,624
129	7,395	9,653	0,107	0,079	558,5	-30,459
130	7,395	9,653	0,107	0,083	568,1	28,761
131	14,431	11,160	0,198	0,072	189,3	15,364
132	14,431	11,160	0,198	0,082	282,6	-18,067
133	14,431	11,160	0,198	0,091	389	7,751"
134	14,431	11,160	0,198	0,095	446,4	-17,241
135	7,225	9,803	0,099	0,061	186,5	0,839
136	7,225	9,803	0,099	0,071	297,6	12,740"
137	7,225	9,803	0,099	0,081	432,6	106,665"
138	7,222	8,922	0,100	0,042	82,4	8,354
139	7,222	8,922	0,100	0,052	160,1	22,177
140	7,222	8,922	0,100	0,064	285,1	46,24
141	7,222	8,922	0,100	0,069	363,7	45,794
142	7,222	8,922	0,100	0,073	428,1	45,422"
143	7,940	10,580	0,067	0,055	643,8	131,329
144	7,940	10,580	0,067	0,062	880	132,263
145	7,940	10,580	0,067	0,069	1225,2	62,572"
146	7,940	10,580	0,067	0,074	1491,7	16,957
147	7,940	10,580	0,067	0,076	1655,6	-39,504"
148	7,940	10,580	0,067	0,077	1676,5	-39,263
149	7,940	10,580	0,067	0,049	576,7	16,079
150	7,940	10,580	0,067	0,055	820,8	13,391
151	7,940	10,580	0,067	0,059	991,8	-45,165
152	7,940	10,580	0,067	0,061	1080,2	-50,759
153	11,517	11,604	0,180	0,061	627,1	26,747
154	11,517	11,604	0,180	0,067	858,1	2,285
155	11,517	11,604	0,180	0,076	1201,6	-9,134
156	11,517	11,604	0,180	0,081	1456,5	0,35

Tabela 7.3. Ulazno/izlazni podaci u prvom numeričkom primeru

k'	$\frac{L_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}}$	$\frac{L_{skl}^{(k')}}{(D_{mskl}^{(k')})^{1/3}}$	$\frac{T_{skl}^{(k')}}{B_{skl}^{(k')}}}$	$F_r^{(k')}$	$N_{vr}^{(k')} \text{ (kW)}$	$(N_{vr}^{(k')} - \widehat{N}_{vr}^{(k')}) \text{ (kW)}$
157	11,517	11,604	0,180	0,086	1691,4	-4,04
158	11,517	11,604	0,180	0,057	572,8	4,61
159	11,517	11,604	0,180	0,064	797,8	-20,166
160	11,517	11,604	0,180	0,068	973,4	-43,786
161	11,517	11,604	0,180	0,071	1090,1	-31,924"
162	8,233	9,373	0,102	0,084	833,3	11,246
163	8,233	9,373	0,102	0,094	1185,2	-19,249"
164	8,233	9,373	0,102	0,1	1460	6,768
165	8,233	9,373	0,102	0,106	1726,9	2,774
166	8,233	9,373	0,102	0,111	1917,3	-74,506
167	8,334	7,784	0,212	0,105	161,6	-1,782
168	8,334	7,784	0,212	0,121	257,7	7,071"
169	8,334	7,784	0,212	0,138	379,6	-0,479
170	8,334	7,784	0,212	0,142	411,8	-25,057"
171	14,431	10,853	0,214	0,069	169,9	-0,257"
172	14,431	10,853	0,214	0,078	250,2	-17,742
173	14,431	10,853	0,214	0,09	393,1	11,053
174	14,431	10,853	0,214	0,093	435,6	1,909
175	20,525	13,575	0,213	0,048	174,2	-0,536
176	20,525	13,575	0,213	0,054	249,2	19,405
177	20,525	13,575	0,213	0,064	415,7	1,638
178	20,525	13,575	0,213	0,065	442,2	-2,098
179	5,506	8,521	0,063	0,06	402,7	-7,728
180	5,506	8,521	0,063	0,077	824,8	-10,92
181	5,506	8,521	0,063	0,094	1534,9	24,764"
182	5,506	8,521	0,063	0,097	1700,9	6,926
183	8,114	6,921	0,240	0,086	185	-1,043
184	8,114	6,921	0,240	0,097	246	-24,212"
185	8,114	6,921	0,240	0,106	297	4,676
186	8,097	11,932	0,043	0,106	184	-3,246
187	8,097	11,932	0,043	0,12	244	-5,039
188	8,097	11,932	0,043	0,133	298	3,431
189	8,092	9,217	0,106	0,076	472,5	43,808
190	8,092	9,217	0,106	0,084	580	10,542
191	8,092	9,217	0,106	0,095	740,1	5,299
192	8,092	9,217	0,106	0,106	1035,7	15,689"
193	8,092	9,217	0,106	0,107	1112,8	-16,085

") apsolutne greške dobijene iz skupa podataka za testiranje

Obučavanje 4 sastavne neuronske mreže je obavljeno algoritmima RPROP, L-BFGS-B, konjugovani gradijent i Njutn-konjugovani gradijent (pomenutim u potpoglavlju 6.4.3.6). Usvojeni su rezultati obučavanja koji su dobijeni algoritmom Njutn-konjugovani gradijent zato što je ovaj algoritam dao rezultate sa najmanjim

korenima srednje kvadratne apsolutne greške proračunate na skupu za obučavanje i skupu za testiranje u odnosu na preostala tri pomenuta algoritma.

Početne vrednosti težina grana mreže su određivane na slučajan način pomoću izraza (6.19) koji je razvio Bottou (1988) i koji je objašnjen u potpoglavlju 6.4.3.1. Minimalne i maksimalne vrednosti težina grana mreže tokom obučavanja bile su definisane na intervalu [-100,100].

7.3.7. Analiza rešenja dobijenog modelom skupa VNM

Da bi se što jasnije opisali odnosi izračunatih vrednosti (dobijenih po obučavanju i testiranju mreža) i izmerenih (stvarnih) vrednosti snaga na propellerskim vratilima potiskivača (N_{vr}) koristile su se sledeće veličine:

1. *apsolutna greška snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača* (ΔN_{vr} – *absolute error*). Pokazuje tačnost vrednosti snage na propellerskim vratilima proračunatih pomoću modela skupa VNM. Definiše se kao apsolutna vrednost razlike snaga na propellerskim vratilima dobijenih obučavanjem VNM i stvarnih izmerenih snaga na propellerskim vratilima dobijenih na osnovu eksperimentalnih ispitivanja (videti Tabelu 7.3). U ovoj disertaciji merna jedinica apsolutne greške je kilovat (kW), a apsolutna greška se proračunava na osnovu sledeća dva izraza:

$$\Delta N_{vr}^{(k)} = \left| N_{vr}^{(k)} - \widehat{N}_{vr}^{(k)} \right|, \quad k = 1, 2, \dots, r, N_{vr}^{(k)} \in D_1, \widehat{N}_{vr}^{(k)} \in Y_1 \quad (7.20)$$

$$\Delta N_{vr}^{(k'')} = \left| N_{vr}^{(k'')} - \widehat{N}_{vr}^{(k'')} \right|, \quad k'' = 1, 2, \dots, r'', N_{vr}^{(k'')} \in D_1'', \widehat{N}_{vr}^{(k'')} \in Y_1'' \quad (7.21)$$

Izrazom (7.20) su obuhvaćene snage na propellerskim vratilima čija redna merenja pripadaju skupu S_r (izraz 7.17), dok su izrazom (7.21) obuhvaćene snage čija redna merenja pripadaju skupu $S_{r''}$ (izraz 7.18).

2. *srednja apsolutna greška* (eng. *mean absolute error* ili *MAE*). U ovoj disertaciji ona se računa na snagama na propellerskim vratilima čija redna merenja pripadaju skupu S_r i ima oznaku $\hat{\mu}$ i snagama čija redna merenja pripadaju skupu $S_{r''}$ i ima oznaku $\hat{\mu}''$. Merna jedinica srednje apsolutne greške je kilovat (kW). Srednja apsolutna greška se računa kao aritmetička sredina apsolutnih vrednosti razlika snaga na propellerskim vratilima dobijenih obučavanjem VNM

i stvarnih izmerenih snaga na propelerskim vratilima dobijenih na osnovu eksperimentalnih ispitivanja. Definisana je pomoću sledeća dva izraza:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r |N_{vr}^{(k)} - \widehat{N}_{vr}^{(k)}|, N_{vr}^{(k)} \in D_1, \widehat{N}_{vr}^{(k)} \in Y_1 \quad (7.22)$$

$$\hat{\mu}'' = \frac{1}{r''} \sum_{k''=1}^{r''} |N_{vr}^{(k'')} - \widehat{N}_{vr}^{(k'')}|, N_{vr}^{(k'')} \in D_1'', \widehat{N}_{vr}^{(k'')} \in Y_1'' \quad (7.23)$$

3. *koren srednje kvadratne apsolutne greške* (eng. *root mean squared error* ili *RMSE*). U ovoj disertaciji on se računa na snagama na propelerskim vratilima čija redna merenja pripadaju skupu S_r i ima oznaku $\hat{\sigma}$ i snagama čija redna merenja pripadaju skupu $S_{r''}$ i ima oznaku $\hat{\sigma}''$. Merna jedinica korena srednje kvadratne apsolutne greške je kilovat (kW). On je dat pomoću sledeća dva izraza:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{k=1}^r (N_{vr}^{(k)} - \widehat{N}_{vr}^{(k)})^2}, N_{vr}^{(k)} \in D_1, \widehat{N}_{vr}^{(k)} \in Y_1 \quad (7.24)$$

$$\hat{\sigma}'' = \sqrt{\frac{1}{r''} \sum_{k''=1}^{r''} (N_{vr}^{(k'')} - \widehat{N}_{vr}^{(k'')})^2}, N_{vr}^{(k'')} \in D_1'', \widehat{N}_{vr}^{(k'')} \in Y_1'' \quad (7.25)$$

4. *relativna greška* ($G_{re}^{(k)}$ – *relative error*). Predstavlja odnos apsolutne greške i vrednosti izmerene snage na propelerskim vratilima. U ovoj disertaciji ona se računa na snagama na propelerskim vratilima čija redna merenja pripadaju skupu S_r i snagama čija redna merenja pripadaju skupu $S_{r''}$. Data je pomoću sledeća dva izraza (Pedersen i Larsen, 2009):

$$G_{re}^{(k)} = \left| \frac{N_{vr}^{(k)} - \widehat{N}_{vr}^{(k)}}{N_{vr}^{(k)}} \right|, k = 1, 2, \dots, r, N_{vr}^{(k)} \in D_1, \widehat{N}_{vr}^{(k)} \in Y_1 \quad (7.26)$$

$$G_{re}^{(k'')} = \left| \frac{N_{vr}^{(k'')} - \widehat{N}_{vr}^{(k'')}}{N_{vr}^{(k'')}} \right|, k'' = 1, 2, \dots, r'', N_{vr}^{(k'')} \in D_1'', \widehat{N}_{vr}^{(k'')} \in Y_1'' \quad (7.27)$$

5. *srednja relativna greška* (eng. *mean relative error*). U ovoj disertaciji ona se računa na snagama na propelerskim vratilima čija redna merenja pripadaju skupu S_r i ima oznaku $\hat{\mu}_G$ i snagama čija redna merenja pripadaju skupu $S_{r''}$ i ima oznaku $\hat{\mu}_G''$. Data je pomoću sledeća dva izraza:

$$\hat{\mu}_G = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r \left| \frac{N_{vr}^{(k)} - \widehat{N}_{vr}^{(k)}}{N_{vr}^{(k)}} \right|, N_{vr}^{(k)} \in D_1, \widehat{N}_{vr}^{(k)} \in Y_1 \quad (7.28)$$

$$\hat{\mu}_G'' = \frac{1}{r''} \sum_{k'=1}^{r''} \left| \frac{N_{vr}^{(k')} - \widehat{N}_{vr}^{(k')}}{N_{vr}^{(k')}} \right|, N_{vr}^{(k')} \in D_1'', \widehat{N}_{vr}^{(k')} \in Y_1'' \quad (7.29)$$

6. *standardno odstupanje relativne greške* (eng. *standard deviation of the relative error*). Pokazuje kolika je preciznost između relativnih grešaka. U ovoj disertaciji ona se računa na snagama na propellerskim vratilima čija redna merenja pripadaju skupu S_r i ima oznaku s_G i snagama čija redna merenja pripadaju skupu $S_{r''}$ i ima oznaku s_G'' . Proračunava se na osnovu sledeća dva izraza:

$$s_G = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{k=1}^r (G_{re}^{(k)} - \hat{\mu}_G)^2}, N_{vr}^{(k)} \in D_1, \widehat{N}_{vr}^{(k)} \in Y_1 \quad (7.30)$$

$$s_G'' = \sqrt{\frac{1}{r''} \sum_{k'=1}^{r''} (G_{re}^{(k')} - \hat{\mu}_G'')^2}, N_{vr}^{(k')} \in D_1'', \widehat{N}_{vr}^{(k')} \in Y_1'' \quad (7.31)$$

U Tabeli 7.4 su prikazani sledeći izmeritelji uopštavanja stečenog znanja modela skupa VNM:

1. srednje apsolutne greške snaga na propellerskim vratilima $\hat{\mu}$ i $\hat{\mu}''$ (kW),
2. koreni srednje kvadratne apsolutne greške snaga na propellerskim vratilima $\hat{\sigma}$ i $\hat{\sigma}''$ (kW),
3. srednje relativne greške snaga na propellerskim vratilima $\hat{\mu}_G$ i $\hat{\mu}_G''$ (%),
4. standardna odstupanja relativnih grešaka s_G i s_G'' (%).

Svi izmeritelji su dobijeni obučavanjem četiri sastavne mreže (sa 8, 10, 14 i 15 čvorova u skrivenom sloju) iz modela skupa VNM.

Tabela 7.4. Izmeritelji uopštavanja stečenog znanja modela skupa VNM

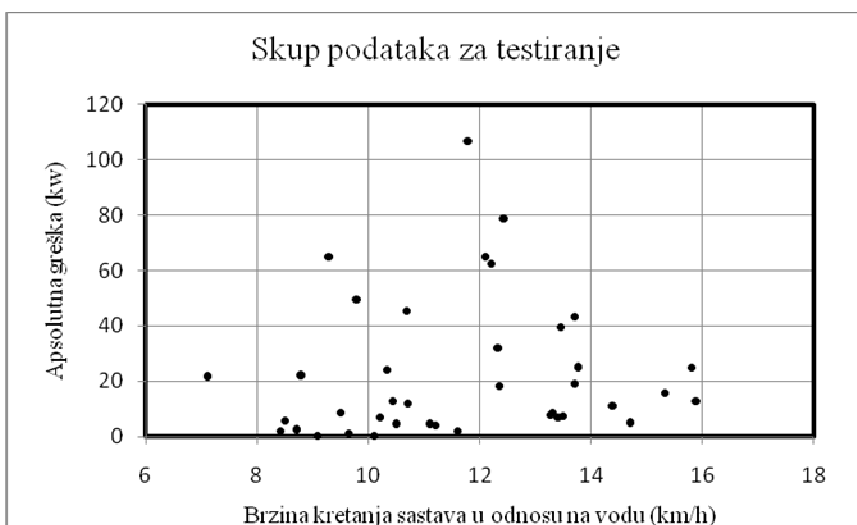
	Model skupa VNM	Obučavajući skup podataka				Skup podataka za testiranje			
		$\hat{\mu}$ (kW)	$\hat{\sigma}$ (kW)	$\hat{\mu}_G$ (%)	s_G (%)	$\hat{\mu}''$ (kW)	$\hat{\sigma}''$ (kW)	$\hat{\mu}_G''$ (%)	s_G'' (%)
Broj čvorova u skrivenom sloju sastavne mreže	8,10,14,15	15,78	22,70	3,30	4,44	27,54	33,48	5,16	6,74

Vrednosti u Tabeli 7.4 odgovaraju uobičajenim razlikama koje se javljaju kod proračunatih izmeritelja na skupovima za obučavanje i testiranje podataka. Vrednosti izmeritelja proračunatih na skupu za testiranje su nešto veće od vrednosti proračunatih

na skupu za obučavanje. Razlog ovih razlika leži u činjenici da će svaka VNM bolje izlazne rezultate dati kod podataka koji su joj služili za obučavanje nego kod podataka sa kojima se nikada nije „susrela“. Vrednosti apsolutnih grešaka proračunatih na osnovu snaga na propelerskim vratilima iz obučavajućeg skupa i skupa za testiranje dati su na slikama 7.2 i 7.3 u vidu dva rastura tačaka.



Slika 7.2. Apsolutne greške ($\Delta N_{vr}^{(k)}$) podataka za obučavanje ($k = 1, 2, \dots, r$)



Slika 7.3. Apsolutne greške ($\Delta N_{vr}^{(k')}$) podataka za testiranje ($k' = 1, 2, \dots, r'$)

Slike 7.2 i 7.3 prikazuju rasturanje tačaka apsolutnih grešaka kod proračuna snage na propelerskim vratilima pomoću modela skupa VNM. Od izmerenih snaga koje su ušle u skup za obučavanje postoje tri apsolutne greške koje prelaze 100 kW, dok kod podataka iz skupa za testiranje ima samo jedna apsolutna greška koja je veća od 100kW.

Procentualno gledano, to je 2% od ukupnog broja apsolutnih grešaka iz skupa za obučavanje i 2,5% od ukupnog broja apsolutnih grešaka iz skupa za testiranje. Međutim, proračunati procenti ne mogu mnogo toga da pokažu iz dva razloga. Prvo, potrebno je pogledati i ostale apsolutne greške iz oba skupa i drugo, apsolutna greška od 100 kW nije procentualno jednaka za izmerenu vrednost od npr. 1500 kW i 500 kW. Zato su uvedene i ispitane ostale apsolutne i relativne greške.

Definisanjem apsolutnih grešaka pomoću izraza (7.20) i (7.21) moguće je napraviti skupove apsolutnih grešaka dobijenih pomoću podataka za obučavanje i pomoću podataka za testiranje:

$$\Delta N_{vr} = \{\Delta N_{vr}^{(1)}, \Delta N_{vr}^{(2)}, \dots, \Delta N_{vr}^{(r)}\} \quad (7.32)$$

$$\Delta N_{vr}^* = \{\Delta N_{vr}^{(1)}, \Delta N_{vr}^{(2)}, \dots, \Delta N_{vr}^{(r^*)}\} \quad (7.33)$$

U slučaju velikog broja podataka (kao što je slučaj sa numeričkim primerom) apsolutne greške se dele na podintervale, odnosno raspodeljuju u grupne intervale. Određivanje veličine grupnog intervala, odnosno podintervala je određen na osnovu sledećeg izraza (Sturges, 1926):

$$d_{int} = 1 + 3,3 \log_{10} r \quad (7.34)$$

Dobijena vrednost za d_{int} je zaokružena na prvi najbliži ceo broj i iznosila je 8 kod skupa za obučavanje. Ukupan broj podintervala je proračunat na osnovu sledećeg izraza:

$$r_{int} = \frac{\max \Delta N_{vr} - \min \Delta N_{vr}}{d_{int}} \quad (7.35)$$

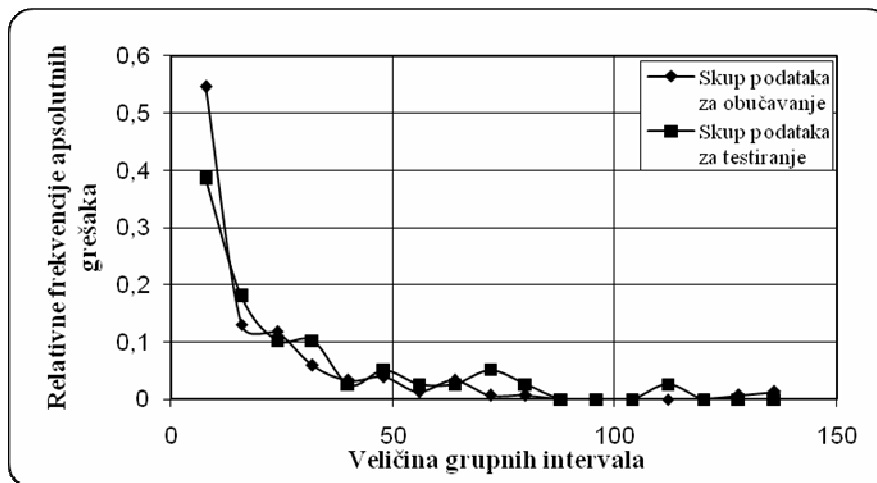
Dobijena vrednost za r_{int} je zaokružena na prvi veći ceo broj i iznosila je 17 kod skupa za obučavanje. Ove vrednosti za veličinu i broj podintervala su usvojeni i kod skupa za testiranje.

U Tabeli 7.5 prikazane su apsolutne greške, njihovi podintervali i njihove apsolutne i relativne frekvencije kod skupa za obučavanje i skupa za testiranje.

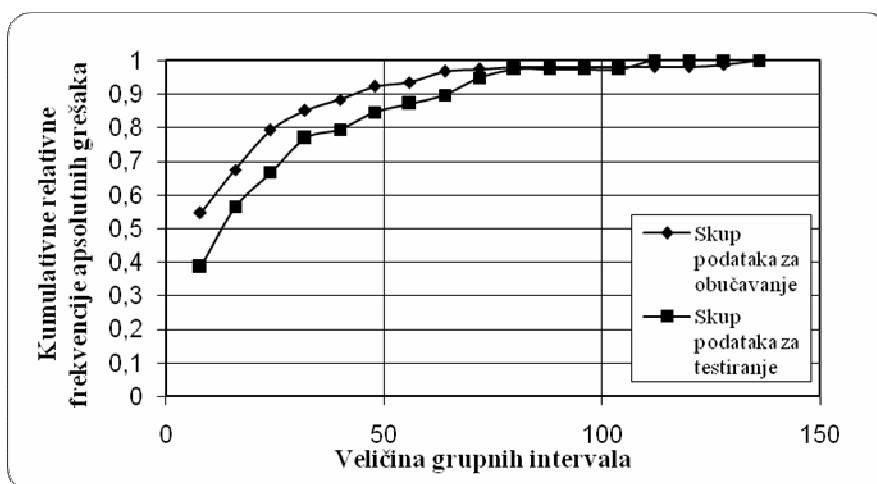
Tabela 7.5. Apsolutne i relativne frekvencije apsolutnih grešaka izračunatih na skupu za obučavanje i skupu za testiranje

Broj pod-interval (k_{int})	Podintervali d_{int} (kW)	Apsolutne frekvencije (obučavajući skup) f_{aps}	Apsolutne frekvencije (skup podataka za testiranje) f''_{aps}	Relativne frekvencije (obučavajući skup) $P_{aps} = \frac{f_{aps}}{r}$	Relativne frekvencije (skup podataka za testiranje) $P''_{aps} = \frac{f''_{aps}}{r''}$	Kumulativne relativne frekvencije (obučavajući skup) F_{aps}	Kumulativne relativne frekvencije (skup podataka za testiranje) F''_{aps}
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0-8	84	15	0,545455	0,384615	0,545455	0,384615
2	8-16	20	7	0,12987	0,179487	0,675325	0,564103
3	16-24	18	4	0,116883	0,102564	0,792208	0,666667
4	24-32	9	4	0,058442	0,102564	0,850649	0,769231
5	32-40	5	1	0,032468	0,025641	0,883117	0,794872
6	40-48	6	2	0,038961	0,051282	0,922078	0,846154
7	48-56	2	1	0,012987	0,025641	0,935065	0,871795
8	56-64	5	1	0,032468	0,025641	0,967532	0,897436
9	64-72	1	2	0,006494	0,051282	0,974026	0,948718
10	72-80	1	1	0,006494	0,025641	0,980519	0,974359
11	80-88	0	0	0	0	0,980519	0,974359
12	88-96	0	0	0	0	0,980519	0,974359
13	96-104	0	0	0	0	0,980519	0,974359
14	104-112	0	1	0	0,025641	0,980519	1
15	112-120	0	0	0	0	0,980519	1
16	120-128	1	0	0,006494	0	0,987013	1
17	>128	2	0	0,012987	0	1	1
	Σ	154	39	1	1		

Pregledom proračunatih vrednosti iz Tabele 7.5 zaključuje se da je najveći broj apsolutnih grešaka između 0 i 8 kW (kolona 2) – 54% kod podataka za obučavanje (kolona 5) i 38% kod podataka za testiranje (kolona 6). Kako se apsolutna greška povećava tako se smanjuju apsolutne i relativne frekvencije apsolutnih grešaka (kolone 3, 4, 5 i 6) u odnosu na prvi podinterval. Smanjivanje se nastavlja sve do poslednjeg podintervala, uz povremeni porast frekvencija. Povremeni porast frekvencija se može smatrati velikim ukoliko se uporede vrednosti u koloni 3 (red 8 i red 17). Međutim, povećanjem veličine uzorka (osnovnog skupa podataka) bi se ove vrednosti daleko više razlikovale. Na slikama 7.4 i 7.5 prikazana su poređenja kumulativnih raspodela relativnih frekvencija i poređenja raspodela relativnih frekvencija apsolutnih grešaka u obliku histograma.



Slika 7.4. Histogram relativnih frekvencija apsolutnih grešaka



Slika 7.5. Histogram kumulativnih relativnih frekvencija apsolutnih grešaka

Na osnovu histograma koji odgovara raspodeli relativnih frekvencija apsolutnih grešaka (Slika 7.4) može se zaključiti da model skupa VNM proračunava tačnije vrednosti snaga na propellerskim vratilima za ulazne podatke koji su služili za obučavanje VNM nego za ulazne podatke koji su služili za testiranje VNM. Do istog zaključka se dolazi ukoliko se pogleda i histogram kumulativnih relativnih frekvencija apsolutnih grešaka (Slika 7.5).

Relativna greška se obično izražava u procentima i mnogo više upotrebljava od apsolutne. Na primer, ako je proračunata apsolutna greška 10 kW, stvarna snaga (sa eksperimentalnih ispitivanja) 100 kW, relativna greška iznosi 10%, dok kod stvarne snage od 1000 kW iznosi 1%. U oba slučaja bi apsolutna greška od 10 kW ušla u podinterval od 8 do 16 kW. Time bi se napravila situacija da je ista apsolutna greška za dva različita potiskivača prihvatljiva, što možda pri stvarnoj plovidbi ne bi bilo korisno. Iz tog razloga se i uvodi relativna greška. U daljem tekstu će relativna greška biti

predstavljena na isti način (pomoću tabela i slika) kao i apsolutna greška. Tako su na slikama 7.6 i 7.7 prikazane relativne greške podataka za obučavanje i testiranje u vidu rasturanja tačaka, u tabelama 7.6 i 7.7 su prikazane relativne greške, njihovi podintervali i njihove apsolutne i relativne frekvencije kod skupa za obučavanje i skupa za testiranje i na slikama 7.8 i 7.9 poređenja kumulativnih raspodela relativnih frekvencija i poređenja raspodela relativnih frekvencija relativnih grešaka u obliku histograma.



Slika 7.6. Relativne greške ($G_{re}^{(k)}$) podataka za obučavanje ($k = 1, 2, \dots, r$)



Slika 7.7. Relativne greške ($G_{re}^{(k'')}$) podataka za testiranje ($k'' = 1, 2, \dots, r''$)

Kao što se sa slika 7.6 i 7.7 vidi odstupanja relativnih grešaka su drugačija od odstupanja apsolutnih grešaka sa slika 7.2 i 7.3. Da bi se lakše uvidele razlike između odstupanja u pomenutim greškama, rezultati su predstavljeni u tabelama 7.6 i 7.7.

Tabela 7.6. Rangiranje grešaka prema minimalnim vrednostima (skup za obučavanje)

k'	Snage propelerskih vratila potiskivača (skup podataka za obučavanje) (kW)	Rang po veličini apsolutne greške	Rang po veličini relativne greške
115	399,1	1	34
52	1308,6	2	1
96	719,2	3	2
74	672,7	4	4
154	1456,5	5	46
32	171,7	6	25
19	673	7	5
168	379,6	8	19
178	174,2	9	3
129	373,6	10	21
67	415,8	11	14
73	312,1	12	13
55	764	13	28
22	677,9	14	47
137	186,5	15	10
124	207,1	16	26
51	369,3	17	78
183	185	18	77
53	1301,9	19	6
80	624,1	20	43
76	527	21	41
120	371,5	22	24
34	124,3	23	17
6	479,34	24	71
47	1313,5	25	27
71	573,3	26	8
16	846	27	96
59	1101,1	28	58
39	470,5	29	30
62	436,4	30	45
176	415,7	31	31
130	202,5	32	42
170	161,6	33	36
65	769,8	34	39
35	100,5	35	59
17	423	36	40
171	435,6	37	22
175	442,2	38	7
95	537	39	15
90	521,6	40	54
156	858,1	41	38
61	571,1	42	37
69	1123,1	43	89
78	339,3	44	50
21	625,5	45	44

Tabela 7.6. Rangiranje grešaka prema minimalnim vrednostima (skup za obučavanje)

k'	Snage propelerskih vratila potiskivača (skup podataka za obučavanje) (kW)	Rang po veličini apsolutne greške	Rang po veličini relativne greške
89	654,6	46	11
163	1726,9	47	65
186	184	48	18
188	298	49	12
1	527,3	50	20
12	357	51	79
77	431,3	52	57
14	534	53	68
153	1691,4	54	64
2	580,94	55	56
112	655	56	76
161	572,8	57	66
41	1310,4	58	48
185	297	59	52
93	725,4	60	32
33	154	61	72
187	244	62	9
79	666,8	63	51
82	421,7	64	60
54	982,7	65	53
191	740,1	66	106
4	335,8	67	33
66	589,5	68	69
114	485,8	69	109
119	466,1	70	90
70	786,1	71	70
64	1086,6	72	83
101	216,4	73	92
122	518,1	74	99
63	317,9	75	35
103	700,7	76	49
27	702,1	77	94
164	1460	78	29
179	1700,9	79	74
46	260,1	80	55
75	596,2	81	81
182	402,7	82	67
91	394,4	83	82
57	369,2	84	100
142	82,4	85	103
31	182,7	86	87
113	582,7	87	63
87	300	88	93
155	1201,6	89	75
38	787	90	84

Tabela 7.6. Rangiranje grešaka prema minimalnim vrednostima (skup za obučavanje)

k'	Snage propelerskih vratila potiskivača (skup podataka za obučavanje) (kW)	Rang po veličini apsolutne greške	Rang po veličini relativne greške
116	315,3	91	97
84	726,3	92	16
192	580	93	105
181	824,8	94	113
172	393,1	95	107
166	833,3	96	135
104	555,5	97	125
5	199,7	98	102
37	1049,6	99	23
151	820,8	100	95
8	453	101	101
24	626,1	102	62
20	865	103	80
134	189,3	104	73
152	576,7	105	119
189	1112,8	106	91
97	661,6	107	115
56	453,1	108	61
145	1491,7	109	110
131	446,4	110	104
58	266	111	117
173	250,2	112	108
43	799,6	113	124
133	282,6	114	151
118	597,1	115	126
29	137,8	116	138
85	651,2	117	121
177	249,2	118	140
160	797,8	119	86
83	339,3	120	127
18	534	121	143
141	160,1	122	131
7	381	123	88
88	699,3	124	118
50	474,4	125	129
157	627,1	126	130
121	576,4	127	120
68	322,4	128	98
128	568,1	129	128
10	651	130	123
125	558,5	131	134
86	391	132	111
106	291,7	133	112
108	548,6	134	137
143	1676,5	135	85

Tabela 7.6. Rangiranje grešaka prema minimalnim vrednostima (skup za obučavanje)

k'	Snage propellerskih vratila potiskivača (skup podataka za obučavanje) (kW)	Rang po veličini apsolutne greške	Rang po veličini relativne greške
40	358,5	136	146
107	534,7	137	132
159	973,4	138	147
193	472,5	139	139
150	991,8	140	114
139	363,7	141	144
140	285,1	142	148
149	1080,2	143	133
109	516,2	144	136
111	243	145	141
23	692,4	146	116
117	629,9	147	154
98	553	148	150
110	347,5	149	152
25	400,3	150	149
162	1917,3	151	142
11	808	152	122
148	643,8	153	153
147	880	154	145

Tabela 7.7. Rangiranje grešaka prema minimalnim vrednostima (skup za testiranje)

k'	Snage propellerskih vratila potiskivača (skup podataka za testiranje) (kW)	Rang po veličini apsolutne greške	Rang po veličini relativne greške
45	371,7	1	2
81	524,8	2	1
3	427,5	3	3
44	462,7	4	8
127	203,4	5	7
92	291,4	6	4
102	721,3	7	6
60	818,8	8	10
123	387	9	5
13	439	10	9
126	359,2	11	13
132	389	12	18
9	541	13	15
174	169,9	14	12
15	664	15	17
169	257,7	16	11
94	679,8	17	21
36	1237,7	18	23
167	411,8	19	29
28	180,2	20	27
42	1026,2	21	33
136	297,6	22	31

Tabela 7.7. Rangiranje grešaka prema minimalnim vrednostima (skup za testiranje)

k'	Snage propelerskih vratila potiskivača (skup podataka za testiranje) (kW)	Rang po veličini apsolutne greške	Rang po veličini relativne greške
190	1035,7	23	16
30	108,6	24	32
72	426,1	25	19
105	419,7	26	30
48	1067,7	27	14
184	246	28	22
180	1534,9	29	25
49	793,2	30	26
165	1185,2	31	36
158	1090,1	32	20
144	1655,6	33	35
138	428,1	34	28
26	687,3	35	34
146	1225,2	36	37
100	497,3	37	38
99	530,3	38	24
135	432,6	39	39

Tabele 7.6 i 7.7 daju potpuni uvid u odstupanja koja se pojavljuju kod poređenja apsolutnih i relativnih grešaka. Samo 6 od 154 proračunatih snaga kod skupa za obučavanje ima isti rang, dok samo 3 od 39 proračunatih snaga kod skupa za testiranje imaju isti rang. Najveća apsolutna greška je pronađena kod snage od 880 kW ($k=147$) dok je najveća relativna greška kod snage od 243 kW ($k=111$) u skupu za obučavanje. Najveća apsolutna greška i najveća relativna greška su jednake i kod skupa za obučavanje i kod skupa za testiranje i pronađena je kod snage od 432,6 kW ($k=135$).

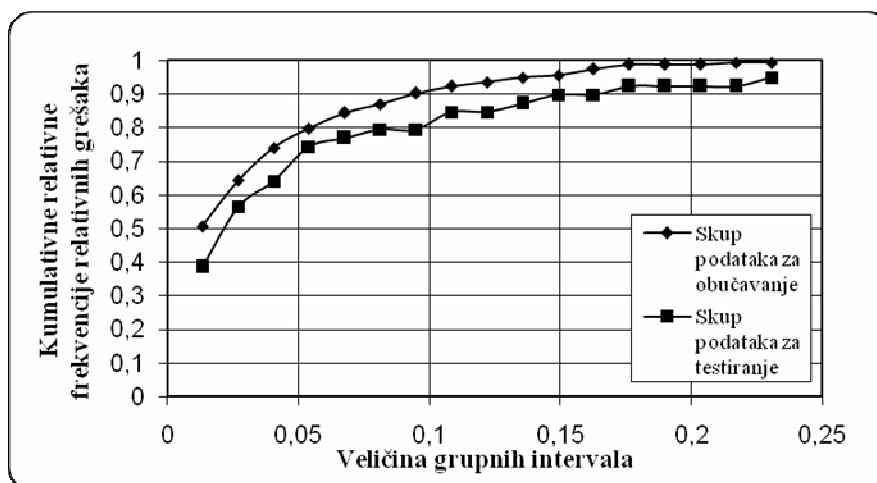
Isto kao i kod apsolutnih grešaka u Tabeli 7.5 sada su u Tabeli 7.8 prikazane relativne greške, njihovi podintervali i njihove apsolutne i relativne frekvencije kod skupa za obučavanje i skupa za testiranje.

Prema izrazima (7.26) i (7.27) relativna greška je uvek manja ili jednaka od 1 i veća od 0 tako da se slobodno može definisati na intervalu $[0,1]$. U slučaju velikog broja podataka (kao što je slučaj sa prvim numeričkim primerom) podaci su najpre grupisani, odnosno raspodeljeni u grupne intervale. Da bi se što lakše uporedili rezultati prikazani u tabelama 7.5 i 7.8 broj podintervala je izjednačen sa brojem dobijen na osnovu izraza (7.34), dok je veličina intervala (d_{int}) takođe izjednačena sa brojem dobijenim na osnovu izraza (7.35).

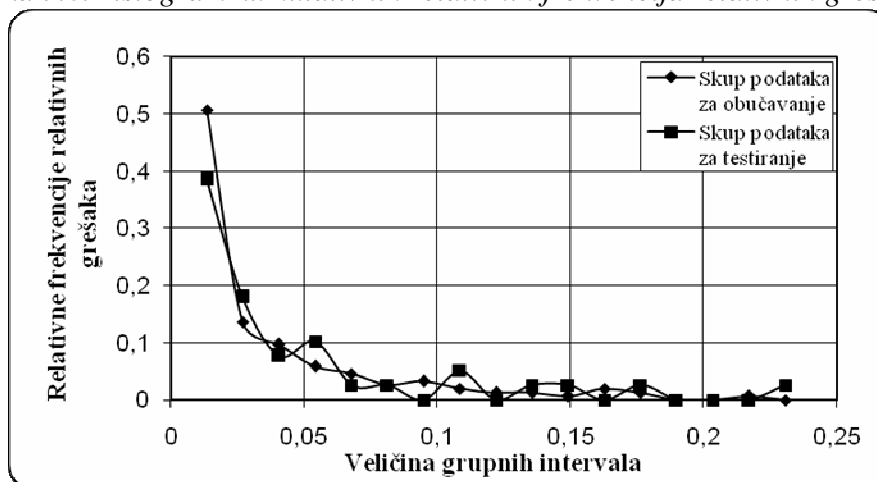
Tabela 7.8. Apsolutne i relativne frekvencije relativnih grešaka izračunatih na skupu za obučavanje i skupu za testiranje

Broj pod-intervala (k_{int})	Podintervali d_{int} (kW)	Apsolutne frekvencije (obučavajući skup) f_{aps}	Apsolutne frekvencije (skup podataka za testiranje) f_{aps}''	Relativne frekvencije (obučavajući skup) $p_{aps} = \frac{f_{aps}}{r}$	Relativne frekvencije (skup podataka za testiranje) $p_{aps}'' = \frac{f_{aps}''}{r''}$	Kumulativne relativne frekvencije (obučavajući skup) F_{aps}	Kumulativne relativne frekvencije (skup podataka za testiranje) F_{aps}''
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0÷0,0136	78	15	0,506494	0,384615	0,506494	0,384615
2	0,0136÷0,027	21	7	0,136364	0,179487	0,642857	0,564103
3	0,027÷0,041	15	3	0,097403	0,076923	0,74026	0,641026
4	0,041÷0,054	9	4	0,058442	0,102564	0,798701	0,74359
5	0,054÷0,068	7	1	0,045455	0,025641	0,844156	0,769231
6	0,068÷0,08	4	1	0,025974	0,025641	0,87013	0,794872
7	0,08÷0,095	5	0	0,032468	0	0,902597	0,794872
8	0,095÷0,11	3	2	0,019481	0,051282	0,922078	0,846154
9	0,11÷0,122	2	0	0,012987	0	0,935065	0,846154
10	0,122÷0,136	2	1	0,012987	0,025641	0,948052	0,871795
11	0,136÷0,15	1	1	0,006494	0,025641	0,954545	0,897436
12	0,15÷0,163	3	0	0,019481	0	0,974026	0,897436
13	0,163÷0,176	2	1	0,012987	0,025641	0,987013	0,923077
14	0,176÷0,19	0	0	0	0	0,987013	0,923077
15	0,19÷0,204	0	0	0	0	0,987013	0,923077
16	0,204÷0,217	1	0	0,006494	0	0,993506	0,923077
17	>0,217	1	3	0,006494	0,076923	1	1
	Σ	154	39	1	1		

Pregledom Tabele 7.8 zaključuje se da je najveći broj relativnih grešaka između 0 i 1,36% (kolona 2) – 50,6% kod podataka za obučavanje (kolona 5) i 38,46% kod podataka za testiranje (kolona 6). Isto kao i kod apsolutnih grešaka tako se i relativna greška povećava sa smanjenjem apsolutne i relativne frekvencije relativnih grešaka (kolone 3, 4, 5 i 6) u odnosu na prvi podinterval. Smanjivanje se nastavlja sve do poslednjeg podintervala, uz povremeni porast frekvencija. Da bi se relativna greška jasnije prikazala koristi se grafičko prikazivanje rezultata obučavanja mreže preko relativne greške. Na slikama 7.8 i 7.9 prikazana su poređenja kumulativnih raspodela relativnih frekvencija i poređenja raspodela relativnih frekvencija relativnih grešaka u obliku histograma.



Slika 7.8. Histogram kumulativnih relativnih frekvencija relativnih grešaka



Slika 7.9. Histogram relativnih frekvencija relativnih grešaka

Sa slika 7.8 i 7.9 na kojima su prikazane raspodele relativnih frekvencija relativnih grešaka može se zaključiti da model skupa VNM proračunava tačnije vrednosti snaga potiskivača kod ulaznih podataka koji su služili za obučavanje mreža. Do istog zaključka se dolazi ukoliko se pogleda i histogram kumulativnih relativnih frekvencija relativnih grešaka.

Uobičajeno je da se kod svakog obučavanja VNM prikažu i apsolutna i relativna greška. Iako, možda, relativna greška na prvi pogled daje tačnija odstupanja dobijena proračunom, ipak, apsolutna greška može da nam kaže kolika su ta odstupanja u stvarnosti. Zbog toga se definiše *maksimalna apsolutna greška* koja predstavlja najveće odstupanje od tačne (izmerene) vrednosti snage propelerskih vratila i ona u ovoj disertaciji iznosi 132,983 kW, a pojavljuje se u skupu podataka za obučavanje.

7.3.8. Primena modela skupa VNM za proračun snage motornih potiskivača

Prilikom ispitivanja propulzionih osobnosti brodova-potiskivača na plovnom putu su vladali promenljivi uslovi prirodnog režima plovnog toka. Ovi spoljni uslovi, na koje lice koje obavlja merenja ne može da utiče, menjaju se svakodnevno i nemoguće je očekivati da budu isti u dva različita vremenska perioda. Međutim, promenljivost prirodnog režima plovnog toka Dunava je veoma spora ako se prati tokom cele kalendarske godine. Promenljivost je minimalna tokom određenih meseci godine, a nagla je jedino kada se dogodi poplavni talas. Poplavni talasi se najčešće događaju u proleće.

Smatra se da, danas, ne postoji niti jedno sveobuhvatno istraživanje koje se bavi procenom uticaja prirodnog režima plovnog toka na vrednosti parametara eksperimentalnih ispitivanja broda. Zbog toga istraživači, najčešće, pribegavaju modelskim ispitivanjima da bi dobili potrebnu instalisanu snagu i snagu na propelerskim vratila broda. Međutim, kada je brod duže vreme u eksploataciji, metode kojima se proračunava snaga na propelerskim vratilima brodova na osnovu modelskih ispitivanja gube na značaju. Zbog toga se primenjuju eksperimentalna ispitivanja plovidbenih osobina brodova. Naročito su eksperimentalna ispitivanja značajna kod brodova koji su promenili glavne pogonske motore.

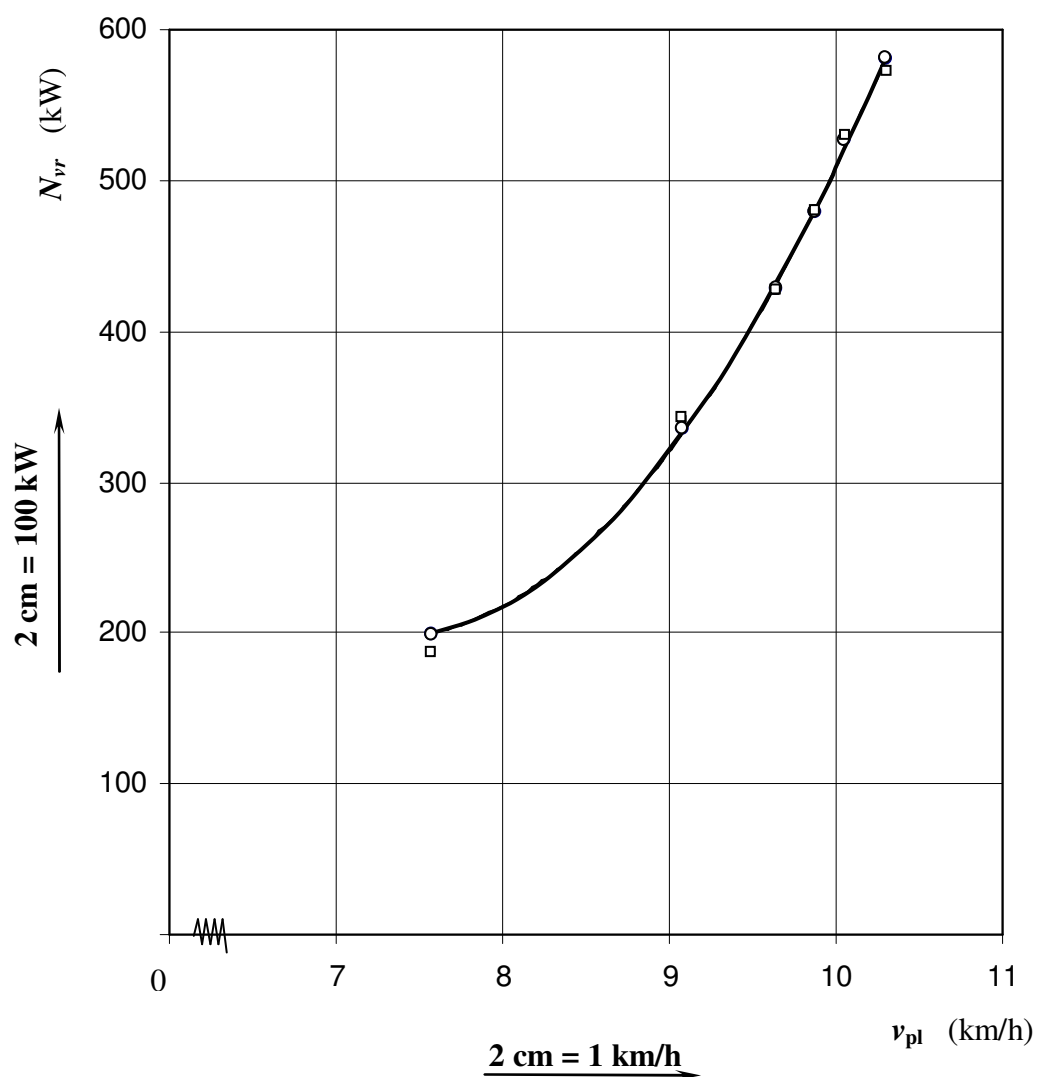
Da bi bilo jasnije, ova ispitivanja trpe određene greške usled promenljivosti prirodnog režima toka reke (Dunava), ali te greške su minimalne u slučaju minimalnih promena klimatoloških, hidrološko-meteoroloških, hidrauličkih, morfoloških, geomehaničkih, geoloških i drugih osobina. Takođe, eksperimentalna ispitivanja se obavljaju pri propisanim uslovima, a podaci beleže za neutralne uslove (mirna voda, bez vetra itd.) tako da se ona primenjuju pri takvim uslovima, a prilagođavaju promenjenim uslovima.

Primena modela VNM za proračun snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača se ogleda u prikazivanju dijagrama zavisnosti ukupne izmerene snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača (N_{vr}) od brzine plovidbe u nirnoj vodi (v_{pl}) za ispitane brodova-potiskivače. Poznato je iz literature (Radonjić, 2007, Kreculj i Čolić, 1996) da se zavisnost ukupne izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za ispitane brodove-potiskivače na dijagramima određuje polinomom drugog stepena. Međutim, ovakva zavisnost je parcijalna, obzirom da za

svaki pojedinačni potiskivani sklop mora da se traži iznova zavisnost koja bi najbolje odredila funkcionalnu vezu snage broda-potiskivača i brzine plovidbe u mirnoj vodi. S druge strane, tačnost rezultata funkcionalnih veza ne mora da bude bolja u odnosu na primenu VNM.

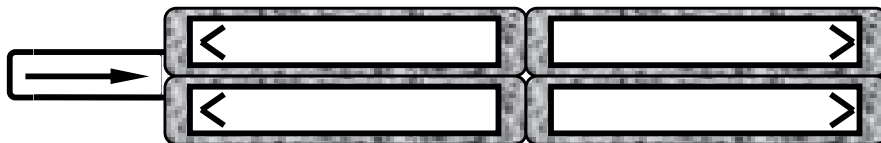
Kao demonstracija preciznosti primene modela skupa VNM za proračun snage na propelerskim vratilima, biće prikazana dva dijagrama zavisnosti ukupne izmerene snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}). Prilikom određivanja imena brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka sa kojim je izvršeno eksperimentalno ispitivanje, u razmatranje su uzeti srednja apsolutna greška, koren srednje kvadratne apsolutne greške i instalisana snaga broda-potiskivača. Na dijagramu br.1 prikazane su apsolutne greške dobijene primenom modela skupa VNM (sa 8, 10, 14 i 15 čvorova u skrivenom sloju). Snage na propelerskim vratilima su proračunate na osnovu podataka dobijenih sa eksperimentalnog ispitivanja motornog potiskivača „Bukovik“. Apsolutne greške izmerenih snaga na propelerskim vratilima broda-potiskivača „Bukovik“ ne prelaze 12,5 kW što je manje i od srednjih apsolutnih grešaka $\hat{\mu}$ i $\hat{\mu}''$ i od korena srednjih kvadratnih apsolutnih greške $\hat{\sigma}$ i $\hat{\sigma}''$. Na dijagramu br. 1 prikazane su apsolutne greške izmerenih snaga propelerskih vratila dobijene primenom modela skupa VNM sa 8, 10, 14 i 15 čvorova u skrivenom sloju.

DIJAGRAM BR.1 Dijagram zavisnosti ukupne izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u odnosu na vodu (v_{pl}) za brod-potiskivač „Bukovik” zajedno sa apsolutnim greškama dobijenih primenom modela skupa VNM



- Izmerena snaga na propelerskim vratilima
- Proračunata snaga na propelerskim vratilima konačnim skupom VNM
- Proračunata snaga na propelerskim vratilima polinomom drugog stepena

Ispitivanje snage broda-potiskivača „Bukovik” izvršeno je u sastavu od „2+2“ nesimetrična potiskivana teretnjaka za prevoz tečnog tereta tipa TB 1200. Potiskivani sklop je predstavljen na Slici 7.10.



Slika 7.10. Šematski prikaz broda-potiskivača „Bukovik“ u sastavu od „2+2“ potiskivana teretnjaka

Glavne osobenosti broda-potiskivača i potiskivanih teretnjaka pri ispitivanju:

		„Bukovik“	TB 1200
Dužina preko svega	L_a	49,20 m	67 00 m
Dužina na vodnoj liniji	L_{vl}	48,40 m	65,20 m
Širina	B	8,00 m	10,20 m
Gaženje	T	1,30 m	2,02 m
Bočna visina	H_k	2,20 m	2,60 m
Koeficijent punoće istisnine	δ	0,60	0,92
Snaga motora	N_{inst}	2×331 kW	
Eksploataciona nosivost	Q_e		1018,0 t

Eksploataciona nosivost potiskivanih teretnjaka je bila $Q_e = 1200$ t, pri najvećem dozvoljenom gaženju $T_{km} = 2,30$ m. Snage motora na oba vratila ispitivane su istovremeno i pri istim režimima rada motora. Pri tome je manjan broj obrtaja motora prema uobičajenim režimima za razne stepene opterećenja. Ispitivanja obavljena pri različitim režimima rada motora i ukupna izmjerena snaga na oba vratila dati su u Tabeli 7.9.

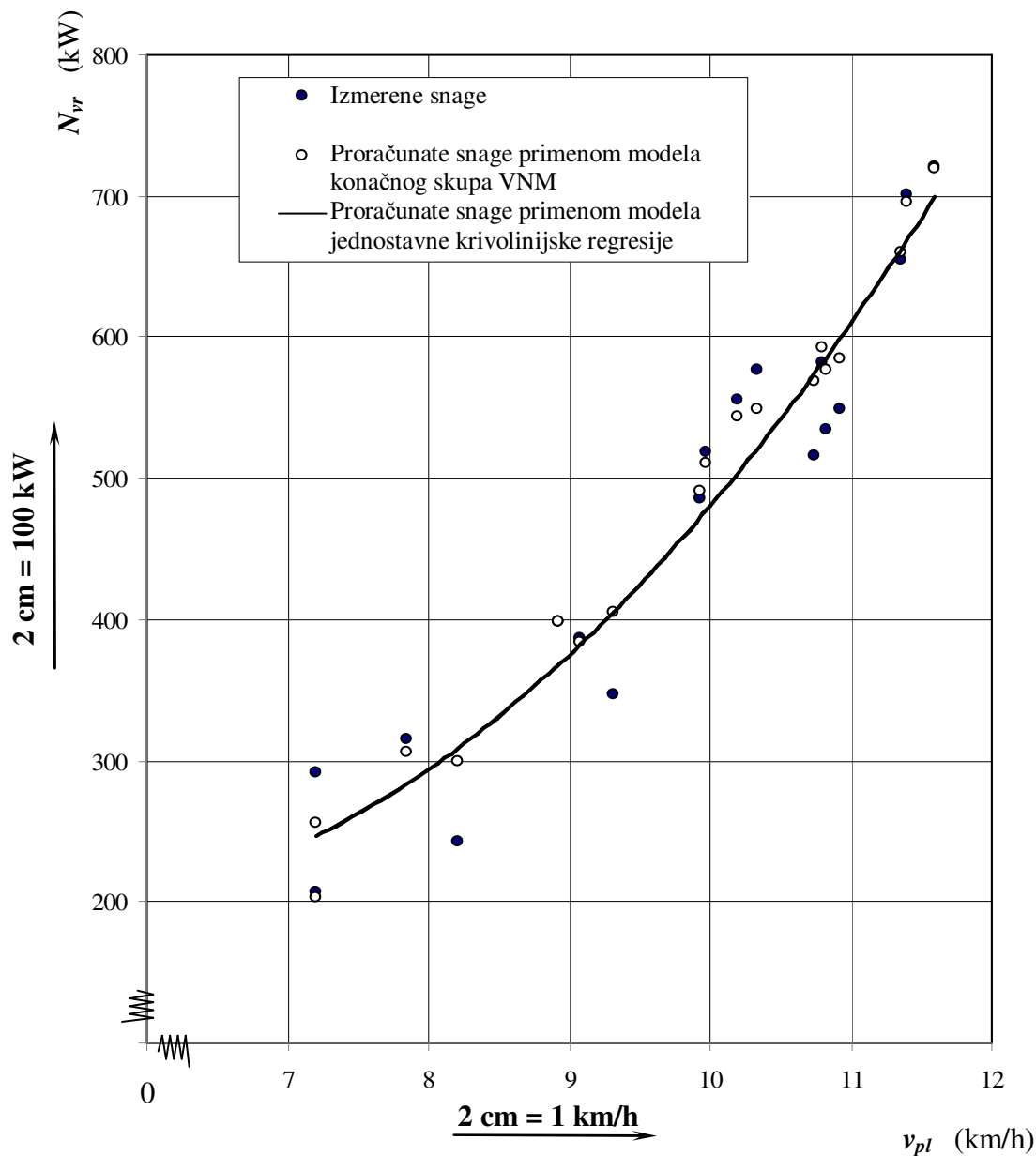
Tabela 7.9. Ukupna izmjerena snaga na oba vratila broda-potiskivača „Bukovik“ u zavisnosti od režima rada motora

Redni broj ispitivanja (k')	Režim rada motora	Ukupna snaga, N_{vr} [kW]		Brzina plovidbe u mirnoj vodi, $v_{pl}^{(k')}$ [km/h]
		$N_{vr}^{(k')}$	$\widehat{N}_{vr}^{(k')}$	
1	Punom snagom – normalno	527,30	529,987	10,05
2	Punom snagom – forsirano	580,94	572,438	10,30
3	Približno $\frac{3}{4}$ snage	427,50	426,463"	9,65
4	Pola snage	335,80	341,18	9,08
5	Polako	199,70	187,574	7,58
6	Približno $\frac{7}{8}$ snage	479,34	480,434	9,88

Na dijagramu br. 1 prikazane su snage dobijene merenjem sa eksperimentalnih ispitivanja i snage proračunate na osnovu modela skupa VNM za brod-potiskivač „Bukovik“ u sastavu sa „2+2“ potiskivana terenjaka. Kao što se može videti sa dijagrama br. 1 apsolutne greške dobijene obučavanjem sastavnih mreža iz modela skupa VNM su veće ili manje i zavise od toga da li su snage na propellerskim vratilima bile u skupu podataka za obučavanje ili su bile u skupu podataka za testiranje. U svakom slučaju, apsolutne greške su uvek veće od onih koje su dobijene u radu (Radonjić, 2007).

Međutim, ako se podaci sa više eksperimentalnih ispitivanja grupišu u jednu bazu podataka, a zavisnosti između njih proračunaju putem modela jednostavne krivolinijske regresije (gde se pretpostavlja parabolična zavisnost između snage na propellerskim vratilima i brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi), srednja apsolutna grešaka i koren srednje kvadratne apsolutne greške ovakvog modela će uvek biti veći od istih izmeritelja proračunatih na osnovu obučavanja sastavnih mreža iz modela skupa VNM. Na dijagramu br. 2 prikazane su apsolutne greške snaga na propellerskim vratilima dobijene primenom modela skupa VNM sa 8, 10, 14 i 15 čvorova u skrivenom sloju i apsolutne greške dobijene primenom modela jednostavne krivolinijske regresije (parabolična zavisnost). Apsolutne greške su nastale kao rezultat razlika između proračunatih snaga i snaga dobijenih na osnovu eksperimentalnih ispitivanja brodova-potiskivača „Pinki“ i „Panonija“.

DIJAGRAM BR.2. Dijagram zavisnosti ukupne izmerene snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača (N_{vr}) od brzine plovidbe u odnosu na vodu (v_{pl}) za m.p. „Pinki” i „Panonja“ zajedno sa apsolutnim greškama dobijenih primenom modela skupa VNM i modela jednostavne krivolinijske regresije



Sa dijagrama br. 2 se mogu izvući sledeći zaključci:

1. većina tačaka proračunatih primenom modela skupa VNM nalazi se bliže tačkama koje odgovaraju merenjima sa eksperimentalnih ispitivanja,
2. tamo gde se ne vide tačke dobijene primenom modela skupa VNM znači da se poklapaju sa tačkama dobijenim na osnovu eksperimentalnih ispitivanja.

Da bi se lakše uporedile apsolutne greške primenom modela skupa VNM i modela jednostavne krivolinijske regresije (parabolična zavisnost) podaci dobijeni proračunom su predstavljeni u Tabeli 7.10.

Tabela 7.10. Ukupna izmerena snaga na oba vratila broda-potiskivača „Bukovik“ u zavisnosti od režima rada motora

k'	$v_{pl}^{(k')}$ (km/h)	Ukupna snaga, N_{vr} [kW]		
		$N_{vr}^{(k')}$ (POTISKIVAČ) (SASTAV)	$\tilde{N}_{vr}^{(k')}$	$\check{N}_{vr}^{(k')}$
106	7,2	291,7 („PINKI“) („2+2“)	256,504	246,441
124	7,2	207,1 („PANONIJA“) („2+2“)	202,586	246,441
116	7,85	315,3 („PANONIJA“) („2+2“)	305,589	283,682
111	8,213	243,0 („PINKI“) („2+2“)	299,063	308,965
115	8,92	399,1 („PANONIJA“) („2+2“)	399,046	367,431
123	9,08	387,0 („PANONIJA“) („2+2“)	384,161"	382,355
110	9,313	347,5 („PINKI“) („2+2“)	404,510	405,203
114	9,93	485,8 („PANONIJA“) („2+2“)	491,262	472,104
122	9,97	518,1 („PINKI“) („2+2“)	510,557	476,761
104	10,2	555,5 („PINKI“) („2+2“)	543,470	504,300
121	10,33	576,4 („PANONIJA“) („2+2“)	549,685	520,436
109	10,742	516,2 („PANONIJA“) („2+2“)	568,266	574,298
113	10,8	582,7 („PANONIJA“) („2+2“)	592,726	582,213
107	10,829	534,7 („PINKI“) („2+2“)	576,374	586,201
108	10,919	548,6 („PINKI“) („2+2“)	584,745	598,709
112	11,35	655,0 („PANONIJA“) („2+2“)	659,452	661,346
103	11,4	700,7 („PINKI“) („2+2“)	695,665	668,906
102	11,6	721,3 („PINKI“) („2+2“)	719,331"	699,755
		Srednja apsolutna greška (kW)	20,472	36,571
		Koren srednje kvadratne apsolutne greške (kW)	28,483	41,503

$\check{N}_{vr}^{(k')}$ – snaga na propelerskim vratilima proračunata primenom modela jednostavne krivolinijske regresije (parabolična zavisnost brzine plovidbe i snage)

Iz Tabele 7.10 se vidi da su i srednja apsolutna greška i koren srednje kvadratne apsolutne greške manji kada se snaga na propelerskim vratilima proračuna pomoću modela skupa VNM od snage proračunate pomoću modela jednostavne krivolinijske regresije. Takođe, vrednosti dve snage na propelerskim vratilim za istu brzinu plovidbe

sklopa u mirnoj vodi biće jednake primenom modela jednostavne krivolinijske regresije, dok će primenom modela skupa VNM, te dve vrednosti snage biti različite.

Dakle, na dijagramu br. 2 se mogu videti tačke koje se nalaze na istoj brzini plovidbe sklopa u odnosu na vodu, ali imaju različite snage na propelerskim vratilima. Da bi se otklonile nedoumice oko toga gde koja tačka pripada potrebno je još definisati granice za primenu modela skupa VNM.

7.4. Razmatranja granica za primenu modela skupa VNM

Kao što je već rečeno, skup podataka dobijenih sa eksperimentalnih ispitivanja brodova-potiskivača je bio podeljen na skup za obučavanje (S_r) i skup za testiranje ($S_{r'}$). U okviru ova dva skupa se nalaze granice za primenu modela skupa VNM. U Tabeli 7.11 su date minimalne i maksimalne vrednosti osnovnih dimenzija ispitivanih potiskivanih sklopova.

Tabela 7.11. Opseg ulaznih i izlaznih podataka dobijenih tokom eksperimentalnih ispitivanja iskorišćenih za obučavanje i testiranje VNM iz modela skupa VNM

Sastav potiskivanih teretnjaka	Broj režima rada motora	$[D_{mkl_{min}}, D_{mskl_{max}}]$ (m ³)	$[L_{skl_{min}}, L_{skl_{max}}]$ (m)	$[B_{skl_{min}}, B_{skl_{max}}]$ (m)	$[T_{skl_{min}}, T_{skl_{max}}]$ (m)	$[v_{skl_{min}}, v_{skl_{max}}]$ (km/h)
1+0	13	[342, 1748]	[68,75, 76,93]	[8,53, 11,65]	[0,47, 2,63]	[9,13, 15,8]
1+1	19	[2606, 3831]	[141,92, 160]	[11, 11,65]	[1,7, 2,47]	[10, 18,5]
1+1+1	12	[3526, 5743]	[213, 240]	[11, 11,65]	[2,4, 2,49]	[8,43, 16,7]
2+1	15	[4853, 5338,8]	[141,92, 142,08]	[23,24, 23,27]	[2,31, 2,49]	[8,42, 13,1]
2+0	16	[1774, 3826,5]	[62, 80]	[15,2, 23,24]	[1,7, 2,47]	[7,4, 15,6]
2+2	52	[3548, 7685]	[124, 160]	[15,2, 23,27]	[1,7, 2,49]	[6,08, 15,8]
2+2+2	10	[5321, 8654]	[186, 201]	[15,2, 20,46]	[2,08, 2,3]	[8,12, 34]
3+0	4	7038	71,04	34,82	2,49	[10,12, 11,72]
3+3	32	[4793, 11540]	[123,86, 160]	[22,8, 33]	[1,7, 2,4]	[6,8, 14,22]
3+3+2	5	6839	185,89	22,86	2,15	[7,52, 9,4]
3+3+3	9	[7157, 11665]	[185,76, 209]	[22,81, 30,65]	[1,98, 2,06]	[6,33, 10,68]
4+4	6	[6348, 7095]	[123,86, 124]	[22,81, 30,4]	[1,98, 2,2]	[7,44, 10,91]

Prikazani intervali iz Tabele 7.11 predstavljaju osnovu za formiranje granica za primenu modela skupa VNM. Da bi rezultati primene modela bili tačniji i u okviru

pomenutih srednjih apsolutnih grešaka i srednjih relativnih grešaka, preporučljivo je da se ne izlazi iz prikazanih intervala. Takođe, kombinacije dužina, širina i gaženja sklopova nisu preporučljive, jer se mogu javiti greške u vidu nepostojećih sastava nesamohodnih teretnjaka i prevelikih brzina plovidbe sklopova u mirnoj vodi koje se ne javljaju na našem delu plovnog puta reke Dunav.

Na primer, iz Tabele 7.10 se mogu očitati dve brzine plovidbe sklopa u odnosu na vodu koje imaju iste vrednosti od 7,2 km/h, pri čemu su snage na propelerskim vratilima različite i iznose 291,7 kW za brod-potiskivač „Pinki“ i 207,1 kW za brod-potiskivač „Panonija“. Sastavi potiskivanih teretnjaka su bili jednaki („2+2“), ali su im se zato razlikovali odnosi glavnih dimenzija sklopova koji su iznosili:

1. $\frac{L_{skl}^{(106)}}{B_{skl}^{(106)}} = 7,393$ kod eksperimentalnih ispitivanja broda-potiskivača „Pinki“ prema
 $\frac{L_{skl}^{(124)}}{B_{skl}^{(124)}} = 7,395$ kod eksperimentalnih ispitivanja broda-potiskivača „Panonija“
 (videti tabele 7.3, 7.9 i 7.10)
2. $\frac{L_{skl}^{(106)}}{(D_{mskl}^{(106)})^{1/3}} = 8,81$ kod eksperimentalnih ispitivanja broda-potiskivača „Pinki“
 prema $\frac{L_{skl}^{(124)}}{(D_{mskl}^{(124)})^{1/3}} = 8,828$ kod eksperimentalnih ispitivanja broda-potiskivača
 „Panonija“ (videti tabele 7.3, 7.9 i 7.10)
3. $\frac{T_{skl}^{(106)}}{B_{skl}^{(106)}} = 0,107$ kod eksperimentalnih ispitivanja broda-potiskivača „Pinki“ prema
 $\frac{T_{skl}^{(124)}}{B_{skl}^{(124)}} = 0,106$ kod eksperimentalnih ispitivanja broda-potiskivača „Panonija“
 (videti tabele 7.3, 7.9 i 7.10)

Najveće razlike kod eksperimentalnih ispitivanja brodova-potiskivača pojavile su se kod deplasmana (istisnine⁴⁰) sklopova koji su iznosili 7098 t kod broda-potiskivača „Pinki“ i 7038 t kod broda-potiskivača „Panonija“.

Intervali iz Tabele 7.11 predstavljaju uslovne granice za primenu modela i najbolje ih je kombinovati sa bazom podataka prikazanom u Tabeli 7.3. Kombinovanje podataka iz dve pomenute tabele podrazumeva uparivanje sastava potiskivanih teretnjaka i brodova-potiskivača, ali samo kada brodovi-potiskivači imaju instalisane snage veće od proračunatih snaga na propelerskim vratilima. Ukoliko se radi o sastavima potiskivanih teretnjaka istih glavnih dimenzija, ali različitih gaženja model

⁴⁰ Deplasman broda u rečnoj vodi brojno je jednak istisnini broda

skupa VNM moguće je primeniti na intervalu minimalnog i maksimalnog gaženja ovih sastava. Međutim, u tom slučaju je nemoguće proveriti tačnost modela skupa VNM za proračun snage na propelerskim vratilima. Jedino je moguće uporediti snage na propelerskim vratilima za različita gaženja potiskivanih sklopova, te ako su snage manje za manja gaženja ustvrditi da model, ipak, prati trend smanjivanja snage na propelerskim vratilima usled smanjivanja gaženja sklopova.

Najbolje granice modela se dobijaju upotrebom intervala minimalnih i maksimalnih brzina plovidbe sklopova u mirnoj vodi. Međutim, da bi tačnost modela skupa VNM mogla biti proverena, potrebno je interval minimalnih i maksimalnih brzina sklopova izjednačiti sa određenim sastavima potiskivanih teretnjaka koji su poslužili za eksperimentalna ispitivanja. Brodovi-potiskivači u potiskivanim sklopovima bi mogli da se menjaju samo ako imaju iste ili veće instalisane snage od brodova-potiskivača na kojima su vršena eksperimentalna ispitivanja. Takođe, moguće je promeniti i brod-potiskivač u sklopu drugim brodom-potiskivačem čije se instalisane snage i glavne dimenzije razlikuju. Međutim, nemoguće je utvrditi tačnost modela skupa VNM obzirom da novodobijeni sklop nije prošao eksperimentalna ispitivanja. U Tabeli 7.12 su date granice za primenu modela skupa VNM.

Tabela 7.12. Granice za primenu modela skupa VNM

Instalisana snaga potiskivača	i_{inst}	i_{pot}	i_{sast}	$\left[\begin{matrix} k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}} \\ k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}} \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} k_{i_{sast} \min}^{i_{pot}} \\ k_{i_{sast} \max}^{i_{pot}} \end{matrix} \right]$	Potiskivani sastav	$D_{mskl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (t)	$L_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$B_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$T_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$\left[\begin{matrix} v_{pl \min}^{(i_{pot}, i_{sast})} \\ v_{pl \max}^{(i_{pot}, i_{sast})} \end{matrix} \right]$ (km/h)
2x331 kW	1	1	1	[1,6]	[1,6]	2+2	5265,899	182,4	20,4	2,02	[7,58;10,3]
2x456 kW	2	2	2	[1,5]	[7,11]	2+2	6264,65	168,17	20,46	2,3	[9,5;11]
			3	[1,5]	[12,16]	2+2+2	9116,26	235,15	20,46	2,3	[8;10]
			4	[1,4]	[17,20]	3+3	9116,26	168,17	30,68	2,3	[8,5;10]
2x379 kW	3	3	5	1	21	2+0	2088,391	92,04	15,2	2,2	14,6
			6	1	22	2+2	3862,183	154,04	15,2	2,2	12,2
			7	[1,3]	[23,25]	3+3	5635,974	154,04	22,8	2,2	[7,6;10]
			8	1	26	2+2+2	5635,974	216,04	15,2	2,2	9,8
			9	1	27	4+4	7409,765	154,04	30,4	2,2	8,7
		7	20	[1,5]	[74,78]	3+3	5515,4	154,93	22,86	2,15	[8,66;10,7]
			21	[1,6]	[79,83]	3+3+2	7177,96	216,89	22,86	2,12	[7,52;9,4]
		8	22	[1,4]	[84,87]	1+1	3888,95	171,88	11,63	2,47	[10;16,2]
			23	[1,5]	[88,92]	2	3888,95	100,93	23,24	2,47	[9,3;15,3]
			24	[1,3]	[93,95]	1+1+1	5677,55	242,98	11,63	2,49	[11,9;13,9]
			25	[1,3]	[96,98]	2+1	5677,55	171,95	23,24	2,49	[11,4;13,1]
			26	[1,3]	[99,101]	2+1	5649,35	171,94	23,24	2,48	[8,93;12,4]
			27	[1,5]	[102,106]	2+2	7436,75	171,97	23,26	2,49	[7,2;11,6]

Tabela 7.12. Granice za primenu modela skupa VNM

Instalisana snaga potiskivača	i_{inst}	i_{pot}	i_{sast}	$\left[\begin{matrix} k_{i_{sast}}^{i_{pot}} \\ k_{i_{sast}}^{i_{pot}} \\ k_{i_{sast}}^{i_{pot}} \end{matrix} \right]_{\min}^{\max}$	$\left[\begin{matrix} k_{i_{sast}}^{i_{pot}} \\ k_{i_{sast}}^{i_{pot}} \\ k_{i_{sast}}^{i_{pot}} \end{matrix} \right]_{\min}^{\max}$	Potiskivani sastav	$D_{mskl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (t)	$L_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$B_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$T_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$\left[\begin{matrix} v_{pl}^{(i_{pot}, i_{sast})} \\ v_{pl}^{(i_{pot}, i_{sast})} \\ v_{pl}^{(i_{pot}, i_{sast})} \end{matrix} \right]_{\min}^{\max}$ (km/h)
			28	[1,5]	[107,111]	2+2	7386,35	171,94	23,23	2,48	[8,21;10,8]
			29	[1,5]	[112,116]	2+2	7383,95	171,95	23,26	2,49	[7,85;11,3]
			30	[1,4]	[117,120]	3+0	5624,75	100,91	34,82	2,49	[10,1;11,4]
			31	[1,4]	[121,124]	2+2	7376,95	171,85	23,24	2,46	[7,2;10,33]
			32	[1,3]	[125,127]	2+1 ^{*)}	5642,95	171,85	23,24	2,49	[8,42;11,6]
			33	[1,3]	[128,130]	2+1 ^{**)}	5642,95	171,85	23,24	2,49	[8,75;12,3]
2x110,4	4	4	10	[1,3]	[28,30]	1+0	1065,38	89,35	8,53	1,9	[11,8;13,7]
			11	[1,5]	[31,35]	2+0	2009,48	89,35	17,06	1,9	[8,45;11,4]
2x706,6	5	5	12	[1,5]	[36,40]	3+3	11933,32	195,03	32,97	2,4	[8,8;13,3]
			13	[1,6]	[41,46]	2+2	8077,84	195,03	21,98	2,4	[9,2;15,8]
			14	[1,5]	[47,51]	1+1+1	6136,1	275,01	10,99	2,4	[11,2;16,7]
			15	1	52	2+0	4219,5	115,01	21,98	2,4	15,6
			16	[1,6]	[53,58]	1+1	4224,2	195,01	10,99	2,4	[11,6;18,5]
2x541	6	6	17	[1,6]	[59,63]	3+3	5206,19	155,86	22,81	1,98	[8,61;12,1]
			18	[1,5]	[64,68]	4+4	6760,58	155,86	30,43	1,97	[7,44;10,9]
			19	[1,5]	[69,73]	3+3+3	7569,73	217,76	22,82	1,97	[6,3;10,05]
2x265 kW	7	10	34	[1,4]	[131,134]	1+1	3418,4	168,12	11,65	2,31	[10,4;13,9]
			35	[1,3]	[135,137]	2+1 ^{*)}	5044,8	168,13	23,27	2,31	[8,9;11,8]
			36	[1,5]	[138,142]	2+2	6692	168,13	23,28	2,32	[6,08;10,6]
		12	42	[1,4]	[167,170]	1+0	1940,4	97,09	11,65	2,47	[11,6;15,8]
			43	[1,4]	[171,174]	1+1	3717,6	168,12	11,65	2,49	[10,1;13,5]
			44	[1,4]	[175,178]	1+1+1	5466	239,12	11,65	2,49	[8,43;11,4]
3x810	8	11	37	[1,6]	[143,148]	3+3+3 ^{*)}	12169,7	243,36	30,65	2,06	[9,75;13,5]
			39	[1,5]	[153,157]	2+2+2 ^{*)}	8337,39	235,29	20,43	2,08	[10,5;14,8]
			41	[1,5]	[162,166]	2+2 ^{*)}	5788,59	168,29	20,44	2,08	[12,3;16,2]
2x810	9	11	38	[1,4]	[149,152]	3+3+3 ^{**)}	12169,7	243,36	30,65	2,06	[8,68;10,6]
			40	[1,4]	[158,161]	2+2+2 ^{**)}	8337,39	235,29	20,43	2,08	[9,88;12,3]
		13	45	[1,4]	[179,182]	3+3	7767,63	168,75	30,65	1,92	[8,8;14,22]
2x147 kW	10	14	46	[1,3]	[183,185]	1+0	2121,9	88,93	10,96	2,63	[9,13;11,3]
			47	[1,3]	[186,188]	1+0	415,95	89,07	11	0,47	11,29
2x486 kW	11	15	48	[1,5]	[189,193]	2+2	5769,44	165,31	20,43	2,16	[10,9;15,5]

^{*)} nesimetrični sastav ^{**)} simetrični sastav ^{*)} pri radu sva tri pogonska motora

^{**)} pri radu samo levog i desnog pogonskog motora

Tabela 7.12 je nastala kao rezultat promena koje su izvršene u Tabeli 4.2. Glavna razlika između pomenutih tabela se nalazi u prvoj koloni i u novouvedenoj drugoj koloni. U Tabeli 7.12 brodovi-potiskivači su grupisani po svojim instalisanim snagama. Sve instalisane snage su dobile svoje redne brojeve. Granice za primenu modela se nalaze u trećoj, četvrtoj i poslednjoj koloni. Na osnovu rešenja koje bi dao model skupa VNM, moguće je iz prve kolone odabrati potiskivač za dati sastav

potiskivanih teretnjaka, zatim pomoću treće i četvrte kolone napraviti potreban potiskivani sklop. Sa druge strane, ovako dobijeni sklop bi mogao „učiti“ u proračun sa svojim glavnim dimenzijama i brzinama iz intervala koji su dati u poslednjoj koloni Tabele 7.12.

Da bi se lakše prikazale granice za primenu modela, uvodi se nova relacija (ρ_{GM}) koju čine elementi prethodne relacije (ρ) i novi parovi kombinacija brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka čija je instalisana snaga jednaka instalisanoj snazi brodova-potiskivača koji su bili vezani na iste sastave potiskivanih teretnjaka tokom eksperimentalnih ispitivanja. Elementi relacije ρ_{GM} , odnosno uređeni parovi brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka koji predstavljaju granice za primenu modela skupa VNM su sledeći:

$$\rho_{GM} = \{(1,1), (2,2), (2,3), (2,4), (3,5), (3,6), (3,7), (3,8), (3,9), (4,10), (4,11), (5,12), (5,13), (5,14), (5,15), (5,16), (6,17), (6,18), (6,19), (7,20), (7,21), (8,22), (8,23), (8,24), (8,25), (8,26), (8,27), (8,28), (9,29), (9,30), (9,31), (9,32), (9,33), (10,34), (10,35), (10,36), (11,37), (11,38), (11,39), (11,40), (11,41), (12,42), (12,43), (12,44), (13,45), (14,46), (14,47), (15,48), (7,5), (7,6), (7,7), (7,8), (7,9), (8,5), (8,6), (8,7), (8,8), (8,9), (9,5), (9,6), (9,7), (9,8), (9,9), (3,20), (3,21), (8,20), (8,21), (9,20), (9,21), (3,22), (3,23), (3,24), (3,25), (3,26), (3,27), (3,28), (7,22), (7,23), (7,24), (7,25), (7,26), (7,27), (7,28), (9,22), (9,23), (9,24), (9,25), (9,26), (9,27), (9,28), (3,29), (3,30), (3,31), (3,32), (3,33), (7,29), (7,30), (7,31), (7,32), (7,33), (8,29), (8,30), (8,31), (8,32), (8,33), (10,42), (10,43), (10,44), (11,45), (12,34), (12,35), (12,36), (13,38), (13,40)\}$$

Jasno je da važe sledeće zakonitosti:

$$\rho \subset \rho_{GM} \text{ i } \rho_{GM} \subset I_{pot} \times I_{sast} \quad (7.36)$$

I dok je ukupan broj kombinacija merenja sa eksperimentalnih ispitivanja bio jednak ukupnom broju podataka od $r' = 193$, sada je broj ulaznih podataka na osnovu relacije (ρ_{GM}), tj. novih parova brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka koji su mogli da budu ulaz u model skupa VNM bio jednak $193+3 \times 7+3 \times 11+3 \times 28+3 \times 19+1 \times 12+1 \times 12+1 \times 4+1 \times 8 = 424$. Takođe, pošto su granice za primenu modela kod brzine date intervalima u poslednjoj koloni Tabele 7.12, zaključuje se da je broj kombinacija ulaznih vrednosti u model skupa VNM jako veliki. Ipak, iako je taj broj jako veliki, on ne uzima u obzir sve moguće kombinacije, te je model potrebno testirati i na nekim ulaznim podacima koji su potpuno izvan granica primene modela. Testiranje modela pomoću ovakvih ulaznih vrednosti može da posluži da se dobije trend koji daje model skupa VNM i da se uradi trend snaga na propellerskim vratilima. Ovako proračunate vrednosti snaga na propellerskim vratilima bi mogle biti od koristi u eksploataciji brodova-potiskivača.

Na primeru ispitivanja broda-potiskivača „Pinki“ u sklopu „2+2“ i promenom vrednosti brzina sklopa u mirnoj vodi dobijenih na osnovu granica za primenu modela skupa VNM biće prikazane snage na propellerskim vratilima. Brzine sklopova u mirnoj vodi koje će biti korišćene su iz intervala koji odgovara intervalu minimalne i maksimalne brzine sklopa u mirnoj vodi preuzete iz Tabele 7.12. Ove brzine ne odgovaraju niti jednoj brzini koja je izmerena tokom eksperimentalnih ispitivanja za $k' = 102, 103, 104, 105, 106$ i one su sledeće: 8, 9, 10, 11 km/h. Proračun snaga na propellerskim vratilima je izvršen za date brzine sklopa u mirnoj vodi za brod-potiskivač „Pinki“.

Takođe, model skupa VNM će biti proveren i na potiskivanom sklopu u okviru kojeg je plovio potiskivač „Kladovo“ ($i_{pot}=13, i_{sast}=45$) sa brzinama sklopa u mirnoj vodi od 9, 10, 11, 12, 13 i 14 km/h koje su bile u intervalu brzina $[v_{pl\ min}^{(13,45)} = 8,8 \text{ km/h}, v_{pl\ max}^{(13,45)} = 14,22 \text{ km/h}]$ i za redne brojeve merenja u intervalu $[k'_{45\ min} = 179, k'_{45\ max} = 182]$. Provera tačnosti modela skupa VNM je izvršena pomoću rezultata istraživanja prikazanih u radu (Radonjić, 2007). Proračun i poređenje snaga na propellerskim vratilima prikazani su u Tabeli 7.13.

Tabela 7.13. Proračun snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača „Pinki“ i „Kladovo“ na osnovu granica za primenu modela skupa VNM

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$k'_{i_{sast}}^{i_{pot}}$	$v_{pl}^{(k'_{i_{sast}}^{i_{pot}}, k'_{i_{sast}}^{i_{pot}+1})}$ (km/h)	$\tilde{N}_{vr}^{(k'_{i_{sast}}^{i_{pot}}, k'_{i_{sast}}^{i_{pot}+1})}$ (kW)	$\tilde{N}_{vr}^{(k'_{i_{sast}}^{i_{pot}}, k'_{i_{sast}}^{i_{pot}+1})}$ (kW)	$\left| \tilde{N}_{vr}^{(k'_{i_{sast}}^{i_{pot}}, k'_{i_{sast}}^{i_{pot}+1})} - \tilde{N}_{vr}^{(k'_{i_{sast}}^{i_{pot}}, k'_{i_{sast}}^{i_{pot}+1})} \right|$ (kW)
„Pinki“ („2+2“)	8	27	102	8	350,90	325,18	25,71
			103	9	436,66	416,57	20,09
			103	10	536,00	522,93	13,07
			104	11	648,92	637,18	11,74
„Kladovo“ („3+3“)	13	45	179	9	428,51	427,74	0,76
			179	10	581,35	577,55	3,80
			179	11	776,99	773,77	3,22
			180	12	1015,42	1014,08	1,34
			180	13	1296,65	1345,28	48,63
			181	14	1620,68	1607,28	13,39

$\tilde{N}_{vr}^{(k'_{i_{sast}}^{i_{pot}}, k'_{i_{sast}}^{i_{pot}+1})}$ – snaga na propellerskim vratilima dobijena primenom modela skupa VNM

$$\left(\tilde{N}_{vr}^{(k'_{i_{sast}}^{i_{pot}}, k'_{i_{sast}}^{i_{pot}+1})} = \tilde{N}_{vr}^{(k'_{i_{sast}}^{i_{pot}}, k'_{i_{sast}}^{i_{pot}+1})} \left(\frac{L_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}}{B_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}}, \frac{T_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}}{B_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}}, \frac{L_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}}{(D_{mskl}^{(i_{pot}, i_{sast})})^{1/3}}, F_r^{(k'_{i_{sast}}^{i_{pot}}, k'_{i_{sast}}^{i_{pot}+1})} \right) \right)$$

$\tilde{N}_{vr}^{(k_{isast}^{i_{pot}}, k_{isast}^{i_{pot}+1})}$ – snaga na propellerskim vratilima dobijena primenom modela jednostavne krivolinijske regresije (parabolična zavisnost brzine plovidbe i snage) –

$$\tilde{N}_{vr}^{(k_{isast}^{i_{pot}}, k_{isast}^{i_{pot}+1})} = \tilde{N}_{vr}^{(k_{isast}^{i_{pot}}, k_{isast}^{i_{pot}+1})} \left(v_{pl}^{(k_{isast}^{i_{pot}}, k_{isast}^{i_{pot}+1})} \right) \quad (\text{Radonjić i Čolić, 2011})$$

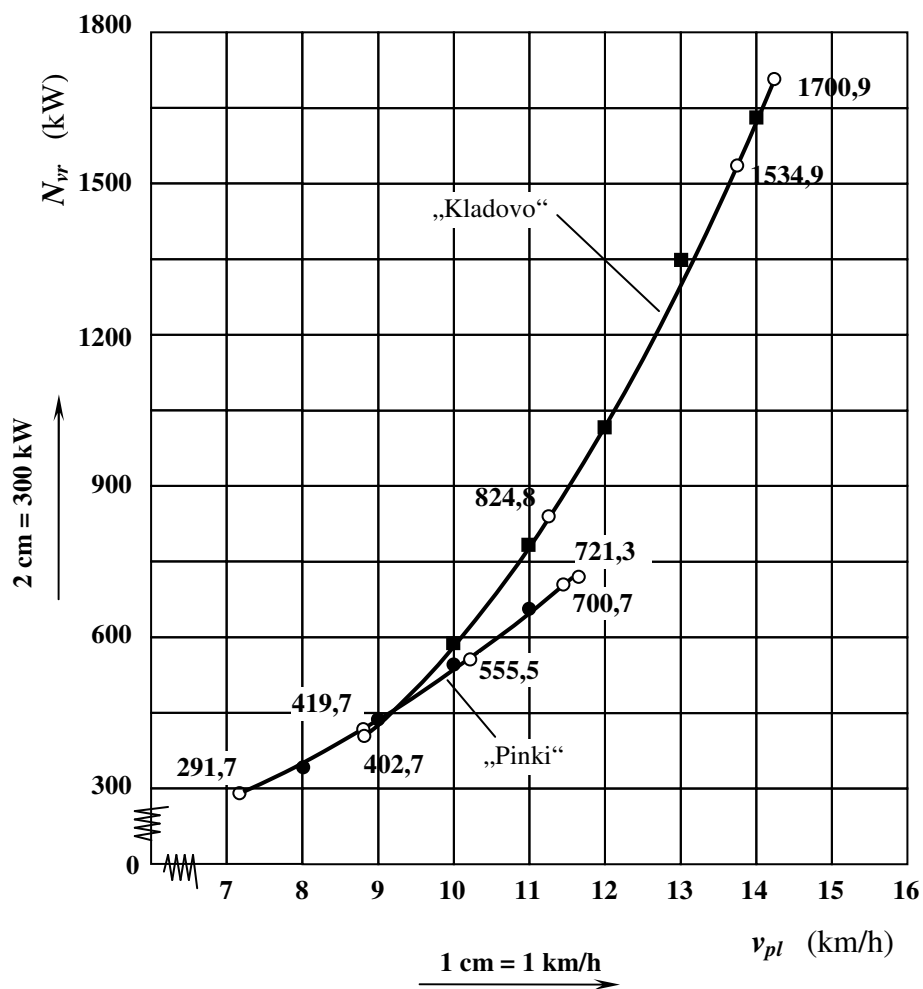
$v_{pl}^{(k_{isast}^{i_{pot}}, k_{isast}^{i_{pot}+1})} = v_{pl}^{(k_{27}^8, k_{27}^8+1)} (k_{27}^8 \in \{102, 103, 104\}) = v_{pl}^{(102, 103)} = 8 \text{ km/h}$ (prvi red, Tabela 7.13)

Indeks krivolinijske korelacije (Vukadinović i Popović, 1996) je jednak jedinici za obe jednačine krivolinijske regresije predstavljene u radu Radonjića (2007) što znači da je veza između parova podataka $(v_{pl}^{(k')}, N_{vr}^{(k')})$ (za $k' = 102, 103, 104, 105, 106$ i $k' = 179, 180, 181, 182$) vrlo tesna. Na osnovu rada Čolića (1985) i rada Radonjića (2007) može se zaključiti da su vrednosti snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača „Pinki“ i „Kladovo“ dobijene modelom krivolinijske regresije potpuno merodavne. Zbog toga se razlike između ovih vrednosti i vrednosti dobijenih primenom modela skupa VNM mogu usvojiti da budu apsolutne greške (videti sedmu kolonu u Tabeli 7.13).

Na osnovu vrednosti apsolutnih grešaka prikazanih u Tabeli 7.13 zaključuje se da je 7 vrednosti (za brzine plovidbe u mirnoj vodi od 10 i 11 km/h ($i_{pot}=8, i_{sast}=27$) i 9, 10, 11, 12 i 14 km/h ($i_{pot}=13, i_{sast}=45$)) manje od srednje apsolutne greške proračunate na skupu ΔN_{vr} . Za brzinu plovidbe od 9 km/h ($i_{pot}=8, i_{sast}=27$) vrednost apsolutne greške snage je veća od srednje apsolutne greške proračunate na skupu ΔN_{vr} , ali i manja od srednje kvadratne apsolutne greške koje su proračunate na skupu za obučavanje. Za brzinu plovidbe od 8 km/h ($i_{pot}=8, i_{sast}=27$) vrednost vrednost apsolutne greške snage je veća i od srednje apsolutne greške i od srednje kvadratne apsolutne greške koje su proračunate na skupu za obučavanje, ali je i manja i od srednje apsolutne greške i od srednje kvadratne apsolutne greške koje su proračunate na skupu za testiranje. Za preostalu brzinu plovidbe od 13 km/h ($i_{pot}=13, i_{sast}=45$) vrednost snage je veća i od srednje apsolutne greške i od srednje kvadratne apsolutne greške koje su proračunate na skupu testiranje.

Prikazane vrednosti snaga na propellerskim vratilima u Tabeli 7.13 značajno doprinose boljoj pouzdanosti modela skupa VNM. Da bi se što jasnije prikazale greške koju su dobijene primenom modela skupa VNM i prikazane u Tabeli 7.13, napravljen je dijagram br.3.

DIJAGRAM BR. 3. Dijagram zavisnosti izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brodove-potiskivače „Pinki” i „Kladovo“ sa apsolutnim greškama koje se dobijaju primenom modela skupa VNM



- Vrednosti snage dobijene eksperimentalnim ispitivanjima
- Vrednosti snage dobijene primenom modela jednostavne krivolinijske regresije
- Vrednosti snage dobijene primenom modela skupa VNM za brod-potiskivač „Kladovo”
- Vrednosti snage dobijene primenom modela skupa VNM za brod-potiskivač „Pinki”

7.5. Proračun snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača koje nisu dobijene eksperimentalnim ispitivanjima

Krive zavisnosti snage na propelerskim vratilima od brzine plovidbe u mirnoj vodi se aproksimiraju parabolama. Međutim, snage na propelerskim vratilima koje nisu merene tokom eksperimentalnih ispitivanja ne mogu pouzdano da budu utvrđene bilo kojom aproksimativnom krivom, pošto je nepoznato kolike su im vrednosti. Takođe, vrednosti ovih snaga mogu da budu takve da im odgovara više aproksimativnih krivih parabola, te je nejasno koje su to prave vrednosti snaga na propelerskim vratilima. Zbog toga će u ovoj disertaciji biti određene ekstrapolacione krive snage u odnosu na brzinu pomoću modela skupa VNM.

Kako je zakonitost promene snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača ustanovljena u prethodnim poglavljima može se preći na predviđanje snaga kroz ekstrapolaciju krivih dobijenih na osnovu primenjenih granica modela skupa VNM.

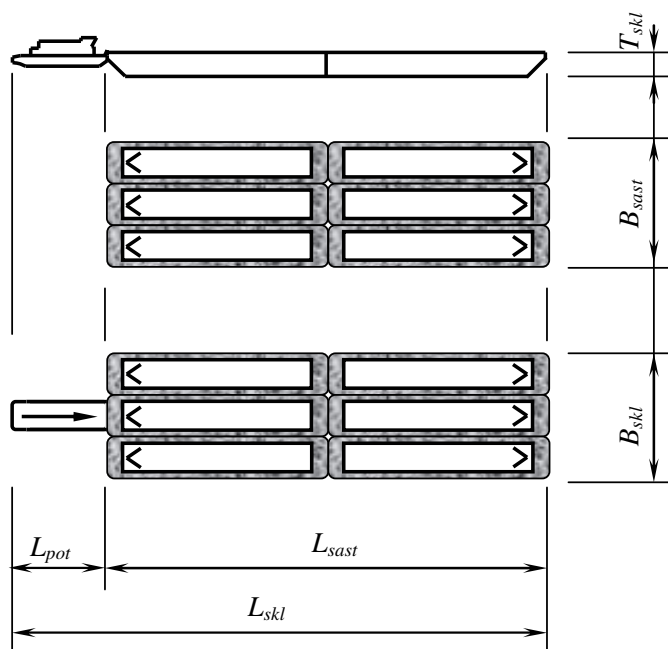
U prvom delu će biti analiziran uticaj promene brzine plovidbe u mirnoj vodi na promenu snage na propelerskim vratilima za poznate kombinacije brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka koje pripadaju relaciji ρ_{GM} . Brzine plovidbe u mirnoj vodi će uzimati vrednosti koje se ne nalaze u intervalima $\left[v_{pl\ min}^{(i_{pot}, i_{sast})}; v_{pl\ max}^{(i_{pot}, i_{sast})} \right]$ za $(i_{pot}, i_{sast}) \in S_{(i_{pot}, i_{sast})}$, a koje su date u tabelama 4.2 i 7.12. Brzina plovidbe u mirnoj vodi će uzimati vrednosti koje su izvan datih intervala.

U drugom delu će biti analiziran uticaj promene dužine sklopova koji pripadaju preostalim kombinacijama brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka, a ne pripadaju relaciji ρ_{GM} na promenu snage na propelerskim vratilima. Celokupan proračun promene pomenutih vrednosti poznatih veličina biće obavljen pomoću modela skupa VNM.

Osnovna ideja oko promene brzine plovidbe i dužine sklopova se sastoji u tome da je broj sastava potiskivanih teretnjaka, koji su učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima dovoljno velik da može da se primeni u praksi i da je dužina brodova-potiskivača na našem delu plovnog puta Dunava oko 35 m (Radojčić, 2009). Eksploataciona nosivost sastava biće takva da zadovoljava dobro poznatu praksu brodarstava da im sastavi uvek plove na KVL, tj. da su natovareni do maksimalnog

gaženja potiskivanih teretnjaka. Na ovaj način će sklopovi uvek imati isto gaženje i širinu na KVL, odnosno, neće biti potrebe za promenom širine i gaženja u modelu skupa VNM. Takođe, smatraće se da su korisnosti brodske propulzije i brodskih pogonskih postrojenja jednaki kod svih brodova-potiskivača.

Ukoliko se razmotre razlike u glavnim osobenostima sastava potiskivanih teretnjaka i potiskivanih sklopova koji su prikazani u tabelama 4.2 i 7.12 lako se zaključuje da je osnovna razlika u dužinama sastava i sklopova, dok su ostale osnovne osobenosti jednake i za sastave i za sklopove. Razlike u dužinama potiču od broda-potiskivača koji je privezan na sklop. Na taj način, promena granica za brzinu plovidbe u mirnoj vodi i dužinu sklopova neće remetiti već postojeće širine i gaženja sklopova. Sve razlike i jednakosti između glavnih osobenosti sastava i sklopova prikazane su na Slici 7.11.



$$L_{skl} > L_{sast}; L_{sast} = L_{skl} - L_{pot}; B_{skl} = B_{sast}; T_{skl} = T_{sast}$$

Slika 7.11. Šematski prikaz uporednih glavnih osobenosti sastava potiskivanih teretnjaka u oznaci „3+3“ i sklopa u kome se nalazi brod-potiskivač „Deligrad“ i pomenuti sastav

Primer jednog predviđanja snage na propelerskim vratilima dobijenog na osnovu modela skupa VNM je urađen pomoću prva četiri potiskivana sklopa čije kombinacije brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka pripadaju uređenim parovima prva 4 elementa relacije ρ . To su brodovi-potiskivači „Bukovik“ i sastav potiskivanih teretnjaka „2+2“ i brod-potiskivač „Deligrad“ i sastavi potiskivanih teretnjaka „2+2“, „2+2+2“ i „3+3“. Ekstrapolacija snaga dva broda-potiskivača za sva 4 potiskivana

sklopa je urađena za brzine koje nisu pripadale poznatim intervalima koji su prikazani u tabelama 4.2 i 7.12 i koje nisu bile manje od 7 km/h i veće od 14 km/h. Dakle, ekstrapolacija snaga za date brodove-potiskivače je urađena na osnovu sledećih intervala brzina plovidbe:

$$\left[7, v_{pl\ min}^{(i_{pot}, i_{sast})}\right) \wedge \left(v_{pl\ max}^{(i_{pot}, i_{sast})}, 14\right] \quad (7.37)$$

Sve vrednosti koje su učestvovala u ekstrapolaciji snaga bile su celobrojne. Da bi vrednosti snaga na propellerskim vratilima mogle jasno da se prikažu uvode se sledeće oznake:

$\gamma_{i_{sast}}^{i_{pot}}$ – ukupan broj brzina koje uzimaju celobrojne vrednosti iz intervala $\left[7, v_{pl\ min}^{(i_{pot}, i_{sast})}\right) \wedge \left(v_{pl\ max}^{(i_{pot}, i_{sast})}, 14\right]$

$\kappa_{i_{sast}}^{i_{pot}}$ – redni broj brzina koje uzimaju celobrojne vrednosti iz intervala $\left[7, v_{pl\ min}^{(i_{pot}, i_{sast})}\right) \wedge \left(v_{pl\ max}^{(i_{pot}, i_{sast})}, 14\right]$

$$\kappa_{i_{sast}}^{i_{pot}} = \begin{cases} r', r'+1, \dots, r'+\gamma_{i_{sast}}^{i_{pot}}, & i_{pot} = 1, i_{sast} = 1 \\ r'+\gamma_{i_{sast}-1}^{i_{pot}-1} + 1, r'+\gamma_{i_{sast}-1}^{i_{pot}-1} + 2, \dots, r'+\gamma_{i_{sast}}^{i_{pot}}, & i_{pot} > 1, i_{sast} > 1, \\ & (i_{pot} - 1, i_{sast} - 1) \in \rho_{GM} \end{cases} \quad (7.38)$$

$$\forall i_{pot} \in I_{pot}, i_{sast} \in I_{sast}$$

γ – ukupan broj brzina koje uzimaju celobrojne vrednosti iz intervala $\left[7, v_{pl\ min}^{(i_{pot}, i_{sast})}\right) \wedge \left(v_{pl\ max}^{(i_{pot}, i_{sast})}, 14\right]$ i za koje se računa snaga na propellerskim vratilima brodova potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“

κ – redni broj brzina koje uzimaju celobrojne vrednosti iz intervala $\left[7, v_{pl\ min}^{(i_{pot}, i_{sast})}\right) \wedge \left(v_{pl\ max}^{(i_{pot}, i_{sast})}, 14\right]$ i za koje se računa snaga na propellerskim vratilima brodova potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“

$$\kappa = r' + 1, r' + 2, \dots, r' + \gamma_{i_{sast}}^{i_{pot}}, i_{pot} = 2, i_{sast} = 4$$

Na osnovu uvedenih oznaka moguće je prikazati vrednosti podataka koji će služiti za proračun ulaznih vrednosti u model skupa VNM u sledećoj Tabeli 7.14.

Tabela 7.14. Ulazne vrednosti podataka u model skupa VNM za proračun snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ koji se ne zasnivaju na granicama za primenu modela skupa VNM

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$K_{i_{sast}}^{i_{pot}}$	Potiskivani sastav	$D_{mskl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (t)	$L_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$B_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$T_{skl}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (m)	$v_{pl\ min}^{(i_{pot}, i_{sast})}$ (km/h)	$[7, v_{pl\ min}^{(i_{pot}, i_{sast})}], (v_{pl\ max}^{(i_{pot}, i_{sast})}, 14]$ (km/h)
„Bukovik“	1	1	194	2+2	5265,899	182,4	20,4	2,02	7	[7;7,58),(10,3;14]
			195						11	
			196						12	
			197						13	
			198						14	
„Deligrad“	2	2	199	2+2	6264,65	168,17	20,46	2,3	7	[7;9,5),(11;14]
			200						8	
			201						9	
			202						12	
			203						13	
			204						14	
	3	3	2+2+2	205	9116,26	235,15	20,46	2,3	7	[7;8),(10;14]
				206					11	
				207					12	
				208					13	
				209					14	
	4	4	3+3	210	9116,26	168,17	30,68	2,3	7	[7;8,5),(10,14]
				211					8	
				212					11	
				213					12	
214				13						
215	14									

Za svaki od 4 pomenuta sklopa krive zavisnosti snage na propellerskim vratilima od brzine plovidbe u mirnoj vodi (na osnovu kojih je urađena ekstrapolacija snaga) bile su određene na osnovu poznatih intervala brzine plovidbe iz tabela 4.2 i 7.12 ($[v_{pl\ min}^{(i_{pot}, i_{sast})}; v_{pl\ max}^{(i_{pot}, i_{sast})}]$) za $i_{pot} = 1,2$ i $i_{sast} = 1,2,3,4$).

Na osnovu svih parova vrednosti brzina plovidbe i snaga brodova-potiskivača iz intervala od 7 do 14 km/h napravljeni su dijagrami zavisnosti snage na propellerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brodove-potiskivače „Bukovik“ i „Deligrad“ u sklopovima sa eksperimentalnih ispitivanja koji su prikazani u tabelama 4.2 i 7.12. Dijagrami zavisnosti snage su dobijeni spajanjem krivih koje su dobijene na osnovu poznatih brzina plovidbe koje su zabeležene tokom eksperimentalnih ispitivanja i brzina plovidbe u mirnoj vodi koje nisu pripadale poznatim intervalima sa merenja. Ove dijagrame brodarstva mogu koristiti kao osnovu za izbor brodova-potiskivača na osnovu date brzine plovidbe potiskivanih sklopova u mirnoj vodi. Princip je sledeći: na osnovu

date brzine plovidbe u mirnoj vodi, sa dijagrama se očitaju potrebne vrednosti snage na propellerskim vratilima na osnovu kojih se biraju brodovi-potiskivači čija je instalisana snaga veća od očitane snage na propellerskim vratilima.

Da bi se dijagrami dobili prvo mora da se objasni metodologija po kojoj su vrednosti snaga na propellerskim vratilima bile usvajane za vrednosti brzina plovidbe koje su bile izvan poznatih intervala.

Kao što je već naglašeno, model skupa VNM se sastoji od 4 VNM, a kriterijum po kojem se usvajaju izlazne vrednosti bio je minimalna apsolutna greška snaga na propellerskim vratilima. Ovakav postupak usvajanja izlaznih vrednosti je dosta jasan kada se radi o vrednostima koje su pripadale skupu za obučavanje ili skupu za testiranje, odnosno poznatim intervalima vrednosti sa eksperimentalnih ispitivanja. Međutim, kada ulazne vrednosti ne pripadaju niti jednom od skupova, odnosno poznatim intervalima vrednosti, onda je teško napraviti kriterijum po kojem će se birati jedna od četiri izlazne vrednosti iz svake pojedinačne VNM koja pripada modelu skupa VNM. Problem je što ne postoji poznata vrednost snage od koje bi se mogle oduzeti proračunate četiri snage i na taj način odrediti vrednost čija je apsolutna greška najmanja.

U ovoj disertaciji će biti predstavljene tri metodologije proračuna izlaznih vrednosti snaga na propellerskim vratilima. Osnovna razlika u metodologijama je način na koji se vrši odabir izlaznih vrednosti iz modela skupa VNM. Prve dve metodologije koriste matematičke izraze u kojima figurišu vrednosti težina svake pojedinačne VNM iz modela skupa VNM (W_I) i one su poznate iz literature. U trećoj metodologiji se odabir izlaznih vrednosti vrši isto kao i odabir koji je predstavljen u potpoglavlju 7.3.6 ona se zasniva se na pronalaženju aproksimativnih krivih parabola između parova vrednosti snaga i brzina plovidbi u mirnoj vodi. Za crtanje potrebnih ekstrapolacionih krivih i dijagrama biće usvojene one vrednosti snage na propellerskim vratilima koje su dobijene prema prvoj i trećoj metodologiji i koje imaju manja odstupanja između kombinacija

Prva metodologija se zasniva na već postojećim vrednostima težina svake pojedinačne VNM iz modela skupa VNM (W_I). Pomoću ove metodologije izlazne vrednosti snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača se dobija na sledeći način:

$$\hat{N}_{vr}^{(k)} = \sum_{I=1}^{M'} (W_I)_1 \cdot (\hat{N}_{vr}^{(k)})_I, \forall k, M' = 4 \quad (7.39)$$

gde se sa $(\mathbf{W}_{I'})_1$ označavaju vrednosti težina svake pojedinačne VNM iz modela skupa VNM koje su proračunate pomoću izraza (6.67).

Druga metodologija se zasniva na RBLC (*eng. Rank-Based Linear Combination*) metodologiji (Yao i Liu, 1998) koja je objašnjena u radu Landassuri-Moreno i Bullinaria (2009). Prema ovoj metodologiji snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača se dobija na sledeći način:

$$\hat{N}_{vr}^{(k)} = \sum_{I'=1}^{M'} (\mathbf{W}_{I'})_2 \cdot (\hat{N}_{vr}^{(k)})_{I'}, \forall k, M' = 4 \quad (7.40)$$

gde se $(\mathbf{W}_{I'})_2$ određuje pomoću sledećeg izraza:

$$(\mathbf{W}_{I'})_2 = \frac{e^{(\beta \cdot (M'+1-I'))}}{\sum_{J'=1}^{M'} e^{(\beta J')}} \quad (7.41)$$

β je konstanta koja uzima vrednosti iz skupa racionalnih brojeva koji su veći ili jednaki od nule. Kada je $\beta = 0$ dobiće se model skupa VNM u kome svaka sastavna mreža ima podjednak uticaj na izlazne vrednosti. To znači da se izlazne vrednosti snage proračunavaju kao srednja vrednost snaga na propellerskim vratilima proračunatih pomoću svih sastavnih mreža u modelu skupa VNM. Ako $\beta \rightarrow \infty$ onda će vrednost težine grane jedne sastavne mreže težiti jedinici.

Ukoliko se pre obučavanja sastavnih mreža usvoji izraz 7.41, onda se menja i kriterijum po kojem se odabira izlazna vrednost iz modela skupa VNM. Zato se izraz 7.41 može koristiti i kao kriterijum za dobijanje vrednosti snaga na propellerskim vratilima za ulazne podatke koji pripadaju ukupnom skupu parova (ulaz, izlaz) podataka $(\mathbf{S}_r^{(X,D)})$. Takođe, odabirom vrednosti za konstantu β moguće je izjednačiti vrednosti težina svake pojedinačne VNM iz modela skupa VNM za prvu i drugu metodologiju $(\mathbf{W}_{I'})_1 = (\mathbf{W}_{I'})_2$.

U ovoj disertaciji će se snage na propellerskim vratilima usvajati pomoću sve tri metodologije. Rezultati usvajanja i primena metodologija biće tabelarno prikazani i upoređeni. Usvojiće se rezultati koji najmanje odstupaju od aproksimacione krive parabole za parove tačaka snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača i brzina plovidbi u mirnoj vodi dobijenih pomoću različitih metodologija i za date potiskivane sklopove.

1) Usvajanje vrednosti snaga na propellerskim vratilima pomoću prve metodologije

Prva metodologija se zasniva na izrazu (7.39) i proračunu snaga pomoću izraza (7.3) i (7.6). Prema ovoj metodologiji snaga koja se usvaja zavisi od vrednosti težina svake pojedinačne VNM iz modela skupa VNM (W_r) koje su određene na osnovu AIC kriterijuma. U Tabeli 7.15 date su vrednosti snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ za brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi u intrevalu od 7 do 14 km/h.

Tabela 7.15. Usvojene snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ prema prvoj metodologiji

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$k_{i_{sast}}^{i_{pot}}$	k (k')	$v_{pl}^{(k)}$ (km/h)	$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)
„Bukovik“	1	1	194	194	7	290,79
			-	1	7,58	187,57
			-	2	9,08	341,18
			-	3	9,65	426,46
			-	4	9,88	478,07
			-	5	10,05	523,86
			-	6	10,3	576,84
			195	195	11	845,62
			196	196	12	1299,11
			197	197	13	1631,05
			198	198	14	1747,67
„Deligrad“	2	2	199	199	7	206,05
			200	200	8	273,47
			201	201	9	362,20
			-	7	9,5	405,25
			-	8	10	439,44
			-	9	10,5	536,64
			-	10	11	620,71
			-	11	11,5	687,29
			202	202	12	668,61
			203	203	13	696,04
			204	204	14	691,31
		3	205	205	7	214,79
			-	12	8	353,43
			-	13	8,5	444,74
			-	14	9	530,14
			-	15	9,5	672,74
			-	16	10	847,40
			206	206	11	1122,99
			207	207	12	1357,64
		208	208	13	1467,27	
		209	209	14	1488,57	
		4	210	210	7	234,12
			211	211	8	360,12
			-	17	8,5	421,10
			-	18	9	555,50
-	19		9,5	673,43		
-	20		10	850,26		
212	212		11	1030,68		
213	213		12	1219,29		
214	214	13	1425,20			
215	215	14	1633,08			

2) Usvajanje vrednosti snaga na propellerskim vratilima pomoću druge metodologije

Druga metodologija se zasniva na izrazu (7.40) i proračunu snaga pomoću izraza (7.3) i (7.6). Prema ovoj metodologiji snaga koja se usvaja zavisi od vrednosti težina svake pojedinačne VNM iz modela skupa VNM (W_r) koje su određene na osnovu izraza (7.41). Konstanta β je broj koji utiče na konačne vrednosti W_r . U zavisnosti od usvojene vrednosti za konstantu β favorizuje se jedna sastavna mreža iz modela skupa VNM u odnosu na sve ostale. Pošto je AIC kriterijumom utvrđeno da se pomoću VNM sa 15 čvorova u skrivenom sloju dobija najviše izlaznih vrednosti snaga na propellerskim vratilima koje su bile usvojene kao izlazne vrednosti iz modela skupa VNM, ova mreža će biti favorizovana u odnosu na ostale odabirom vrednosti za konstantu β . Vrednosti za konstantu β u ovoj disertaciji bile su 0,25, 0,5, 0,75, i 1. U Tabeli 7.16 date su vrednosti snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ za brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi u intevalu od 7 do 14 km/h koje su proračunate na osnovu druge metodologije.

Tabela 7.16. Usvojene snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ prema drugoj metodologiji

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$k_{i_{sast}}^{i_{pot}}$	k (k')	$v_{pl}^{(k)}$ (km/h)	$\beta=0,25$	$\beta=0,5$	$\beta=0,75$	$\beta=1$
						$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)	$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)	$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)	$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)
„Bukovik“	1	1	194	194	7	306,91	315,96	316,62	311,00
			-	1	7,58	187,57	187,57	187,57	187,57
			-	2	9,08	341,18	341,18	341,18	341,18
			-	3	9,65	426,46	426,46	426,46	426,46
			-	4	9,88	478,07	478,07	478,07	478,07
			-	5	10,05	523,86	523,86	523,86	523,86
			-	6	10,3	576,84	576,84	576,84	576,84
			195	195	11	853,80	861,83	868,83	874,72
			196	196	12	1330,94	1359,83	1382,58	1399,63
			197	197	13	1667,88	1698,63	1719,99	1733,63
			198	198	14	1766,92	1779,47	1784,23	1783,68
„Deligrad“	2	2	199	199	7	200,36	196,30	194,34	194,00
			200	200	8	264,64	257,71	253,54	251,69
			201	201	9	353,47	346,42	341,96	339,77
			-	7	9,5	405,25	405,25	405,25	405,25
			-	8	10	439,44	439,44	439,44	439,44
			-	9	10,5	536,64	536,64	536,64	536,64
			-	10	11	620,71	620,71	620,71	620,71
			-	11	11,5	687,29	687,29	687,29	687,29
			202	202	12	676,81	684,59	690,84	695,34
			203	203	13	699,75	704,81	710,41	715,68
			204	204	14	683,59	680,40	681,89	686,25
		3	205	205	7	218,83	223,52	228,16	232,24
			-	12	8	353,43	353,43	353,43	353,43
			-	13	8,5	444,74	444,74	444,74	444,74
			-	14	9	530,14	530,14	530,14	530,14
			-	15	9,5	672,74	672,74	672,74	672,74
			-	16	10	847,40	847,40	847,40	847,40
			206	206	11	1111,73	1092,19	1067,03	1040,28
			207	207	12	1318,83	1266,61	1207,81	1149,59
			208	208	13	1397,54	1312,97	1224,41	1140,74
		209	209	14	1387,12	1270,48	1153,40	1045,98	
		4	210	210	7	255,84	277,30	296,03	311,58
			211	211	8	362,33	365,44	369,10	372,92
			-	17	8,5	421,10	421,10	421,10	421,10
			-	18	9	555,50	595,19	39,70	555,50
-	19		9,5	673,43	696,45	23,02	673,43		
-	20		10	850,26	798,49	51,76	850,26		
212	212		11	1018,81	1008,76	1001,74	997,44		
213	213		12	1204,06	1192,62	1186,43	1184,56		
214	214	13	1415,93	1409,55	1406,86	1407,04			
215	215	14	1633,62	1633,38	1632,33	1630,67			

3) Usvajanje vrednosti snaga na propelerskim vratilima pomoću treće metodologije

Da bi se rešio problem izlaznih vrednosti iz modela skupa VNM po trećoj metodologiji u ovoj disertaciji se predlaže sledeće rešenje. Za ulazne vrednosti koje ne pripadaju ni skupu za obučavanje ni skupu za testiranje proračunavaju se 4 izlazne vrednosti pomoću 4 VNM. Na osnovu proračunatih vrednosti snaga na propelerskim vratilima i svih brzina plovidbe od 7 do 14 km/h pravi se skup parova vrednosti snage na propelerskim vratilima i brzine plovidbe. Pošto je snaga na propelerskim vratilima izlazna promenljiva, vrednosti snaga i brzina se aproksimiraju krivom parabolom kod koje je indeks krivolinijske korelacije najveći.

Takođe, da bi se izbegao uticaj ekstremnih vrednosti pojedinih snaga proračunatih pomoću 4 VNM iz modela skupa VNM, odbacuju se parovi vrednosti $(v_{pl}^{(k)}, N_{vr}^{(k)})$ kod kojih snage proračunate na intervalu $[7, v_{pl\min}^{(i_{pot}, i_{sast})}]$ imaju veće vrednosti od snaga koje su proračunate na intervalu $[v_{pl\min}^{(i_{pot}, i_{sast})}, v_{pl\max}^{(i_{pot}, i_{sast})}]$ i snage proračunate na intervalu $(v_{pl\max}^{(i_{pot}, i_{sast})}, 14]$ imaju manje vrednosti od snaga koje su proračunate na intervalu $[v_{pl\min}^{(i_{pot}, i_{sast})}, v_{pl\max}^{(i_{pot}, i_{sast})}]$. Odbacivanje parova vrednosti je u skladu sa zavisnošću snage na propelerskim vratilima od brzine plovidbe u mirnoj vodi kod kojih je tip aproksimativne krive parabola (Radonjić, 2007).

Za ovako formiran konačan skup parova vrednosti određuje se aproksimativna kriva parabola sa najvećim indeksom krivolinijske korelacije. Zatim se iz konačnog skupa parova vrednosti snaga i brzina izdvajaju oni parovi koji ne pripadaju poznatim intervalima sa eksperimentalnih ispitivanja i kod kojih su najmanja odstupanja od vrednosti dobijenih pomoću parabole. Od tih parova vrednosti se crta ekstrapolaciona kriva snage na propelerskim vratilima za vrednosti brzina koje ne pripadaju poznatim intervalima sa eksperimentalnih ispitivanja, a koji su prikazani u tabelama 4.2 i 7.12.

Sledeći izraz definiše kako se proračunata snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača usvaja prema trećoj metodologiji i na osnovu četiri sastavne mreže iz modela skupa VNM:

$$\widehat{N}_{vr}^{(k)} = \left\{ \begin{array}{l} \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_1, \min \left\{ \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_1 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right|, \dots, \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_4 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right| \right\} = \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_1 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right| \\ \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_2, \min \left\{ \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_1 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right|, \dots, \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_4 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right| \right\} = \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_2 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right| \\ \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_3, \min \left\{ \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_1 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right|, \dots, \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_4 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right| \right\} = \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_3 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right| \\ \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_4, \min \left\{ \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_1 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right|, \dots, \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_4 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right| \right\} = \left| \left(\widehat{N}_{vr}^{(k)} \right)_4 - \widetilde{N}_{vr}^{(k)} \right| \end{array} \right. \quad (7.42)$$

$\forall k$

Sada je moguće napraviti proračun snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača i prikazati ga tabelarno. U narednoj Tabeli 7.17 prikazan je kompletan proračun snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ prema trećoj metodologiji, a zatim su usvojene snage za crtanje potrebnih ekstrapolacionih krivih i dijagrama.

Tabela 7.17. Usvojene snage na propelerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ prema trećoj metodologiji

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$k_i^{i_{pot}}$ (k')	$v_{pl}^{(k)}$ (km/h)	$\tilde{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)	$I'=1$	$I'=2$	$I'=3$	$I'=4$	$\min_I |\tilde{N}_{vr}^{(k)} - (\hat{N}_{vr}^{(k)})_I|$ (kW)	$\hat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)	
						$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_1$ (kW)	$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_2$ (kW)	$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_3$ (kW)	$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_4$ (kW)			
„Bukovik“	1	1	194	194	7	81,13	225,67 ^{*)}	620,71 ^{*)}	157,61	153,23	72,11	153,23
			-	1	7,58	-	-	-	-	187,57	-	187,57
			-	2	9,08	-	341,18	-	-	-	-	341,18
			-	3	9,65	-	426,46	-	-	-	-	426,46
			-	4	9,88	-	-	-	478,07	-	-	478,07
			-	5	10,05	-	-	-	523,86	-	-	523,86
			-	6	10,3	-	-	576,84	-	-	-	576,84
			195	195	11	880,15	899,14	820,38	874,62	786,18	5,53	874,62
			196	196	12	1172,3	1450,0	1325,4	1355,4	1056,7	115,60	1056,7
			197	197	13	1501,3	1753,4	1745,0	1717,2	1296,2	205,17	1296,2
			198	198	14	1867,4	1749,9	1887,0	1864,2	1480,1	3,19	1864,2
„Deligrad“	2	2	199	199	7	94,28	204,60	149,58	212,16	259,93	55,30	149,58
			200	200	8	244,4	261,40	194,51	304,18	336,37	16,99	261,40
			201	201	9	377,55	348,26	282,43	405,18	415,19 ^{*)}	27,64	405,19
			-	7	9,5	-	405,25	-	-	-	-	405,25
			-	8	10	-	-	439,44	-	-	-	439,44
			-	9	10,5	-	536,64	-	-	-	-	536,64
			-	10	11	-	-	620,71	-	-	-	620,71
			-	11	11,5	-	-	687,29	-	-	-	687,29
			202	202	12	675,09	700,42	723,92	595,50 ^{*)}	653,58 ^{*)}	25,33	700,42
			203	203	13	740,31	734,47	699,72	611,38 ^{*)}	739,76	0,55	739,76
		204	204	14	788,54	725,26	582,80 ^{*)}	622,83 ^{*)}	839,58	51,04	839,58	
		3	205	205	7	126,16	245,30	223,59	159,76	230,81	33,60	159,76
			-	12	8	-	-	-	-	353,43	-	353,43
			-	13	8,5	-	-	444,74	-	-	-	444,74
			-	14	9	-	-	530,14	-	-	-	530,14
			-	15	9,5	-	-	-	672,74	-	-	672,74
			-	16	10	-	-	-	847,40	-	-	847,40
			206	206	11	1109,3	898,09	1359,5	1242,6	987,45	121,82	987,45
			207	207	12	1357,8	868,27	1742,2	1588,6	1228,2	129,50	1228,25
			208	208	13	1607,3	766,14 ^{*)}	1879,2	1795,4	1429,3	177,99	1429,34
209	209		14	1858,0	588,03 ^{*)}	1911,1	1881,8	1579,6	23,84	1881,83		
4	210	210	7	198,02	108,50	249,88	203,52	369,79	5,50	203,52		
	211	211	8	395,04	358,63	370,34	316,92	394,58	0,46	394,58		
	-	17	8,5	-	-	421,10	-	-	-	421,10		
	-	18	9	-	-	555,50	-	-	-	555,50		
	-	19	9,5	-	-	-	673,43	-	-	673,43		
	-	20	10	-	-	-	-	850,26	-	850,26		
	212	212	11	1004,93	1107,78	1061,82	958,78	997,45	7,48	997,45		
	213	213	12	1214,51	1328,75	1288,11	1053,14	1211,71	2,80	1211,71		
214	214	13	1427,23	1503,27	1463,11	1305,59	1431,98	4,75	1431,98			
215	215	14	1643,09	1633,60	1599,65	1683,70	1615,22	9,49	1633,60			

^{*)} vrednosti koje nisu ušle u razmatranje

$$\tilde{N}_{vr}^{(k_1^1)} = 18,473 \cdot \left(v_{pl}^{(k_1^1)} \right)^2 - 132,763 \cdot v_{pl}^{(k_1^1)} + 105,276 \quad (\text{indeks krivolinijske korelacije } 0,924)$$

$$\tilde{N}_{vr}^{(k_2^2)} = -8,491 \cdot \left(v_{pl}^{(k_2^2)} \right)^2 + 277,49 \cdot v_{pl}^{(k_2^2)} - 1432,1 \quad (\text{indeks krivolinijske korelacije } 0,9275)$$

$$\tilde{N}_{vr}^{(k_3^2)} = 0,543 \cdot \left(v_{pl}^{(k_3^2)} \right)^2 + 236,01 \cdot v_{pl}^{(k_3^2)} - 1552,5 \quad (\text{indeks krivolinijske korelacije } 0,9118)$$

$$\tilde{N}_{vr}^{(k_4^2)} = 1,57 \cdot \left(v_{pl}^{(k_4^2)} \right)^2 + 173,47 \cdot v_{pl}^{(k_4^2)} - 1093,2 \quad (\text{indeks krivolinijske korelacije } 0,9798)$$

4) Upoređenje rezultata proračuna vrednosti snaga na propellerskim vratilima pomoću prve, druge i treće metodologije

Na osnovu tabela 7.15, 7.16 i 7.17 napravljena je Tabela 7.18 u kojoj se porede vrednosti dobijene prema prethodne tri metodologije.

Tabela 7.18. Usvojene snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ prema trećoj metodologiji

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$k_{i_{sast}}^{i_{pot}}$	k (k')	$v_{pl}^{(k)}$ (km/h)	Prva metodologija	Druga metodologija				Treća metodologija	
						$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)	$\beta=0,25$	$\beta=0,5$	$\beta=0,75$	$\beta=1$	$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)	
							$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)	$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)	$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)	$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)		
„Bukovik“	1	1	194	194	7	290,79	306,91	315,96	316,62	311,00	153,23	
			-	1	7,58	187,57	187,57	187,57	187,57	187,57	187,57	187,57
			-	2	9,08	341,18	341,18	341,18	341,18	341,18	341,18	341,18
			-	3	9,65	426,46	426,46	426,46	426,46	426,46	426,46	426,46
			-	4	9,88	478,07	478,07	478,07	478,07	478,07	478,07	478,07
			-	5	10,05	523,86	523,86	523,86	523,86	523,86	523,86	523,86
			-	6	10,3	576,84	576,84	576,84	576,84	576,84	576,84	576,84
			195	195	11	845,62	853,80	861,83	868,83	874,72	874,62	874,62
			196	196	12	1299,11	1330,94	1359,83	1382,58	1399,63	1056,7	1056,7
			197	197	13	1631,05	1667,88	1698,63	1719,99	1733,63	1296,2	1296,2
			198	198	14	1747,67	1766,92	1779,47	1784,23	1783,68	1864,2	1864,2
„Deligrad“	2	2	199	199	7	206,05	200,36	196,30	194,34	194,00	149,58	
			200	200	8	273,47	264,64	257,71	253,54	251,69	261,40	
			201	201	9	362,20	353,47	346,42	341,96	339,77	405,19	
			-	7	9,5	405,25	405,25	405,25	405,25	405,25	405,25	
			-	8	10	439,44	439,44	439,44	439,44	439,44	439,44	
			-	9	10,5	536,64	536,64	536,64	536,64	536,64	536,64	
			-	10	11	620,71	620,71	620,71	620,71	620,71	620,71	
			-	11	11,5	687,29	687,29	687,29	687,29	687,29	687,29	
			202	202	12	668,61	676,81	684,59	690,84	695,34	700,42	
			203	203	13	696,04	699,75	704,81	710,41	715,68	739,76	
		204	204	14	691,31	683,59	680,40	681,89	686,25	839,58		
		3	205	205	7	214,79	218,83	223,52	228,16	232,24	159,76	
			-	12	8	353,43	353,43	353,43	353,43	353,43	353,43	
			-	13	8,5	444,74	444,74	444,74	444,74	444,74	444,74	
			-	14	9	530,14	530,14	530,14	530,14	530,14	530,14	
			-	15	9,5	672,74	672,74	672,74	672,74	672,74	672,74	
			-	16	10	847,40	847,40	847,40	847,40	847,40	847,40	
			206	206	11	1122,99	1111,73	1092,19	1067,03	1040,28	987,45	
			207	207	12	1357,64	1318,83	1266,61	1207,81	1149,59	1228,25	
			208	208	13	1467,27	1397,54	1312,97	1224,41	1140,74	1429,34	
209	209		14	1488,57	1387,12	1270,48	1153,40	1045,98	1881,83			
4	210	210	7	234,12	255,84	277,30	296,03	311,58	203,52			
	211	211	8	360,12	362,33	365,44	369,10	372,92	394,58			
	-	17	8,5	421,10	421,10	421,10	421,10	421,10	421,10			
	-	18	9	555,50	555,50	555,50	555,50	555,50	555,50			
	-	19	9,5	673,43	673,43	673,43	673,43	673,43	673,43			
	-	20	10	850,26	850,26	850,26	850,26	850,26	850,26			
	212	212	11	1030,68	1018,81	1008,76	1001,74	997,44	997,45			
	213	213	12	1219,29	1204,06	1192,62	1186,43	1184,56	1211,71			
214	214	13	1425,20	1415,93	1409,55	1406,86	1407,04	1431,98				
215	215	14	1633,08	1633,62	1633,38	1632,33	1630,67	1633,60				

Tabela 7.18 predstavlja poređenje vrednosti snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača koje su proračunate na osnovu tri prethodne metodologije. Kao što se vidi iz Tabele 7.18, postoje značajne razlike u dobijenim vrednostima snage.

Prvo će se razmatrati brod-potiskivač „Bukovik“ u sklopu sa „2+2“ nesimetrična potiskivana teretnjaka, odnosno par $(i_{pot}, i_{sast}) = (1,1)$. Proračunom pomoću prve dve metodologije dobijene su snage za brzinu plovidbe od 7 km/h veće od snaga za brzine plovidbe od 7,58 km/h, dok je trećom metodologijom usvojena snaga koja je manja za pomenute vrednosti brzina plovidbe. Ostale vrednosti snaga rastu sa porastom brzina plovidbe, tako da su u tom delu sve tri metodologije zadovoljile osnovnu pretpostavku da je za veću brzinu plovidbe potrebna i veća snaga na propellerskim vratilima. Ipak, za crtanje dijagrama zavisnosti izmerene snage na propellerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Bukovik“ u sklopu sa „2+2“ potiskivana teretnjaka usvajaju se vrednosti snage koje su dobijene proračunom pomoću treće metodologije.

Upoređivanjem rezultata proračuna snaga na propellerskim vratilima broda-potiskivača „Deligrad“ u sklopu sa „2+2“ potiskivana teretnjaka dolazi se do zaključka da jedino treća metodologija daje ispravne rezultate proračuna. Proračunom na osnovu prve dve metodologije vrednosti snage za brzine plovidbe od 13 i 14 km/h stagniraju ili opadaju, što je nedopustivo. Takođe, trebalo bi istaći da je upravo najveća apsolutna greška snage na $k' = 11$, iznosi 120,71 kW, tako da tu treba tražiti razlog manje tačnog proračuna snage. Na osnovu toga, za crtanje dijagrama zavisnosti izmerene snage na propellerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Deligrad“ u sklopu sa „2+2“ potiskivana teretnjaka usvajaju se vrednosti snage koje su dobijene proračunom pomoću treće metodologije.

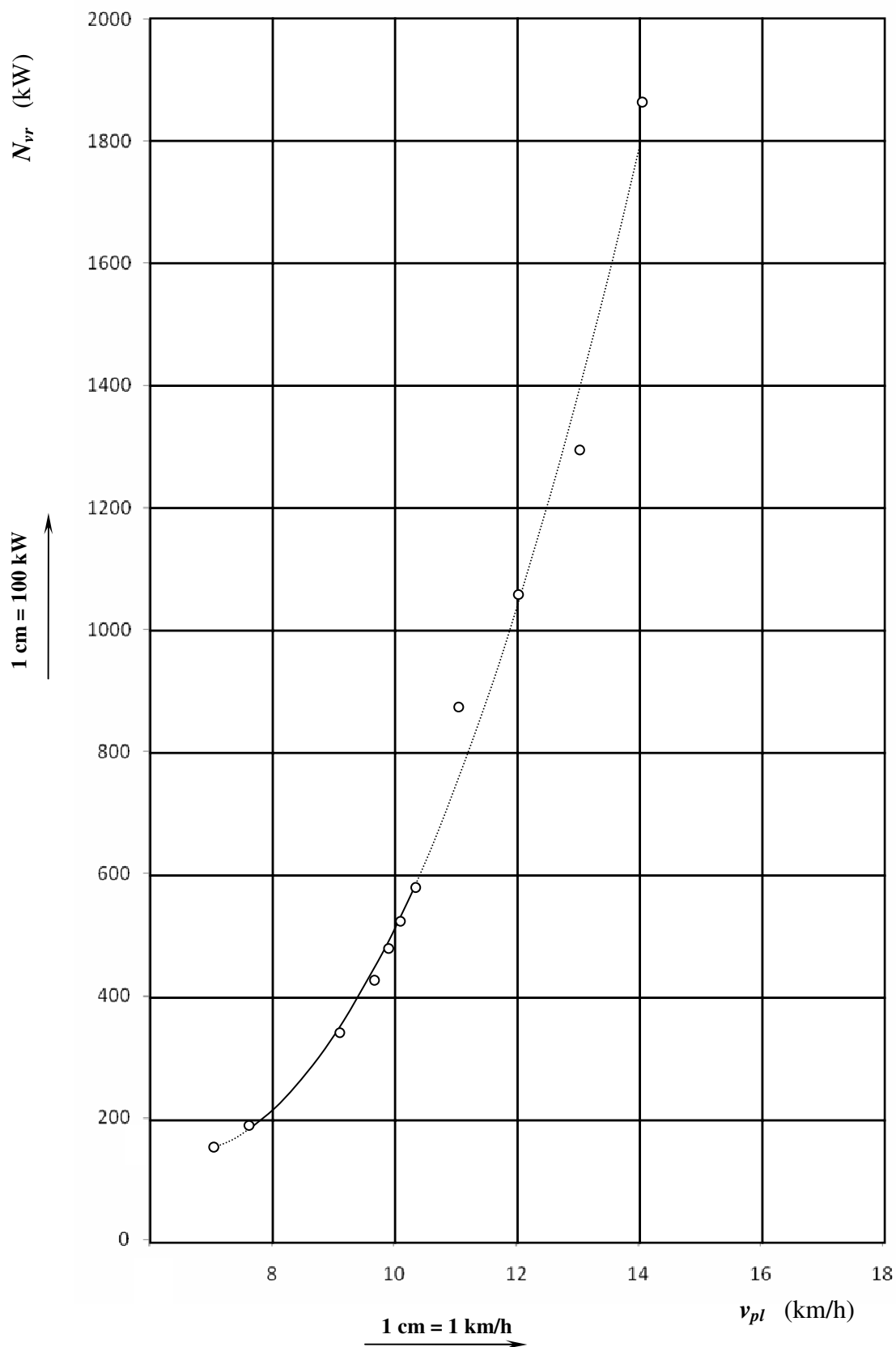
Razmatranjem rezultata proračuna snaga na propellerskim vratilima broda-potiskivača „Deligrad“ u sklopu sa „2+2+2“ potiskivana teretnjaka, zaključuje se da rezultati dobijeni primenom prve i treće metodologije mogu da budu primenjeni u praksi kod brodarstava. Međutim, pošto se trećom metodologijom za brzinu plovidbe od 14 km/h dobija snaga na propellerskim vratilima koja je veća od snage na propellerskim vratilima za isti brod samo u sklopu sa „3+3“ potiskivana teretnjaka, zaključak je da treba usvojiti vrednosti dobijene pomoću prve metodologije. Dakle, za crtanje dijagrama zavisnosti izmerene snage na propellerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Deligrad“ u sklopu sa „2+2+2“ potiskivana teretnjaka usvajaju se vrednosti snage koje su dobijene proračunom pomoću prve metodologije.

Analizom rezultata proračuna snaga na propelerskim vratilima broda-potiskivača „Deligrad“ u sklopu sa „3+3“ potiskivana teretnjaka mogu se uočiti vrednosti snaga koje se razlikuju za svega nekoliko kilovata između sebe. Ovo upućuje na zaključak da je nevažno kojom se metodologijom proračunavaju snage od ponuđene tri. Ipak, da bi se odabrale vrednosti po jednoj od metodologija, dodatno će se proračunati *indeks krivolinijske korelacije* (Vukadinović i Popović, 1996) između parova tačaka snaga i brzina za aproksimacionu krivu parabolu. Usvojiće se vrednosti snage po onoj metodologiji kod koje je proračunat najveći indeks krivolinijske korelacije. Indeksi krivolinijske korelacije su redom 0,993, 0,992 ($\beta=0,25$), 0,991 ($\beta=0,5$), 0,990 ($\beta=0,75$), 0,989 ($\beta=1$) i 0,995. Na osnovu datih vrednosti indeksa krivolinijske korelacije usvaja se treća metodologija proračuna crtanje dijagrama zavisnosti izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Deligrad“ u sklopu sa „3+3“ potiskivana teretnjaka.

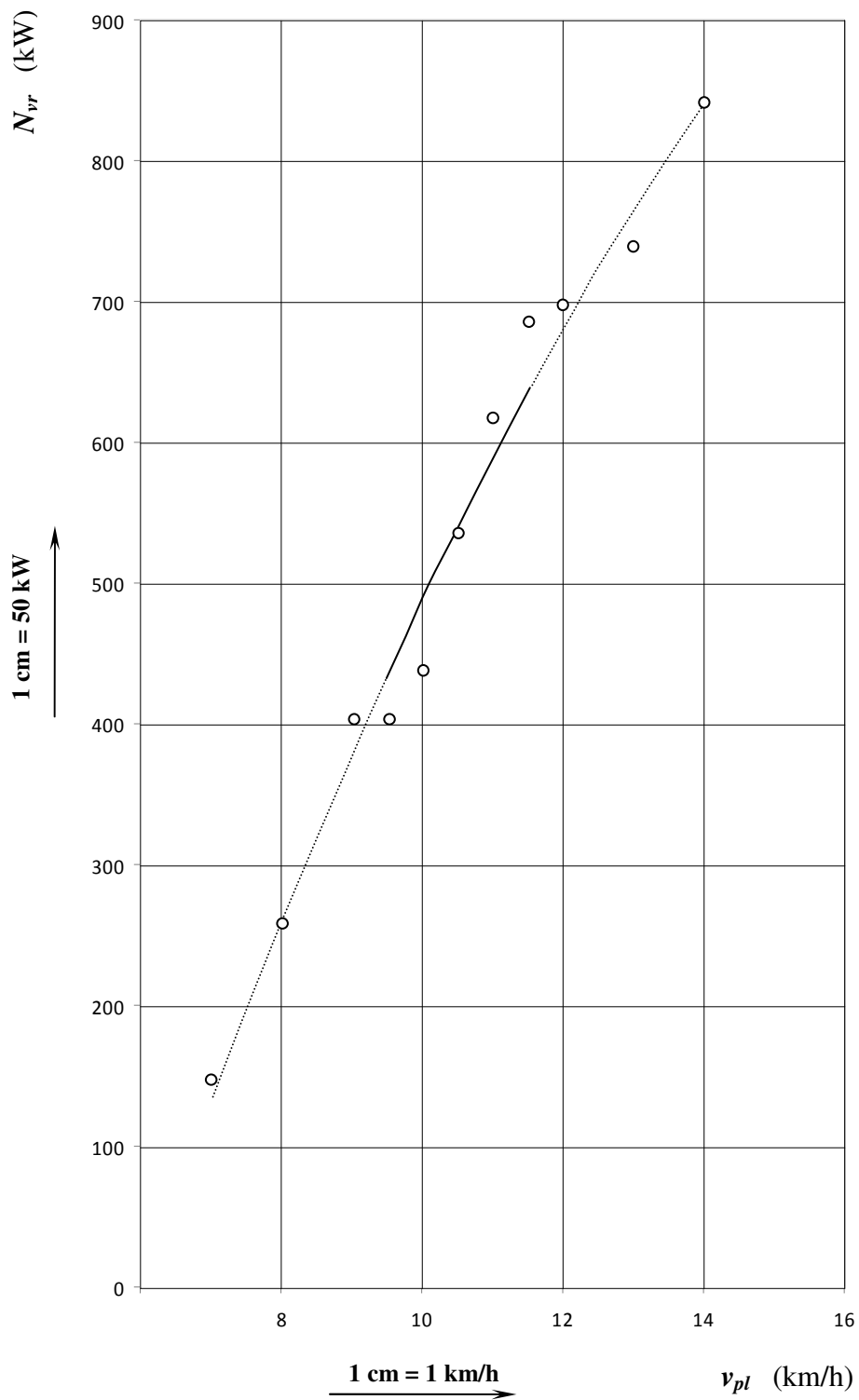
5) Dijagrami zavisnosti izmerene snage na propelerskim vratilima od brzine plovidbe u mirnoj vodi za brodove-potiskivače „Bukovik“ i „Deligrad“

Na osnovu vrednosti snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača „Bukovik“ i „Deligrad“ i brzina plovidbi u mirnoj vodi koje su predstavljene u Tabeli 7.18 napravljeno je 4 dijagrama koji će biti iskorišćeni za određivanje snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača u primeru koji sledi. Krive na dijagramima su aproksimacione krive parabole dobijene na osnovu parova tačaka snaga na propelerskim vratilima i brzina plovidbe u mirnoj vodi koji su prikazani u Tabeli 7.18.

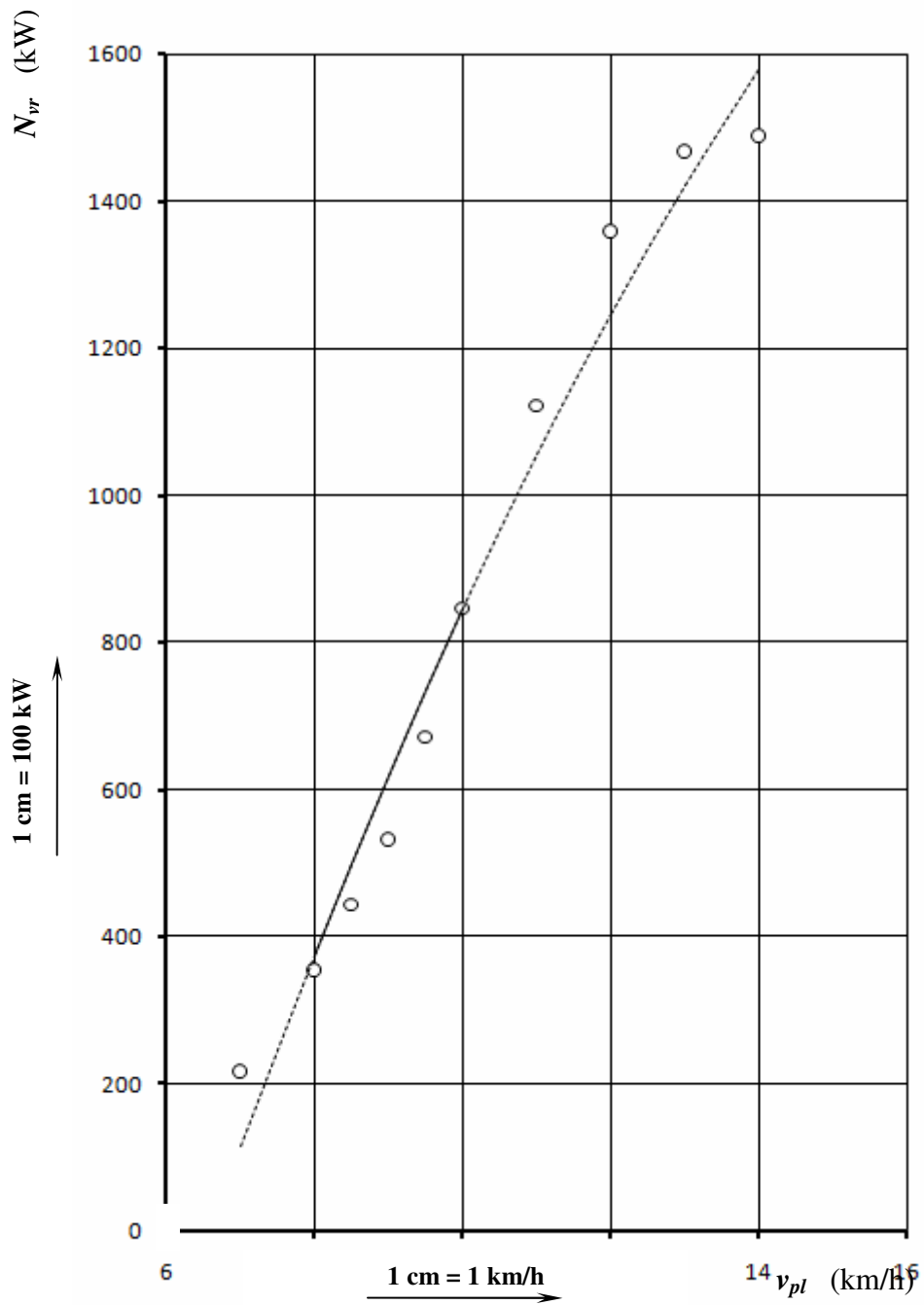
DIJAGRAM BR. 4. Dijagram zavisnosti izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Bukovik” u sklopu sa „2+2” potiskivana teretnjaka (snage su proračunate primenom modela skupa VNM)



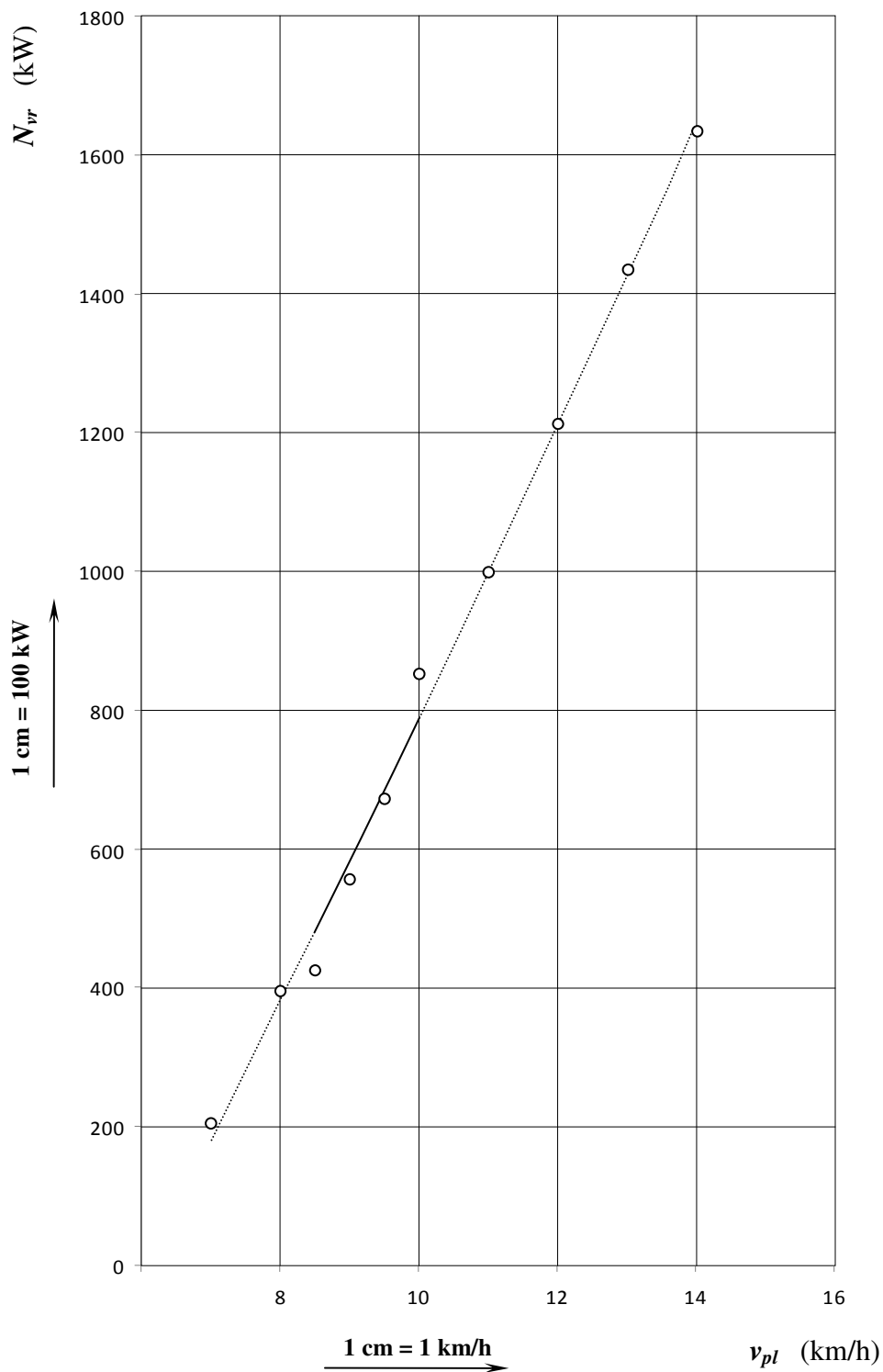
DIJAGRAM BR. 5. Dijagram zavisnosti izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Deligrad” u sklopu sa „2+2” potiskivana teretnjaka (snage su proračunate primenom modela skupa VNM)



DIJAGRAM BR. 6. Dijagram zavisnosti izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Deligrad” u sklopu sa „2+2+2” potiskivana teretnjaka (snage su proračunate primenom modela skupa VNM)



DIJAGRAM BR. 7. Dijagram zavisnosti izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Deligrad” u sklopu sa „3+3” potiskivana teretnjaka (snage su proračunate primenom modela skupa VNM)



Dijagrami br. 4-7 prikazuju samo trend snaga na propellerskim vratilima broda-potiskivača „Bukovik” i „Deligrad”. Eksperimentalna ispitivanja broda-potiskivača „Deligrad” su obavljena za brzine plovidbe koje su se kretale od 8 do 11,5 km/h. Dakle, sve snage koje su dobijene proračunom za brzine plovidbe u mirnoj vodi koje su bile veće od 11,5 km/h i manje od 8 km/h predstavljaju trend modela skupa VNM. Kao što se sa dijagrama br. 4-7 vidi, model skupa VNM je dao vrednosti snaga na propellerskim vratilima koje se uklapaju u pravilo da za veće brzine brod mora proizvesti veće snage i da je moguće opisati krivu parabole za date tačke parova snage na propellerskim vratilima i brzine plovidbe u mirnoj vodi.

Ipak, da bi se poštovala tačnost realnih uslova plovidbe i realnih instalisanih snaga, potrebno je izvršiti promene u ulaznim podacima. Ove promene mogu ići u dva smera. Prvi smer je da se poveća, odnosno smanji instalisana snaga broda-potiskivača ili da se pronade potiskivač koji ima potpuno iste glavne dimenzije kao i brodovi-potiskivači „Bukovik” i „Deligrad”, ali da ima veću ili manju instalisanu snagu. Menjanje instalisanih snaga brodova-potiskivača za iste dimenzije nije preporučljivo zato što se brod-potiskivač unapred projektuje tako da ima određenu instalisanu snagu glavnih motora. Menjanje snage naročito nije preporučljivo kod brodova-potiskivača manjih dimenzija, jer oni nisu konstruisani tako da mogu da prime veće motore koji razvijaju veću snagu na propellerskim vratilima.

Pošto brodove-potiskivače „Bukovik” i „Deligrad” nije moguće zameniti brodovima istih dimenzija, ali različitih instalisanih snaga, onda je najbolje promeniti pomenute brodove-potiskivače drugim brodovima-potiskivačima sa većom instalisanom snagom. U ovoj disertaciji će se razmatrati uticaj promene broda-potiskivača „Deligrad” na izlazne vrednosti snage na propellerskim vratilima.

6) Dijagrami zavisnosti izmerene snage na propellerskim vratilima od brzine plovidbe u mirnoj vodi za potiskivane sklopove u kojima su bili sastavi potiskivanih teretnjaka pod rednim brojevima 1, 2, 3 i 4, ali za različite brodove-potiskivače

Promena broda-potiskivača u potiskivanom sklopu odgovara drugom delu analize uticaja promene dužine sklopova jer se samom promenom broda-potiskivača menjaju i glavne dimenzije sklopa u kojem se nalazi brod-potiskivač.

Na osnovu aproksimacione krive parabole sa dijagrama br. 4 najveća snaga na propellerskim vratilima broda potiskivača „Bukovik” je oko 1800 kW za 14 km/h.

Međutim, instalisana snaga potiskivača „Bukovik“ iznosi 2×331 kW (Tabela 4.1) što je daleko manje od potrebne snage predstavljene na dijagramu. Zbog toga je potrebno uraditi promenu broda-potiskivača „Bukovik“ u datom potiskivanom sklopu. Ukoliko se pogledaju ostali brodovi-potiskivači koji su učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima, samo brod-potiskivač „Kadinjača“ ($N_{inst} = 3 \times 809,6$ kW) poseduje instalisanu snagu koja je veća od 1800 kW. Zato će ovaj brod-potiskivač zameniti „Bukovik“ u sklopu sa „2+2“ potiskivana teretnjaka. Njegove glavne osobenosti su sledeće:

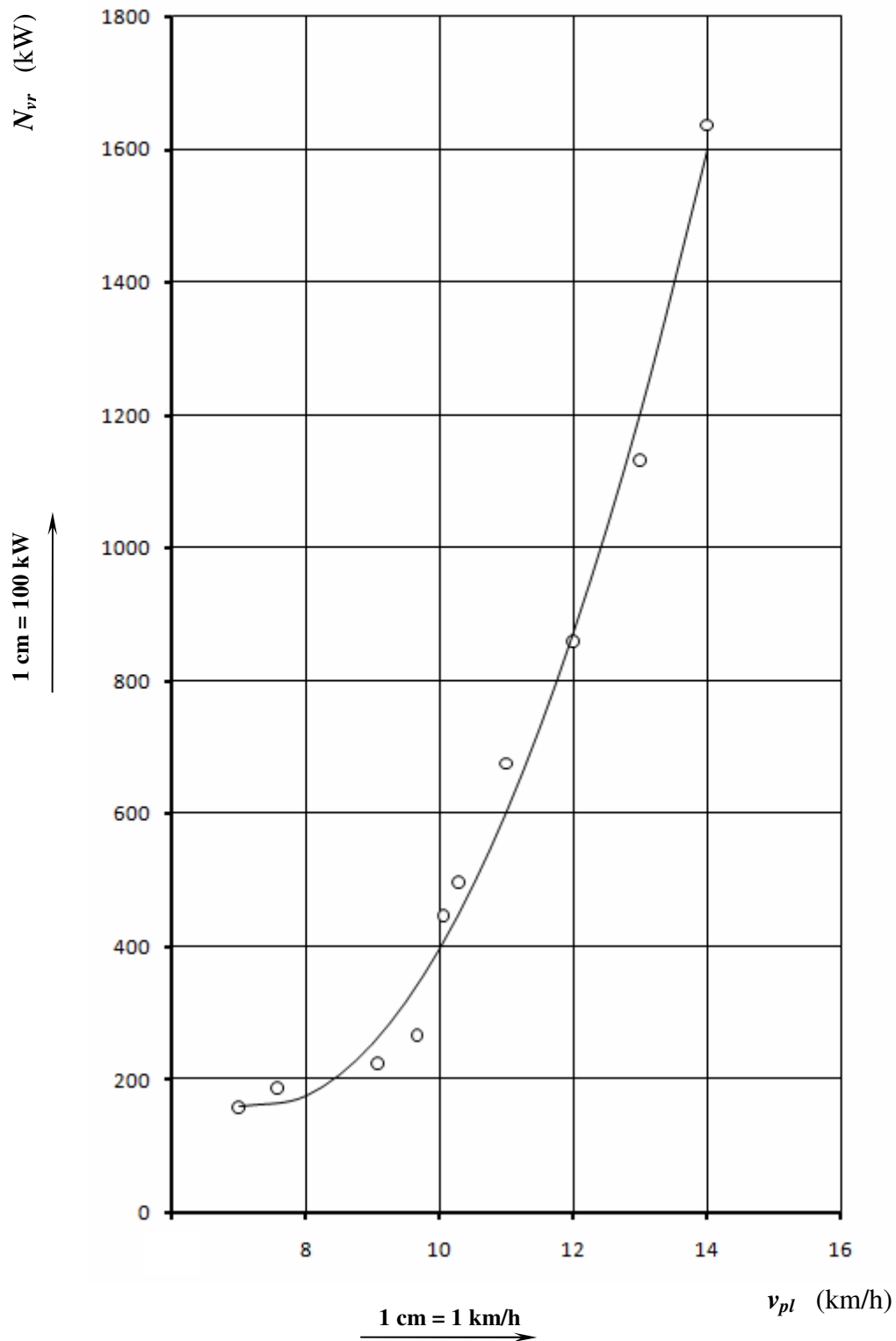
Dužina na KVL	$L_{pot} = 34,29$	m
Širina na KVL	$B_{pot} = 11,0$	m
Gaženje (konstrukciono)	$T_{pot} = 1,80$	m
Deplasman punog broda	$D_{mpot} = 505,0$	t
Snaga motora (za trajni pogon)	$N_{inst} = 3 \times 809,6$	kW

U Tabeli 7.19 su prikazane vrednosti snaga na propelerskim vratilima broda-potiskivača „Kadinjača“ koje su proračunate primenom treće metodologije i koje odgovaraju odabiru vrednosti snaga kao u Tabeli 7.17. Na osnovu vrednosti prikazanih u ovoj tabeli napravljen je dijagram br. 8 po sistemu koji je primenjen za crtanje dijagrama br. 4-7.

Tabela 7.19. Usvojene snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača „Kadinjača“ u sklopu sa „2+2“ ($i_{sast} = 1$) potiskivana teretnjaka prema trećoj metodologiji

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$K_{i_{sast}}^{i_{pot}}$	γ (k')	$v_{pl}^{(k)}$ (km/h)	$I'=1$	$I'=2$	$I'=3$	$I'=4$	$\hat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)
						$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_1$ (kW)	$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_2$ (kW)	$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_3$ (kW)	$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_4$ (kW)	
„Kadinjača“	11	1	194	194	7	-	-	-	157,34	157,34
			-	1	7,58	-	-	-	185,16	185,16
			-	2	9,08	222,55	-	-	-	222,55
			-	3	9,65	265,49	-	-	-	265,49
			-	4	9,88	-	-	412,10	-	412,10
			-	5	10,05	-	-	445,12	-	445,12
			-	6	10,3	-	496,01	-	-	496,01
			195	195	11	-	-	677,15	-	677,15
			196	196	12	-	-	-	858,33	858,33
			197	197	13	-	-	-	1130,0	1130,0
			198	198	14	-	-	1637,10	-	1637,10

DIJAGRAM BR. 8. Dijagram zavisnosti izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Kadinjača” u sklopu sa „2+2” potiskivana teretnjaka (snage su proračunate primenom modela skupa VNM)



Na osnovu aproksimacionih krivih parabola sa dijagrama br. 5-7 najveće proračunate snage na propelerskim vratilima broda potiskivača „Deligrad“ su veće od instalisane snage pomenutog broda-potiskivača. Zbog toga je potrebno uraditi promenu broda-potiskivača „Deligrad“ u datim potiskivanim sklopovima. Uvidom u Tabelu 4.1 samo brod-potiskivač „Kladovo“ ($N_{inst} = 2 \times 809,6$ kW) poseduje instalisanu snagu koja je veća od najveće snage sa dijagrama br. 5-7. Zato će ovaj brod-potiskivač zameniti „Deligrad“ u sklopovima sa „2+2“, „2+2+2“ i „3+3“ potiskivana teretnjaka. Njegove glavne osobenosti su sledeće:

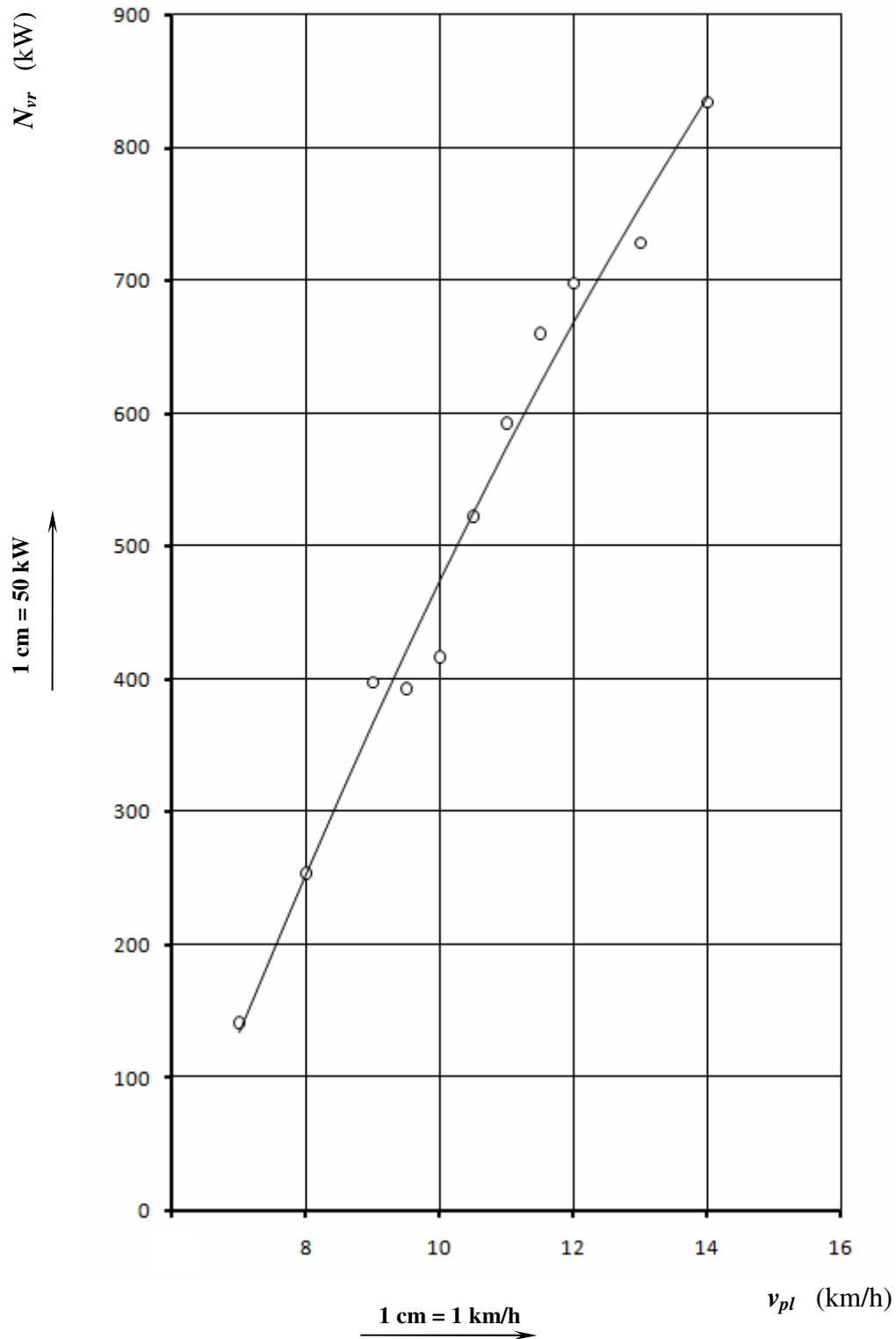
Dužina na KVL	$L_{pot} = 34,78$	m
Širina na KVL	$B_{pot} = 11,2$	m
Gaženje (konstrukciono)	$T_{pot} = 1,95$	m
Deplasman punog broda	$D_{mpot} = 530,0$	t
Snaga motora (za trajni pogon) N_{inst}	$= 2 \times 809,6$	kW

U Tabeli 7.20 su prikazane vrednosti snaga na propelerskim vratilima broda-potiskivača „Kladovo“ u sklopu sa „2+2“ potiskivana teretnjaka i koje su proračunate na osnovu treće metodologije i koje odgovaraju odabiru vrednosti snaga kao u Tabeli 7.17. Na osnovu vrednosti prikazanih u ovoj tabeli napravljen je dijagram br. 9 po sistemu koji je primenjen za crtanje dijagrama br. 4-7.

Tabela 7.20. Usvojene snage na propelerskim vratilima broda-potiskivača „Kladovo“ u sklopu sa „2+2“ ($i_{sast} = 2$) potiskivana teretnjaka prema trećoj metodologiji

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$k_{i_{sast}}^{i_{pot}}$	k (k')	$v_{pl}^{(k)}$ (km/h)	$I'=1$	$I'=2$	$I'=3$	$I'=4$	$\hat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)
						$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_1$ (kW)	$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_2$ (kW)	$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_3$ (kW)	$(\hat{N}_{vr}^{(k)})_4$ (kW)	
„Kladovo“	13	2	199	199	7	-	140,96	-	-	140,96
			200	200	8	252,78	-	-	-	252,78
			201	201	9	-	-	397,81	-	397,81
			-	7	9,5	392,08	-	-	-	392,08
			-	8	10	-	414,40	-	-	414,40
			-	9	10,5	521,86	-	-	-	521,86
			-	10	11	-	592,04	-	-	592,04
			-	11	11,5	-	659,00	-	-	659,00
			202	202	12	697,93	-	-	-	697,93
			203	203	13	-	-	-	728,49	728,49
			204	204	14	-	-	-	834,36	834,36

DIJAGRAM BR. 9. Dijagram zavisnosti izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Kladovo” u sklopu sa „2+2” potiskivana teretnjaka (snage su proračunate primenom modela skupa VNM)

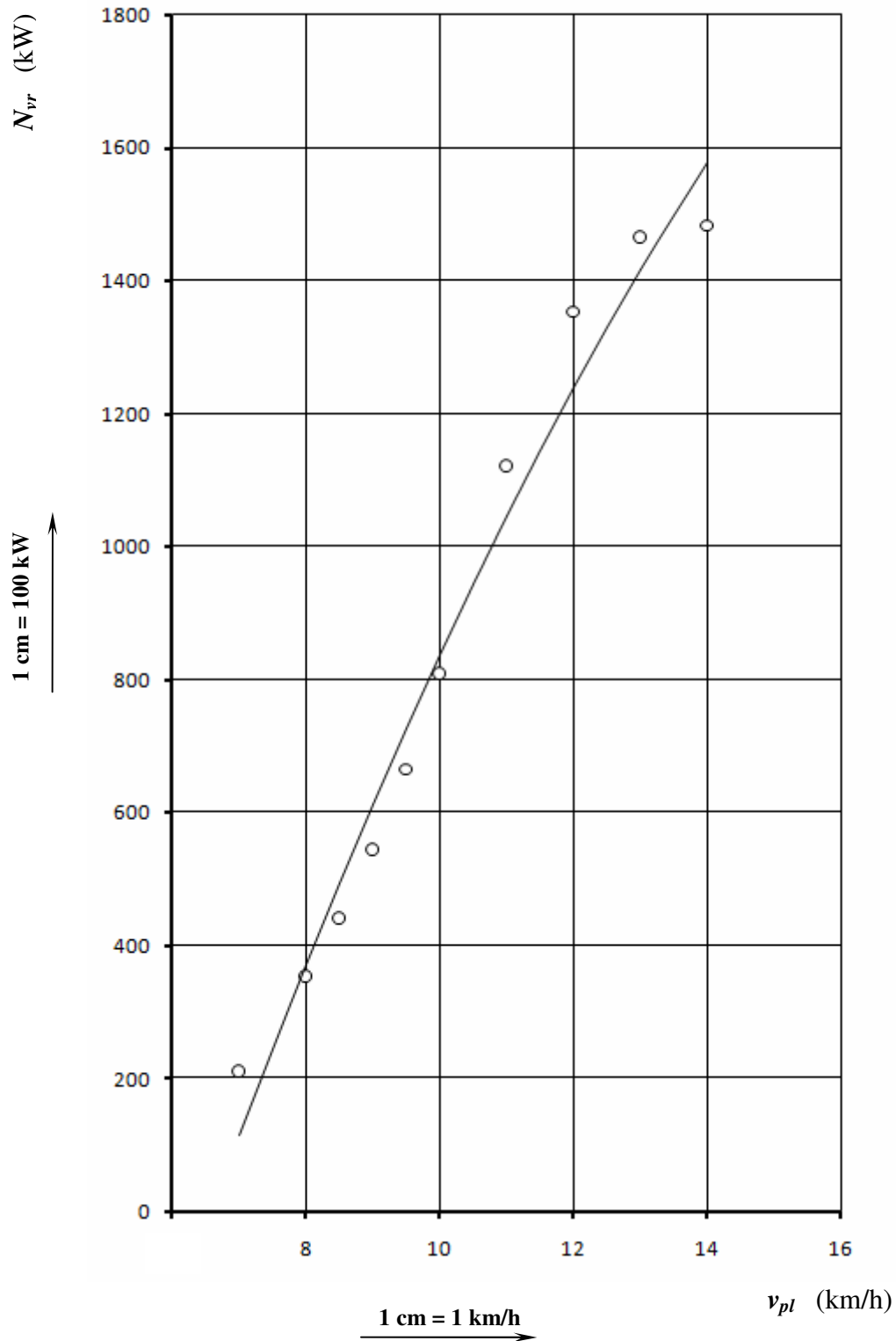


U Tabeli 7.21 su prikazane vrednosti snaga na propellerskim vratilima broda-potiskivača „Kladovo“ u sklopu sa „2+2+2“ potiskivana teretnjaka i koje su proračunate na osnovu prve metodologije prema izrazu (7.39). Na osnovu vrednosti prikazanih u ovoj tabeli napravljen je dijagram br. 10 po sistemu koji je primenjen za crtanje dijagrama br. 4-7.

Tabela 7.21. Usvojene snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača „Kladovo“ u sklopu sa „2+2+2“ ($i_{sast} = 3$) potiskivana teretnjaka prema prvoj metodologiji

Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$k_{i_{sast}}^{i_{pot}}$	k (k')	$v_{pl}^{(k)}$ (km/h)	$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)
„Kladovo“	13	3	205	205	7	210,60
			-	12	8	352,29
			-	13	8,5	440,20
			-	14	9	543,94
			-	15	9,5	666,06
			-	16	10	807,90
			206	206	11	1119,47
			207	207	12	1353,79
			208	208	13	1462,96
			209	209	14	1483,81

DIJAGRAM BR. 10. Dijagram zavisnosti izmerene snage na propelerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Kladovo” u sklopu sa „2+2+2“ potiskivana teretnjaka (snage su proračunate primenom modela skupa VNM)



U Tabeli 7.22 su prikazane vrednosti snaga na propellerskim vratilima broda-potiskivača „Kladovo“ u sklopu sa „3+3“ potiskivana teretnjaka i koje su proračunate na osnovu treće metodologije i koje odgovaraju odabiru vrednosti snaga kao u Tabeli 7.17. Na osnovu vrednosti prikazanih u ovoj tabeli napravljen je dijagram br. 11 po sistemu koji je primenjen za crtanje dijagrama br. 4-7.

Tabela 7.22. Usvojene snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača „Kladovo“ u sklopu sa „3+3“ ($i_{sast} = 4$) potiskivana teretnjaka prema trećoj metodologiji

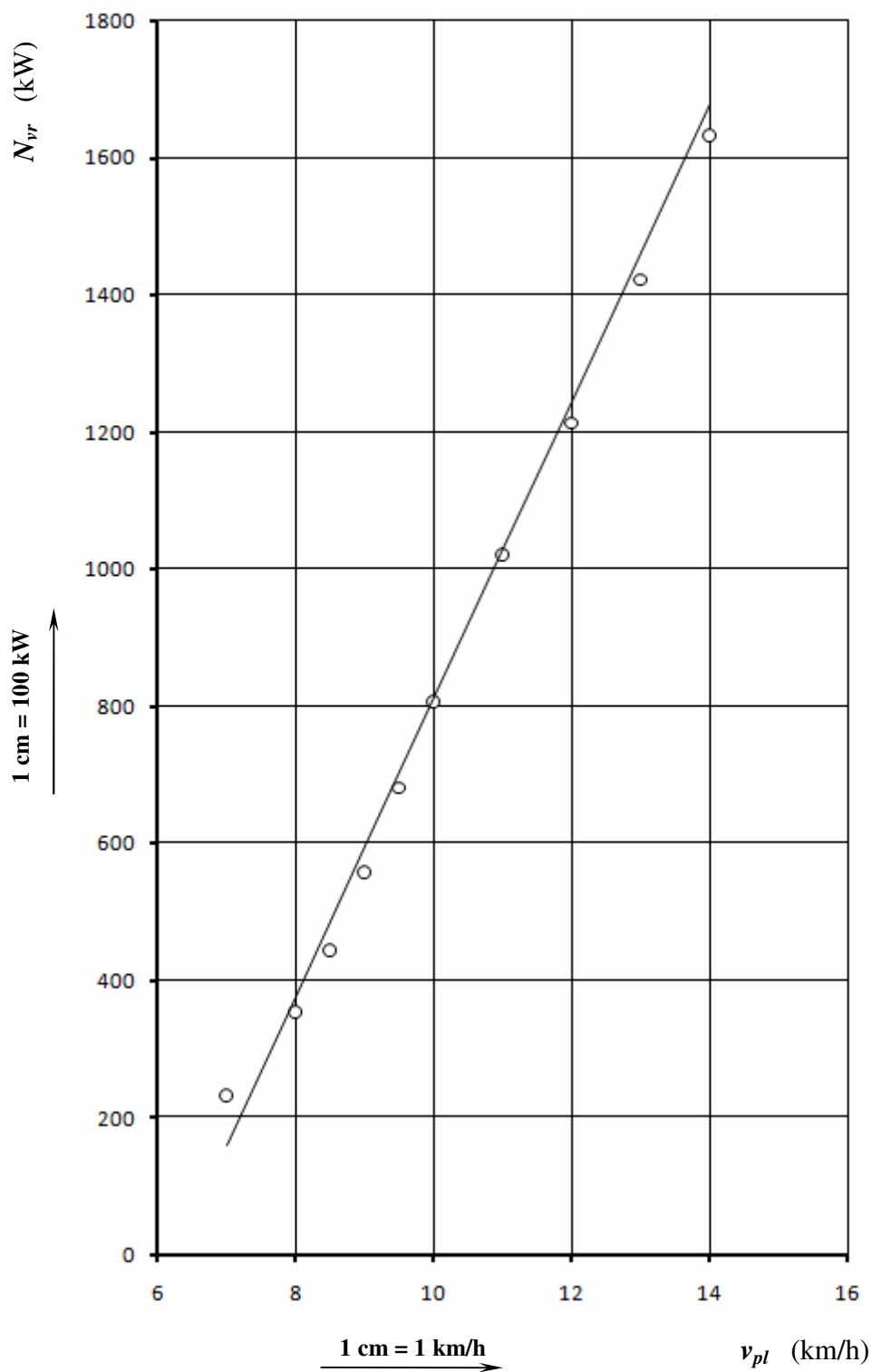
Brod-potiskivač	i_{pot}	i_{sast}	$\kappa_{i_{sast}}^{i_{pot}}$	κ (k')	$v_{pl}^{(k)}$ (km/h)	$I'=1$	$I'=2$	$I'=3$	$I'=4$	$\widehat{N}_{vr}^{(k)}$ (kW)
						$(\widehat{N}_{vr}^{(k)})_1$ (kW)	$(\widehat{N}_{vr}^{(k)})_2$ (kW)	$(\widehat{N}_{vr}^{(k)})_3$ (kW)	$(\widehat{N}_{vr}^{(k)})_4$ (kW)	
„Kladovo“	13	4	210	210	7	-	-	246,25	-	246,25
			211	211	8	-	-	-	351,05	351,05
			-	17	8,5	-	421,10	-	-	415,06
			-	18	9	-	555,50	-	-	543,30
			-	19	9,5	-	-	673,43	-	658,22
			-	20	10	-	-	-	850,26	831,96
			212	212	11	-	-	-	1088,74	1088,74
			213	213	12	-	-	-	1312,16	1312,16
			214	214	13	-	-	-	1490,61	1490,61
			215	215	14	1614,28	-	-	-	1614,28

Za novi brod-potiskivač čija je instalisana snaga veća od najveće snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača dobijene sa dijagrama br. 4-7 je usvojen brod-potiskivač „Kadinjača“. Brod-potiskivač „Kadinjača“ je odabran zato što ima veću instalisanu snagu od instalisane snage broda-potiskivača „Deligrad“ i ima približno iste dužine na KVL kao i brod-potiskivač „Deligrad“. Trend modela skupa VNM je napravljen za brzine plovidbe u mirnoj vodi od 7 km/h do 14 km/h i predstavljen na dijagramu br. 8. Kriterijum po kome se usvaja izlazna snaga na propellerskim vratilima broda-potiskivača iz modela skupa VNM je bio takav da su se uzimale izlazne vrednosti snaga onih VNM koje su bile usvojene kod izlaznih vrednosti snaga na dijagramu br. 7.

Brod-potiskivač „Kadinjača“ ima sledeće glavne osobenosti:

Dužina na vodnoj liniji	$L_{kvl} = 34,29$	m
Širina preko svega	$B_a = 11,0$	m
Gaženje (konstrukciono)	$T_{km} = 1,80$	m
Deplasman punog broda	$D_{mpot} = 505,0$	t
Snaga motora (za trajni pogon)	$N_{inst} = 3 \times 809,6$	kW

DIJAGRAM BR. 11. Dijagram zavisnosti izmerene snage na propellerskim vratilima (N_{vr}) od brzine plovidbe u mirnoj vodi (v_{pl}) za brod-potiskivač „Kladovo” u sklopu sa „3+3” potiskivana teretnjaka (snage su proračunate primenom modela skupa VNM) koji su bili u sklopu sa brodom-potiskivačem „Deligrad”



Model skupa VNM je još jednom pokazao da može da se koristi za proračun snaga koje nisu pripadale niti skupu za obučavanje niti skupu za testiranje.

Kao što je prikazano na dijagramima br. 4-11 model skupa VNM je pokazao da može uspešno da proračuna snage na propellerskim vratilima za brzine plovidbe u mirnoj vodi i potiskivane sklopove koji nisu pripadali ni skupu za obučavanje ni skupu za testiranje.

Dijagrami br. 4-11 su pokazali da se kod usvajanja vrednosti snaga na propellerskim vratilima koriste prva i treća metodologija. Druga metodologija nije bila korišćena, ali to nije dokaz da je ona loša ili neprecizna, već da se mora dalje eksperimentisati sa vrednostima W_T .

Osnovna razlika između treće metodologije proračuna i prve dve metodologije jeste u tome da se vrednosti snaga u prve dve metodologije dobijaju pomoću izraza, dok se prema trećoj metodologiji dobijaju pomoću određenih pravila. Obzirom da proračunate snage prema ovim metodologijama treba samo da ukažu na trend povećanja ili smanjenja snaga u zavisnosti od povećanja ili smanjenja brzina, jasno je da su prva i druga metodologija u prednosti kod manjeg broja sastavnih mreža u modelu skupa VNM, dok je treća metodologija u prednosti kod većeg broja sastavnih mreža u modelu skupa VNM. Ipak, da bi se ova prednost ostvarila i dokazala, potrebno je uvesti interkvantilni razmak (Vukadinović i Popović, 1996) kod preve i druge metodologije, kojim bi se izbegao uticaj ekstremnih vrednosti snaga dobijenih na osnovu obučavanja pojedinih sastavnih mreža.

7.6. Primer proračuna snage na propellerskim vratilima na osnovu glavnih dimenzija potiskivanih sastava i brzine sklopa u mirnoj vodi

Za potrebe Železare u Smederevu neophodno je po dinamičkom planu dopremiti određene količine rude po unapred utvrđenim vremenskim intervalima. Da bi se taj plan dopreme rude u potpunosti ostvario, angažovani su sledeći sastavi potiskivanih teretnjaka: „2+2“ i „3+3“. Brodarstvo koje doprema rudu u Železaru Smederevo poseduje potiskivane teretnjake čije su tehničko-eksploatacione karakteristike prikazane u Tabeli 7.23.

Tabela 7.23. Glavne osobenosti nesimetričnih potiskivanih teretnjaka

Dužina L_{ter} (m)	Širina B_{ter} (m)	Gaženje T_{km} (m)	Nosivost Q_e (t)
67,03	10,23	2,30	1221
67,02	10,22	2,30	1221
66,94	10,22	2,30	1216
67,01	10,22	2,30	1221
66,98	10,22	2,30	1205
67,02	10,21	2,30	1223

Prema svim unapred određenim vremenskim intervalima prispeća rude u Železaru Smederevo, utvrđeno je da su optimalne brzine plovidbe u mirnoj vodi 10 km/h za potiskivani sastav u oznaci „3+3“ i 12 km/h za potiskivani sastav u oznaci „2+2“.

Za sastave od „2+2“ i „3+3“ potiskivanih teretnjaka (osobenosti su date u 7.23) i za odgovarajuće brzine plovidbe u mirnoj vodi od 12 i 10 km/h odrediti:

1. Snagu na propellerskim vratilima brodova-potiskivača (N_{vr}) i
2. Osnovne osobenosti brodova-potiskivača (na osnovu izgrađenih savremenih brodova-potiskivača sličnih instalisanih snaga)

Na osnovu glavnih osobenosti raspoloživih nesimetričnih potiskivanih teretnjaka (prikazanih u Tabeli 7.23) formirani su sastavi čije su dimenzije prikazane u Tabeli 7.24.

Tabela 7.24. Dimenzije sastava potiskivanih teretnjaka

Oznaka sastava	„2+2“	„3+3“
Redni broj potiskivanog sastava (i_{sast})	2	4
Deplasman sastava D_{msast} (t)	5802,84	8654,45
Dužina sastava L_{sast} (m)	134,06	134,06
Širina sastava B_{sast} (m)	20,46	30,68
Gaženje sastava T_{sast} (m)	2,30	2,30

Model skupa VNM je pravljen tako da proračunava snagu na propellerskim vratilima brodova-potiskivača koji su za vreme eksperimentalnih ispitivanja bili povezani sa sastavima potiskivanih teretnjaka u potiskivane sklopove. Da bi model skupa VNM mogao da se primeni na datom primeru potrebno je sastave potiskivanih teretnjaka povezati sa jednim brodom-potiskivačem čije glavne osobenosti odgovaraju

glavnim osobenostima brodova-potiskivača koji su učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima potiskivanih sklopova.

Na osnovu glavnih osobenosti sastava potiskivanih teretnjaka prikazanih u Tabeli 7.23 i na osnovu pregleda brodova-potiskivača prikazanih u Tabeli 4.1 i koji su učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima usvaja se da brod-potiskivač povezan za pomenute sastave bude „Deligrad“ (pod rednim brojem $i_{pot} = 2$). Brod-potiskivač „Deligrad“ ima sledeće glavne osobenosti (Radonjić, 2007):

Dužina preko svega	$L_a = 35,51$	m
Dužina na vodnoj liniji	$L_{kvl} = 34,11$	m
Širina preko svega	$B_a = 9,90$	m
Širina na vodnoj liniji	$B_{kvl} = 9,80$	m
Gaženje (konstrukciono)	$T_{km} = 1,50$	m
Deplasman punog broda	$D_{mpot} = 461,81$	t
Snaga motora (za trajni pogon)	$N_{inst} = 2 \times 456$	kW

Sada je brod-potiskivač „Deligrad“ postao sastavni deo budućeg potiskivanog sklopa u kojem je bio povezan sa pomenuta dva sastava iz zadatog primera. Glavne dimenzije potiskivanih sklopova i ulazni podaci za model skupa VNM dati su u Tabeli 7.25.

Tabela 7.25. Dimenzije potiskivanih sklopova

Oznaka sastava	„2+2“	„3+3“
Redni broj potiskivanog sastava (i_{sast})	2	4
Redni broj potiskivača (i_{pot})	2	2
Deplasman sklopa $D_{mskl}^{(k_{i_{sast}^{pot}})}$ (t)	6264,65	9116,26
Dužina sklopa $L_{skl}^{(k_{i_{sast}^{pot}})}$ (m)	168,16	168,16
Širina sklopa $B_{skl}^{(k_{i_{sast}^{pot}})}$ (m)	20,46	30,68
Gaženje sklopa $T_{skl}^{(k_{i_{sast}^{pot}})}$ (m)	2,30	2,30

Na osnovu dimenzija potiskivanih sklopova koje su date u Tabeli 7.25, ulazne vrednosti u model skupa VNM, kao što su odnosi dužine sklopa i širine sklopa, odnosi srednjeg gaženja sklopa i širine sklopa i koeficijenti vitkosti se preuzimaju iz Tabele 7.3. Frudovi brojevi za brzine od 10 i 12 km/h su preuzeti iz Tabele 7.3. Usvajanje vrednosti ulaznih podataka u model skupa VNM je bilo moguće zbog toga što su vrednosti za redne brojeve merenja snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača

$(k_{i_{sast}}^{i_{pot}})$ bile jednake vrednostima rednih brojeva elemenata ukupnog skupa podataka (k').

Vrednost snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača „Deligrad“ u sastavu „3+3“ i za brzinu plovidbe u mirnoj vodi od 10 km/h određuje se iz dijagrama br. 5 i jednaka je 850,257 kW. Pošto je vrednost snage na propellerskim vratilima manja od instalisane snage broda-potiskivača „Deligrad“, ovaj brod-potiskivač se usvaja za dopremanje rude u Železaru Smederevo.

Vrednost snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača „Deligrad“ u sastavu „2+2“ i za brzinu plovidbe u mirnoj vodi od 12 km/h određuje se iz dijagrama br. 5 i jednaka je 684,35 kW. Pošto je vrednost snage na propellerskim vratilima manja od instalisane snage broda-potiskivača „Deligrad“, ovaj brod-potiskivač može da se usvoji za dopremu rude u Železaru Smederevo.

7.7. Zaključak

Problem proračuna snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača u disertaciji je uspešno rešen pomoću modela skupa VNM. Podaci su grupisani u bazu podataka i podeljeni na ulazne i izlazne podatke. Ulazne podatke su činili odnos dužine sklopa i širine sklopa $\left(\frac{L_{skl}}{B_{skl}}\right)$, odnos srednjeg gaženja sklopa i širine sklopa $\left(\frac{T_{skl}}{B_{skl}}\right)$, koeficijent vitkosti $\left(\frac{L_{skl}}{D_{mskl}^{1/3}}\right)$ i Frudov broj na bazi dužine sklopa (F_r). Izlazni podatak su predstavljale snage na propellerskim vratilima ispitivanih brodova-potiskivača (N_{vr}). Prilikom formiranja datog modela (modeliranja) korišćena je baza podataka eksperimentalnih ispitivanja potiskivanih sklopova. Podaci su grupisani u skup podataka za obučavanje i skup podataka za testiranje. Iz skupa podataka za obučavanje je izdvojen i skup podataka za validaciju. Broj podataka koji je korišćen prilikom modeliranja je iznosio 193. Model skupa VNM se sastojao od VNM sa 8, 10, 14 i 15 čvorova u skrivenom sloju. VNM su odabrane na osnovu *AIC* kriterijuma.

Rezultati su pokazali da model skupa VNM može precizno da proračuna snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Osim provere tačnosti izlaznih rezultata (snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača) modela skupa VNM (skupovi za obučavanje i testiranje), proverene su i vrednosti snage na propellerskim vratilima

pomoću ulaznih podataka koji delom nisu pripadali nijednom od pomenutih skupova. Ovi podaci su dobijeni na osnovu granica za primenu modela skupa VNM, gde je bilo moguće promeniti brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi u okviru granica modela prikazanih u Tabeli 7.12. Odabrane su brzine plovidbe u mirnoj vodi koje pripadaju intervalima najmanjih i najvećih brzina ispitanih sklopova. Rezultati proračuna snaga na propellerskim vratilima su pokazali da su srednje vrednosti apsolutnih grešaka 15,88 kW i 27,86 kW proračunatih na skupu za obučavanje is skupu za testiranje respektivno. Takođe, proverom vrednosti snaga proračunatih na osnovu ulaznih vrednosti (određenih na osnovu granica za primenu modela) koje nisu pripadale ni skupu za obučavanje ni skupu za testiranje, utvrđeno je da je većina njih manja od 15 kW (videti Tabelu 7.13).

Model skupa VNM je primenjen i na brzine plovidbe sklopova koje su bile izvan granica datih intervala u disertaciji. Proračunima su dobijeni dijagrami koji predstavljaju trendove snaga na propellerskim vratilima brodova-potiskivača ili ekstrapolacione krive snaga u odnosu na brzinu plovidbe. Kao kriterijum izlaznih vrednosti snaga iz modela skupa VNM korišćene su tri metodologije proračuna izlaznih vrednosti snaga. Pokazalo se da su u konačnim vrednostima zastupljene dve metodologije proračuna, od kojih treća ima 75% učešća u odnosu na prvu.

Testiranje primene modela skupa VNM je urađeno za kombinacije brodova-potiskivača i sastava potiskivanih teretnjaka $(i_{pot}, i_{sast}) = (11,1), (13,2), (13,3)$ i $(13,4)$ i za brzine plovidbe u mirnoj vodi od 7 do 14 km/h. Proračun snaga na propellerskim vratilima je obavljen na osnovu prve i treće metodologije, pri čemu se zaključuje da se metodologija proračuna vezala za broj sastava potiskivanih teretnjaka.

Na kraju je urađen i jedan numerički primer u kome su snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača određene na osnovu dijagrama br. 7 i br. 9 što ukazuje na praktičnu primenu modela skupa VNM.

Može se zaključiti da predloženi model skupa VNM uspešno predviđa snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača na osnovu ulaznih podataka koji su označeni kao bitni pre samog procesa modeliranja.

8. Zaključna razmatranja

Predložen model skupa VNM zasniva se isključivo na rezultatima eksperimentalnih ispitivanja brodova-potiskivača koji su bili u okviru potiskivanih sklopova. Glavni cilj eksperimentalnih ispitivanja brodova-potiskivača bio je da se izmeri njihova snaga na propelerskim vratilima. Osim merenja snage na propelerskim vratilima, izmerene su i brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi i broj obrtaja propelerskih vrtila. Glavni cilj disertacije je bio uspostavljanje funkcionalnih veza između izmerenih veličina snaga na propelerskim vratilima, geometrijskih veličina sklopova i brzina plovidbe sklopova u mirnoj vodi.

Od svih podataka dobijenih eksperimentalnim ispitivanjima napravljena je jedna baza podataka. Iz ove baze podataka je izdvojen uzorak od 193 para podataka. Parovi podataka su kasnije korišćeni za obučavanje i testiranje VNM. Prilikom odabira podataka nije uzeta u razmatranje greška koja se eventualno javila kod eksperimentalnih ispitivanja. Ova greška nije mogla biti utvrđena jer su ispitivanja obavljena kroz duži period vremena, a radova koji se bave proračunom ovakvih grešaka nema u oblasti ispitivanja potiskivanih sklopova. Najveća greška koja je bila moguća jeste neizvesnost usled promene uslova koji vladaju na plovnom putu i promena stanja plovila koja se ispituju. Deonice plovnog puta na kojima su obavljena ispitivanja ne obiluju promenama u vodostaju, jačini vetra i visini talasa. Zbog toga je greška koja nastaje usled promene uslova koji vladaju na plovnom putu zanemarena.

Da bi se uspostavila funkcionalna veza između tehničko-eksploatacionih pokazatelja ,podaci koji su dobijeni sa eksperimentalnih ispitivanja svrstani su u dve grupe. Prvu grupu činile su vrednosti ulaznih promenljivih, odnosno geometrijske veličine sklopova i brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi , dok su drugu grupu činile vrednosti jedne izlazne promenljive, odnosno snage na propelerskim vratilima. Ulazne veličine su birane tako da budu nezavisne promenljive i tako da odgovaraju modelu kroz koji bi trebalo da budu „propuštene“.

Glavno pitanje je bilo kako što stvarnije opisati vezu između vrednosti ulaznih promenljivih i jedne izlazne promenljive, uz uslov da se što više pojednostave komplikovane veze koje vladaju na plovnom putu i plovilima u ispitivanim sklopovima. Takođe, vodilo se računa da se iskoriste merodavni podaci sa eksperimentalnih ispitivanja, a da se pri tome ne ugrozi veličina uzorka.

Prvo je određena izlazna promenljiva i nju je činila snaga na propellerskim vratilima broda-potiskivača. Ulazne promenljive su obuhvatale sve promenljive dobijene tokom eksperimentalnih ispitivanja od kojih je zavisila snaga na propellerskim vratilima. Osim snage, razmatran je otpor kretanju sklopa i parametri kojih zavisi. Pri tome se misli na geometrijske karakteristike sklopova i brzinu ploidbe sklopova u mirnoj vodi. Na taj način su određene sledeće ulazne promenljive: odnos dužine sklopa i širine sklopa, odnos srednjeg gaženja sklopa i širine sklopa, koeficijent vitkosti i Frudov broj na bazi dužine sklopa (F_r).

Funkcionalne veze između izlazne promenljive (snage na propellerskim vratilima) i četiri ulazne promenljive uspostavljene su obučavanjem VNM. VNM su odabrane zbog najvažnijih svojstava koje poseduju, a to su: modeliranje preslikavanja vrednosti ulaznih u vrednosti jedne izlazne promenljive, adaptivnost i modeliranje preslikavanja kroz intenzitete povezanosti čvorova (vrednosti težina grana mreže), tj. bez programiranja celokupnog sistema, modeliranje preslikavanja velikog broja vrednosti ulaznih i izlaznih promenljivih, fleksibilnost prilikom modeliranja preslikavanja ulaznih u izlazne vrednosti promenljive i relativno dobro svojstvo uopštavanja stečenog znanja.

Podaci su bili podeljeni na skup za obučavanje i skup za testiranje. Iz skupa za obučavanje je izdvojen skup za validaciju. Svi skupovi su određeni na slučajan način. Skup za validaciju je korišćen samo da prekine obučavanje VNM. Skup za obučavanje i skup za testiranje su primenjeni kod ocene uopštavanja stečenog znanja VNM.

Cilj disertacije je bio da se u prvom koraku pokaže mogućnost uspostavljanja funkcionalne veze između snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača i brzine ploidbe sklopa u mirnoj vodi, a da se potom, obučavanjem, stvore VNM čijom bi se primenom dobili što precizniji izlazni podaci. Zbog toga je prvo formiran jedan osnovni skup VNM iz kojeg je kasnije izdvojen model skupa VNM. Proračun izlaznih rezultata, odnosno snaga na propellerskim vratilima je obavljen pomoću modela skupa VNM. Pretpostavljeno je da bi se ovom tehnikom mogli proračunati precizniji izlazni podaci u odnosu na proračun izlaznih podataka jednom VNM.

Model skupa VNM je dobijen na osnovu primene *AIC* kriterijuma. VNM su rangirane prema veličini *AIC* vrednosti i 4 veštačke neuronske mreže sa najmanjom *AIC* vrednošću su ušle u model skupa VNM. To su bile mreže sa 8, 10, 14 i 15 čvorova u skrivenom sloju. Ove VNM su dodatno obučavane još 20 puta kako bi proračunale što preciznije izlazne rezultate. Obučavanje je izvršeno na početnom skupu za obučavanje. Izlazni rezultati iz modela skupa VNM proračunavani su prema kriterijumu da ona izlazna vrednost koja ima najmanju apsolutnu grešku ima prvenstvo izlaza u odnosu na ostala tri izlaza proračunata pomoću tri preostale sastavne mreže iz modela skupa VNM.

Ocena uopštavanja stečenog znanja modela skupa VNM urađena je pomoću sledećih izmeritelja: srednja apsolutna greška, koren srednje kvadratne apsolutne greške, srednja relativna greška i standardno odstupanje relativne greške. Svi izmeritelji proračunati su na skupu za obučavanje i skupu za testiranje. Srednja apsolutna greška proračunata na skupu za obučavanje je 15,88 kW, dok na skupu za testiranje iznosi 27,86 kW. Koren srednje kvadratne apsolutne greške proračunat na skupu za obučavanje iznosi 21,15 kW, dok je na skupu za testiranje jednak 32,54 kW. Srednja relativna greška proračunata na skupu za obučavanje je 3,31%, dok na skupu za testiranje iznosi 4,24%. Standardno odstupanje relativne greške proračunato na skupu za obučavanje iznosi 4,47%, dok je na skupu za testiranje jednako 5,47%. Da bi se uporedile greške proračunate na skupu za obučavanje i skupu za testiranje napravljeni su histogrami frekvencija grešaka. Na osnovu histograma može se zaključiti da model skupa VNM proračunava tačnije vrednosti snaga na propelerskim vratilima brodova-potiskivača kod ulaznih podataka koji su služili za obučavanje VNM.

Pouzdanost modela skupa VNM je proverena na osnovu ulaznih podataka koji nisu pripadali ni skupu za obučavanje ni skupu za testiranje. Prvo su bile određene granice za primenu modela. Za granice modela konkurisale su samo brzine plovidbe sklopova u mirnoj vodi. Pretpostavka je bila da sve brzine plovidbe sklopova koje su se nalazile u intervalima maksimalnih i minimalnih brzina i koje su pripadale samo određenim sastavima potiskivanih terenjaka mogu da budu ulazni podatak u model skupa VNM. Rezultati proračuna za ovako određene ulazne podatke su značajno doprineli pouzdanosti modela skupa VNM. Samo tri proračunate vrednosti apsolutnih grešaka (na osnovu ulaznih promenljivih koji nisu pripadali ni skupu za obučavanje ni skupu za testiranje) su bile manje od srednje apsolutne greške proračunate na skupu za obučavanje, a preostalih sedam vrednosti su bile manje od srednje apsolutne greške proračunate na skupu za testiranje.

Primena modela skupa VNM predložena je za potiskivane sklopove koji su učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima, ali i za brzine plovidbe u mirnoj vodi koje su izlazile iz poznatih intervala sa ispitivanja i za potiskivane sklopove koji nisu učestvovali u eksperimentalnim ispitivanjima. Rezultati su pokazali da model skupa VNM može imati praktičnu primenu kod prevoza tereta flotom naših brodarstava.

Zaključak istraživanja u disertaciji je da model skupa VNM ne samo da može da uspostavi veze između snage na propellerskim vratilima broda-potiskivača i brzine plovidbe sklopa u mirnoj vodi, već da može i da proračuna izuzetno precizne snage na propellerskim vratilima. Glavni nedostatak modela ogleda se u odabiru sastavnih mreža koje bi činile model skupa VNM. *AIC* kriterijum nije jedini mogući metod kojim to može da se uradi. Zbog toga je u budućim istraživanjima potrebno primeniti i druge postojeće metode popunjavanja modela skupa VNM. Jedno od rešenja bilo bi i da se uključi veći broj sastavnih mreža u model skupa VNM.

Još jedan nedostatak modela skupa VNM se pokazao kod pravljenja ekstrapolacionih krivih, a to je kriterijum po kojem se vrši odabir izlaznih vrednosti snaga iz modela. Po postojećem kriterijumu u disertaciji, vrednosti snage se biraju na osnovu najmanje apsolutne greške između izmerene vrednosti snage i vrednosti snage dobijene po jednoj od VNM. Ipak, kada se proračunavaju vrednosti koje ne pripadaju granicama modela postavlja se pitanje koji kriterijum tada odabrati za usvajanje jedne od četiri vrednosti snage. U ovoj disertaciji predložene su tri, a primenjene dve metodologije za koje se ne može tvrditi da daju sasvim precizne rezultate.

Obzirom da će model skupa VNM gotovo uvek davati netačna rešenja za različite k' kada je apsolutna greška velika, predlaže se kao rešenje da se uvede još dodatnih sastavnih mreža u model skupa VNM. Na ovaj način bi se povećala šansa da se ekstremne vrednosti apsolutnih grešaka svedu na minimum, ali i da se poveća broj sastavnih mreža čijim bi se obučavanjem dobile vrednosti snage koje bi pratile trend rasta ili smanjenja vrednosti snaga za veće ili manje brzine plovidbe.

Na više numeričkih primera pokazano je da je predložen model skupa VNM upotrebljiv za proračun snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača. Rezultati proračuna snage na propellerskim vratilima brodova-potiskivača mogu se primeniti u operativnom i strateškom planiranju broskog saobraćaja. Operativnim planiranjem moguće je rezultate proračuna primeniti za celokupnu organizaciju prevoza unutar jednog brodarstva. Strateško planiranje se primenjuje kod istraživanja različitih uticaja glavnih dimenzija i nosivosti sastava na plovidbu potiskivanih sklopova, odnosno kod

dugoročnih planova plovidbe. Model se jednostavno poboljšava i prilagođava dodavanjem novih izmerenih vrednosti (sa eksperimentalnih ispitivanja) u skup za obučavanje. Model skupa VNM je primenljiv na brodove-potiskivače čija je dužina oko 35 m, a koji su trenutno najzastupljeniji na Dunavskoj plovnoj mreži u Republici Srbiji.

Ciljeve daljih istraživanja treba usmeriti i ka promeni ili dodavanju novih ulaznih i izlaznih veličina. U slučajevima gde nije moguće upotrebiti brojne vrednosti veličina, moguća je primena fazi modela.

Literatura

1. Abdel N., Lehetaa. M.M., Banawana H.W., Banawana, A.A., Elhewya, A.H. (2008) „*Investigation of various artificial neural networks techniques for the prediction of inland water units' resistance*“, Ships and Offshore Structure 3, 247-254.
2. Akaike, H. (1973). „*Information theory as an extension of the maximum likelihood principle*“, Second Int. Symp. Inf. Theory, Budimpešta, Mađarska, 267-281.
3. Al-Haik, M.S., Garmestani, H., Navon, I.M., (2003) „*Truncated-Newton training algorithm for neurocomputational viscoplastic model*“, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 192, 2249-2267.
4. Bertram, V., Mesbahi, E. (2006) „*SWATH Ship Design Formulae Based on Artificial Neural Nets*“, 5th International Conference on High Performance Marine Vehicles, 8-10. Novembar, Australija.
5. Bolt, E. (2003). „*Schatting energiegebruik binnenvaartschepen*“, Rotterdam: Adviesdienst Verkeer en Waterstaat.
6. Bottou, L.Y., (1988) „*Reconnaissance de la parole par reseaux multi-couches*“, Proceedings of the International Workshop Neural Networks Application, Neuro-Nimes'88, EC2 and Chambre de Commerce et d'Industrie de Nimes, 197-217.
7. Breiman, L., (1996) „*Bagging predictors*“, Machine Learning 24(2), 123–140.
8. Bryson, A.E., Ho, Y-C. (1969). „*Applied optimal control: optimization, estimation, and control*“, Blaisdell Publishing Company or Xerox College Publishing, str. 481.
9. Campora, U., Figari, M. (2003) „*Numerical simulation of ship propulsion transients and full-scale validation*“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment 217, 41-52.
10. Chen, A-G., Ye, J-W. (2009) „*Research on the Genetic Neural Network for the Computation of Ship Resistance*“, International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing, Wuhan, Kina, 366-369.

11. Cichocki, A., Unbehauen, R., (1992) „*Neural networks for solving systems of linear equations – Part II: Minimax and least absolute value problems*“, IEEE Transactions on Circuits and Systems – II: Analog and Digital Signal Processing 39(9), 619-634.
12. Couser, P.R., Mason, A. (2004) „*Artificial Neural Networks for Hull Resistance Prediction*“, Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, COMPIT'04, 9-12. maj, Španija.
13. Cowper, B., Kolomojcev, A., Armor, B., Berthiaume, A. (2003) „*Main Engine Power and Torque Requirements on the MV Klitsa*“, Presented at the Canadian Institute of Marine Engineers (CIMarE) Local Meeting Vancouver.
14. Cybenko, G., (1989) „*Approximations by superpositions of a sigmoidal function*“, Mathematics of control Signals and Systems 2, 303-314.
15. Čolić, V. (1985) „*Naučna analiza eksperimentalnih ispitivanja veličine otpora pri plovidbi savremenih brodova Dunavske plovne mreže*“, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, str. 250.
16. Čolić, V. (1998) „*Prevozni učinci brodova Dunavske plovne mreže*“, Univerzitet u Beogradu Saobraćajni fakultet, Beograd, str. 180.
17. Čolić, V. (2002) „*Otpor broda: savremene metode proračuna*“, Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, str. 120.
18. Čolić, V. (2006) „*Istraživanje plovidbenih, prevoznih, energetskih i propulzionovučnih osobnosti dunavskih brodova potiskivača*“, Univerzitet u Beogradu Saobraćajni fakultet, Beograd, str. 350.
19. Čolić, V., Hrle, Z., Radonjić, A. (2008) „*Istraživanje tehničko-eksploatacionih osobnosti brodova-potiskivača dunavske plovne mreže u cilju poboljšanja organizacije vodnog transporta*“, Istraživanja i projektovanja za privredu 22, 33-38, ISSN 1451-4117.
20. Čolić, V. (2010) „*Eksperimentalna istraživanja tehničko-eksploatacionih osobnosti putničkih i samohodnih teretnih brodova na dunavskoj plovnoj mreži*“, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, str. 255.
21. Čolić, V., Hrle, Z., Vukadinović, K., Radonjić, A., Pjevčević, D. (2012) „*Računska metoda za preračunavanje veličine otpora broda u plitkoj vodi na otpor broda u dubokoj vodi*“, Tehnika – deo Saobraćaj 59(2), Savez inženjera i tehničara Srbije, 265-270, ISSN 0040-2176.

22. Dawson, C.W. (1977) „*A practical Computer Method for Solving Ship-Wave Problems*“, Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, University of California, Berkley, 30-38.
23. Dawson, C.W., Wilby, R.L. (2001) „*Hydrological modeling using artificial neural networks*“, Progress in Physical Geography 25(1), 80-101.
24. Denny, S.B., Puckette, L.T., Hubble, E.N., Smith, S.K., Najarian, R.F. (1989) „*A new unsable propeller series*“ Marine Technology 26(3), 173–191.
25. Drago, G.P., Ridella, S. (1992) „*Statistically Controlled Activation Weight Initialization (SCAWI)*“. IEEE Transactions on Neural Networks 3(4), 627-631.
26. Dunavska strategija EU i Srbija – <http://www.dunavskastrategija.rs/sr/?p=47> [pristupljeno 2013].
27. ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, (2006) „*Recommendations on Harmonized Europe-Wide Technical Requirements for Inland Navigation Vessels. Inland Transport Committee*“, ECE/TRANS/SC.3/172, Njujork i Ženeva. Dostupno sa: <http://www.unece.org/trans/doc/finaldocs/sc3/Resolution%20No61E.pdf> [prvi put pristupljeno 5 Septembar 2008].
28. Fletcher, R., Reeves, C.M. (1964) „*Function minimization by conjugate gradients*“, Computer Journal 7, 149-154.
29. Fritsch, M., Bertram, V. (2002) „*Hydrodynamic Design Aspects for Fast Conventional Vessels*“, Australian Maritime Colledge – AUSTRALIA'S INSTITUTE FOR MARITIME EDUCATION, TRAINING AND RESEARCH, Launceston, Australija.
30. Gallant, S.I., (1993) „*Neural Network Learning and Expert Systems*“. MIT Press, Kembridž, 370. Dostupno sa:
<http://books.google.rs/books?id=N8i6pTafq1kC&printsec=frontcover&hl=sr#v=onepage&q&f=false>.
31. Giacinto, G., Roli, F. (2001). „*Design of effective neural network ensembles for image classification purposes*“, Image and Vision Computing 19(10), 699–707.
32. Gill, P.E., Murray, W. (1974) „*Newton-type methods for unconstrained and linearly constrained optimization*“, Mathematical programming 7, 311-350.
33. Gort R. (2009), „*Design of an autonomous loading & unloading inland barge: a concept for container transport on the Albert Canal*“, Delft University of Technology, Master rad.

34. Haakenstad, K., (2012) „*Analysis and correction of sea trials*“, Norwegian University of Science and Technology, Master thesis in marine technology, Master rad, Trondhjem, str. 113.
35. Hansen, L.K, Salamon, P. (1990) „*Neural network ensembles*“, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 12(10), 993–1001.
36. Hartman, E.J., Keeler, J.D., Kowalski, J.M. (1990) „*Layered neural networks with Gaussian hidden units are universal approximations*“. Neural Computation 2(2), 210–215.
37. Harvald, S.A. (1983), „*Resistance and propulsion of ships*“, John Wiley & Sons, ISBN 0-89464-754-7.
38. Hecht-Nielsen, R., (1987) „*Kolmogorov's mapping neural network existence theorem*“, IEEE First International Conference on Neural Networks 3, 11-13.
39. Hestenes, M.R., Stiefel, E., (1952) „*Methods of conjugate gradients for solving linear systems*“, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 49(6), 409-436.
40. Hoffman, K. (1989) „*An introduction to measurement using strain gages*“, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
41. Hollenbach, U., Chryssostomidis, C., Johansson, K. (1999) „*Estimating resistance and propulsion for single-screw and twin-screw ships*“, 10th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding , ICCAS '99, 7-11 jun, Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, Massachusetts, USA, 237-250
42. Holtrop, J., Mennen, G.G.J. (1982), „*A powering prediction method*“, International Shipbuilding Progress 29, 166-170.
43. Holtrop, J. (1984), „*A Statistical re-analysis of resistance and propulsion data*“, International Shipbuilding Progress 31, 272-276.
44. Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H. (1989) „*Multilayer feedforward networks are universal approximators*“, Neural Networks 2(5), 359–366.
45. Hrle, Z. (1996) „*Eksperimentalni modeli određivanja prevozne sposobnosti rečne flote*“, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, str. 190.
46. Huang G., Babri, G.B. Babri, H. (1997) „*General approximation theorem on feedforward networks*“, In International Conference on Information, Communications and Signal Processing, ICICS '97, Singapur, 9–12 Septembar, 698–702.

47. Huang, G.B., (2003) „*Learning capability and storage capacity of two-hidden-layer feedforward networks*“, IEEE Transactions on Neural Networks 14, 274–281.
48. Igel, C., Husken, M., (2003) „*Empirical evaluation of the improved Rprop learning algorithms*“, Neurocomputing 50, 105-123.
49. International Towing Tank Conference (ITTC) (2002) „*Full Scale Measurements Speed and Power Trials-Trial Conduct*“, The Specialist Committee of 23rd ITTC on Speed and Powering, br. 7.5-0.4-01-01.6.
50. Isnel, M. (2008) „*Uncertainty in the analysis of speed and power trials*“, Ocean Engineering, 35, 1183-1193.
51. Istook, E., Martinez, T. (2002) „*Improved Backpropagation Learning in Neural Networks with Windowed Momentum*“, International Journal of Neural Systems 12(3), 303-318.
52. Jacobs, Robert A. (1998) „*Increased Rates of Convergence Through Learning Rate Adaption*“, Neural Networks 1, 295-307.
53. Jiang T. (2001) „*A new method for resistance and propulsion prediction of the ship performance in shallow water*“, 8th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Šangaj, Kina.
54. Jim Y.F., Yam, Tommy, W.S., Chow (2000) „*A weight initialization method for improving training speed in feedforward neural network*“, Neurocomputing 30, 219-232.
55. Journe´e, J., Rijke, R., Verleg, G. (1987) „*Marine performance surveillance with a personal computer*“, Technical report 753-P, Delft University of Technology, Ship Hydromechanics Laboratory, Delft, Holandija.
56. Journe´e, J. (2003) „*Review of the 1985 full-scale calm water performance tests onboard m.v. mighty servant 3*“, Technical report, DUT-SHL report 1361, Delft University of Technology, Ship Hydromechanics Laboratory.
57. Jovanović, M. (2002) „*Projektovanje broda*“, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, str. 302.
58. Kalajdžić, M., Hofman, M., (2011) „*Postupak za proračun snage rečnih guračkih sastava i kompjuterski program CONVOY*“, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd, Tehničko rešenje, str. 18.
59. Karlaftis, M.G., Vlahogianni, E.I., (2011) „*Statistical methods versus neural networks in transportation research: Differences, similarities and some insights*“, Transportation research Part C, 19, str: 387-399.

60. Kathirvalavakumar, T., Thangavel, P., (2003) „*A new learning algorithm using simultaneous perturbation with weight initialization*“, Neural Processing Letters 17(1), 55-68.
61. Kayano, J., Yabuki, H., Sasaki, N., Hiwatashi, R., (2013) „*A Study on the Propulsion Performance in the Actual Sea by means of Full-scale Experiments*“, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 7(4), str: 521-526, DOI: 10.12716/1001.07.04.7.
62. Kim, H.S., Kim, M.C., Choi, K.S., Lee, C.J. (2013) „*Full scale ice sea trials of Korean ice breaking research vessel ‘Araon’ on the big floes near Antarctica*“, Journal of Marine Science and Technology 18, 515-523.
63. Kim, Y.K., Ra, J.B. (1991) „*Weight Value Initialization for Improving Training Speed in the Backpropagation Network*“. Proc. of International Joint Conference on Neural Networks 3, 2396-2401.
64. Kohonen, T. (1982) „*Self-organized formation of topologically correct feature maps*“, Biological Cybernetics 43, 59-69.
65. Kolmogorov, A., (1957) „*On the representations of continuous functions of many variables by superpositions of continuous functions of one variable and addition*“, Dokladi Akademii Nauk SSSR 114, 953-956.
66. Korkut, E. (2006) „*A case study for the effect of a flow improvement device (a partial wake equalizing duct) on ship powering characteristics*“, Ocean Engineering 33, 205-218.
67. Kostić, D., Čolić, V., Jevtić, N., Radonjić, A. (2013) „*Studija o ispitivanju snage, obrtnih momenata i torzionih vibracija na propelerskim vratilu plovnog samohodnog bagera refulera SAVA III*“, Beograd, Naručilac Studije: Preduzeće „RAPID“, D.O.O. Ruma, str. 17
68. Koushan, K., Mesbahi, E. (1998) „*Empirical Prediction Methods for Rudder Forces of a Novel Integrated Propeller-Rudder System*“, Proceedings Of OCEANS '98, Nica, Francuska, 532-537.
69. Koushan, K. (2001) „*Empirical Prediction of Ship Resistance and Wetted Surface Area using Artificial Neural Networks*“, Eighth International Symposium - PRADS 2001 (2 Volume set), Elsevier, ISBN 10: 0-08-043950-0, ISBN 13: 978-0-08-043950-1, 501-507.
70. Kreculj, D. Čolić, V. (1996) „*Plovna sredstva*“, Univerzitet u Beogradu, Beograd, br. str. 478.

71. Kreculj, D. Čolić, V. (2004) „*Stabilitet broda*“, Odabrana poglavlja sa računskim primerom, Univerzitet u Beogradu, Beograd, br. str. 70.
72. Landasuri-Moreno, V., Bullinaria, J.A. (2009) „*Neural Network Ensembles for Time Series Forecasting*“, Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation, GECCO'09, Njujork, str: 1235-1242.
73. Le Cun, Y., (1985) „*A learning procedure for asymmetric threshold network*“, Proceedings of the Cognitiva 85, 599-604.
74. Le Cun, Y., Bottou, L., Genevieve, B., Müller, K-R., (1998) „*Efficient Backprop*“, Neural Networks, Tricks of the Trade, Lecture Notes in Computer Science LNCS 1524, Springer Verlag.
75. Lee, S.G., Kim, M.C., Lee, W.J., Kim, H.S., Lee, C.J. (2011) „*Study on the estimation of power based on model test results using ice thickness and strength correction method*“, Proceeding of the society of naval architects of Korea, Busan, Koreja, Jun 2–3, str. 913–920.
76. Leifsson, L., Saevarsdottir, H. Sigurdsson, S., Vesteinsson, A. (2008). „*Grey-box modeling of an ocean vessel for operational optimization*“, Simulation Modeling Practice and Theory 16, 923-932.
77. Li, G., Alnuweiri, H., Wu, Y. (1993) „*Acceleration of Backpropagations through Initial Weight Pre-Training with Delta Rule*“, Procecuton of the IEEE International Conference on Neural Networks, ICNN'93, vol. 1, 580-585.
78. Liu Y., Yang, J., Li, L., Wu, W., (2012), „*Negative effects of sufficiently small initial weights on back-propagation neural networks*“, Journal of Zhejiang University-SCIENCE C (Computers & Electronics) 13(8), 585-592.
79. Marchal, J.L.J., Shen, Y.-D., Kicheva, D. (1996) „*An Empirical Formula to Estimate the Resistance of a Convoy in a Restricted Waterway*“, Journal of Ship Research 40(2), 107-111.
80. Markle, S.P., Brown, A.J. (1996) „*Naval Ship Engine Exhaust Emission Characterization*“, Naval Engineers Journal 108(5), 37-47.
81. Mason, A., Couser, P., Mason, G., Smith, C.R., Konsky, B.R. (2005) „*Optimization of vessel resistance using genetic algorithms and artificial neural networks*“, COMPIT 2005, Hamburg, Nemačka, 440–454.
82. Matsukura, H., Udommahuntisuk, M., Yamato, H., Dinariyana, A.A.B. (2010) „*Estimation of CO₂ reduction for Japanese Domestic Container Transportation*

- based on mathematical models*“, Journal of Marine Science and Technology 15, 34-43.
83. Matulja, D., Dejhalla, R. (2007) „*A comparison of a ship hull resistance determined by different methods*“, Engineering Review 27(2) 13-24.
 84. Maynard S.T. (2000) „*Power versus Speed for Shallow Draft Navigation*“, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering 126(2), 103-107.
 85. McCulloch, W.S., Pitts, W., (1943) „*A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*“, Bulletin of Mathematical Biophysics 5, 115-133.
 86. Meyer, J., Stahlblock, R., Voss, S. (2012) „*Slow Steaming in Container Shipping*“, 45th Hawaii International Conference on System Sciences, 1306-1314, IEEE Computer Society, Maui, Havaji.
 87. Min K-S., Kang, S-H. (2010) „*Study on the form factor and full-scale ship resistance prediction method*“, Journal of Marine Science and Technology 15, 108-118.
 88. Minai, A. A., Williams, R. D. (1990) „*Acceleration of Back-Propagation Through Learning Rate and Momentum Adaptation*“, International Joint Conference on Neural Networks, IEEE, 676-679.
 89. Molland, A.F., Wellicome, J.F., Couser, P.R. (1994), „*Resistance experiments on a systematic series of high speed displacement catamaran forms: variation of length-displacement ratio and breadth-draught ratio*“, Ship Science Report 71, Dept. Ship Science, Univ. of Southampton.
 90. Morawski, L., Szuca, Z. (2009) „*The Monitoring Of Ship Propulsion By Torque And Rotational Speed Measurements On The Propeller Shaft*“, Journal of Polish CIMAC 4(1), 105-110.
 91. Moreira, M., Fiesler, E., (1995) „*Neural Networks with Adaptive Learning Rate and Momentum Terms*“, IDIAP Technical Report, Institute Dalle Molle D'Intelligence Artificielle Perceptive, str. 30.
 92. Muškatirović, D. (1993) „*Unutrašnji plovni putevi i pristaništa*“, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, br. str. 537.
 93. Nash, S.G., (2000) „*A survey of truncated-Newton methods*“, Journal of Computational and Applied Mathematics 124, 45-49.
 94. Ortigosa, I., Lopez, R., Garcia, J. (2009). „*Prediction of Total Resistance Coefficients using Neural Networks*“, Journal of Maritime Research, III(VI), 15-26.

95. Palubinskas, G. (1994) „*Data-driven Weight Initialization of Back-propagation for Pattern Recognition*“, Proc. of the International Conference on Artificial Neural Networks 2, 851-854.
96. Parker, D.B., (1985) „*Learning logic*“, Sloan School of Management, Technical Report 47, MIT, Cambridge, ME.
97. Pedersen, B., Larsen, J. (2009) „*Prediction of full-scale propulsion power using artificial neural networks*“, Proceedings of the 8th international conference on computer and IT applications in the maritime industries (COMPIT'09), Budimpešta, Mađarska, Maj, 10–12, 537–550. <http://www2.imm.dtu.dk/pubdb/p.php?5840>
98. Perrone, M.P., Cooper, L.N. (1993) „*Neural networks for speech and image processing*“, Poglavlje: „When Networks disagree: Ensemble methods for hybrid neural networks“, Chapman-Hall.
99. Petersen, J.P., Jacobsen, D.J. (2012) „*Statistical modelling for ship propulsion efficiency*“, Journal of Marine Science and Technology 17, 30-39.
100. Polak, E. (1971) „*Computational methods in optimization*“, New York, Academic press, str. 329.
101. „*Pravilnik o načinu obavljanja probne vožnje brodova i zonama plovidbe*“, Službeni glasnik RS, 99/12, 16.10.2012
102. Priddy, K.L., Keller, P.E. (2005) „*Artificial neural networks: An introduction*“, SPIE Publications, str. 180, ISBN: 0819459879.
103. „*Priručnik za unutrašnju plovidbu u Republici Hrvatskoj*“, Centar za razvoj plovidbe d.o.o., Zagreb, decembar, 2006.
104. Prpić-Oršić, J., Faltinsen, O-M., (2012) „*Estimation of ship speed loss and associated CO₂ emissions in a seaway*“, Ocean Engineering 44, 1-10.
105. Qui, G., Varley, M. R., Terrell, T. J. (1992) „*Accelerated Training of Backpropagation Networks by Using Adaptive Momentum Step*“, IEEE Electronics Letters, 28(4), 377-379.
106. Radojčić, D. (2009) „*Environmentally Friendly Inland Waterway Ship Design for the Danube River*“, World Wide Fund for Nature International Danube-Carpathian Programme (WWF-DCP), Ime projekta: „Danube Navigation“, Republika Srbija.
107. Radonjić, A. (2007) „*Istraživanje eksperimentalnih metoda za određivanje plovidbenih osobina brodova*“, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, str. 159 – magistarski rad

108. Radonjić, A. (2011) „*Strategy to Reduce Pollution from Serbian Pushboats*”, International Journal for Traffic and Transport Engineering, Scientific Research Center Ltd. Belgrade, ISSN 2217-544X, ISSN 2217-5652 (online), 1(2), 59-72.
109. Radonjić, A., Čolić, V. (2011) „*Primena veštačkih neuronskih mreža na proračun snage brodova potiskivača*”, XXXVIII Simpozijum o operacionim istraživanjima - SYMOPIS 2011, 03-07.10.2007., Zlatibor, Zbornik radova, ISBN 978-86-403-1168-7, Centar za izdavačku delatnost Ekonomskog fakulteta u Beogradu, str: 721-724.
110. Radonjić, A., Hrle, Z., Čolić, V. (2012) „*Application of Different Learning Algorithms for the Prediction of Power of Inland Pushboats*”, First International Conference on Traffic and Transport Engineering ICTTE 2012, Scientific Research Center Ltd. Belgrade, 29-30.11.2012., Beograd, Proceedings, ISBN 978-86-916153-0-7, 29-39.
111. Radonjić, A., Vukadinović, K., Čolić, V. (2013), „*Proračun snage motornih potiskivača primenom skupa neuronskih mreža*”, XL Simpozijum o operacionim istraživanjima – SYM-OP-IS 2013, 09-12.09.2013., Zlatibor, Zbornik radova, ISBN 978-86-7680-286-9, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, 781-786.
112. Radonjić, A., Vukadinović, K. (2014) „*Application of Ensemble Neural Networks to Prediction of Towboat Shaft Power*“, Journal of Marine Science and Technology, DOI: 10.1007/s00773-014-0273-2
113. Rana, R.K., Damodaran, K.A., Kand, H.S. (1992), „*Estimation of Powering Characteristics of a Semi-Planing Ship*“, Defence Science Journal 42(1), 13-22.
114. Ray, T., Gokarn, R.P., Sha, O.P. (1996) „*Neural network applications in naval architecture and marine engineering*“, Artificial Intelligence in Engineering 1 213–226.
115. Reich, Y., Barai, S.V., (2000) „*A methodology for building neural networks model from empirical engineering data*“, Engineering Applications of Artificial Intelligence 13, 685-694.
116. Ren, L.Q., Zhao, Z.Y. (2002) „*An optimal neural network and concrete strength modeling*“. Advances in Engineering Software 33(3), 117–130.
117. Republički zavod za statistiku (2010) „*Saobraćaj i telekomunikacije u Republici Srbiji, 2010.*“, Beograd, Republika Srbija, BILTEN 549, br. str. 128,

http://webrzs.stat.gov.rs/WebSite/repository/documents/00/00/59/16/SB_549_Saobracaj_2010.pdf

118. Riedmiller, M., Braun, H. (1993). „*A direct adaptive Method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm*”, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 586–591. IEEE Press.
119. Ripley, B.D., (1996) „*Pattern Recognition and Neural Networks*“, Cambridge University Press, ISBN 0-521-46086-7, str. 416.
120. Rojas, R., (1996) „*Statistics and neural networks*“ „Neural Networks: A Systematic Introduction“, Springer, str: 229-264.
121. Rosenblatt, F. (1958), „*The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain*“, Cornell Aeronautical Laboratory, Psychological Review 65(6), 386–408.
122. Rudolph, S. (1997) „*Ontology, size and generalization of non-linear feed-forward neural networks*“, Neurocomputing 16(1), 1-22.
123. Rumelhart, D.E., McClelland, J.L. (1986) „*Parallel Distributed Processing: Explorations in the microstructure of cognition*“, A Bradford Book, vol 2, str. 576.
124. Savitsky, D., Brown, P. (1976), „*Procedures for hydrodynamic evaluation of planing hulls in smooth and rough water*“, Marine Technology, 13(1), 381-400.
125. Setiono, R., (2001) „*Feedforward Neural Network Construction using Cross Validation*“, Neural Computation, 13(12), 2865-2877.
126. Schapire, RE. (1990) „*The strength of weak learnability*“, Machine Learning 5(2), 197–227.
127. Schneekluth, H., Bertram, V. (1998) „*Ship Design for Efficiency and Economy*“, second edition, Butterworth Heinemann, Oxford, str: 227.
128. Shepanski, J.F. (1988) „*Fast learning in artificial neural systems: multilayer perceptron training using optimal estimation*“, IEEE International Conference on Neural Networks 1, IEEE Press, New York, 1988, 465-472.
129. Shimodaira, H. (1994) „*A Weight Value Initialization Method for Improved Learning Performance of the Back Propagation Algorithm in Neural Networks*“, Procution of the 6th International Conference on Tools with Artificial Intelligence, 672-675.
130. Simić, A. (2012) „*Energetska efikasnost rečnih samohodnih teretnih brodova*“, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, str. 272 – doktorski rad.

131. SNAME (1988) „*Principles of Naval Architecture*“, Volume II, Section 11, „*Ship Standardisation Trials*“; Society of Naval Architects and Marine Engineering.
132. Stanimirović, Z., (2008) „*Nelinearno programiranje*“, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, str. 125, skripta.
133. Sturges, H. (1926) „*The choice of a class-interval*“, Journal of the American Statistical Association, 21(153), 65-66.
134. Sugiura, N., (1978) „*Further analysis of data by Akaike's information criterion and the finite corrections*“, Communications in Statistics - Theory and Methods 7(1), 12–26.
135. Šami, Z. (1994) „*Matematika I*“, osnovni udžbenik, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, str. 593.
136. Teodorović, D., Šelmić, M. (2012) „*Računarska inteligencija u saobraćaju*“, osnovni udžbenik, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, str. 210.
137. Van Den Boom, H.J.J., Mennen, G.G.J., Verkuyl, J.B. (2006) „*SEA TRIAL ANALYSIS JIP - Recommended Practice for Speed Trials*“, MARIN, Holandija, www.marin.nl
138. Van Oortmerssen, G. (1971), „*A power prediction method and its application to small ships*“, International Shipbuilding Progress, 18(207).
139. Van Oossanen, P. (1974) „*Calculation on performance and cavitation characteristics of propellers including effects of non-uniform flow and viscosity*“, Wageningen: Veenman, Publikacija br. 457, br. str. 252.
140. Via Donau (2013), www.via-donau.org
141. Van Terwisga, T. (1989). „*Weerstand en voortstuwing van bakken, een literatuurstudie*“, Wageningen: Stichting Maritiem research instituut Nederland.
142. Vujanović, N., (1990) „*Teorija pouzdanosti tehničkih sistema*“, Drugo dopunjeno izdanje, Vojno-izdavački i novinski centar, Beograd, str: 529.
143. Vukadinović, K., (1997) „*Upravljanje procesima u vodnom saobraćaju korišćenjem teorije fazi skupova i neuronskih mreža sa primenom na druge vidove saobraćaja*“, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, str. 150 doktorska disertacija.
144. Vukadinović, K., Teodorović, D., Pavković, G., (1997) „*A neural network approach to the vessel dispatching problem*“, European Journal of Operational Research, 102(3), 473-487.

145. Vukadinović, S., Popović, J. (1996) „*Matematička statistika*“, Univerzitet u Beogradu, Beograd, str. 637.
146. Wei, C.H., Schonfeld, P.M., (1993), „*An artificial neural network approach for evaluating transportation network improvements*“, Journal of Advanced Transportation 27(2), 129-151.
147. West, D., Dellana, S., Qian, J. (2005) „*Neural network ensemble strategies for financial decision applications*“, Computers & Operations Research, 32(10), 2543–2559.
148. Xiao, J., Zhang, T., Wang, X. (2005) „*Ship power load prediction based on RST and RBF neural networks*“, Proceedings of the Second international conference on Advances in Neural Networks - Volume Part III, Lecture Notes in Computer Science vol. 3498, crp. 648-653.
149. Yao, X., Liu, Y. (1998) „*Making use of population information in evolutionary artificial neural networks*“, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 28(3) str:417–425.
150. Yoon, H-S., Bae, C-S., Min, B-Y., (1995) „*Neural networks using modified initial connection strengths by the importance of feature elements*“, International Joint Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 1, 458-461.
151. „*Zakon o izmenama i dopunama Zakona o plovidbi i lukama na unutrašnjim plovnim vodama Republike Srbije*“, Službeni glasnik RS, broj 73/10, 12.10.2010., i 121/12, 24.12.2012.
152. Zhao, Z., Zhang, Y., Liao, H. (2008) „*Design of ensemble neural network using the Akaike information criterion*“, Engineering Application of Artificial Intelligence 21(8), 1182-1188.
153. Zhang, G., Eddy Patuwo, B., Michael, Y., Hu (1998) „*Forecasting with artificial neural networks: The state of the art*“, International Journal of Forecasting, 14, str: 35–62.
154. Zheng, J. (2009) „*Predicting software reliability with neural network ensembles*“, Expert Systems with Applications 36(2), 2116–2122.
155. Zhu, C., Byrd, R. H., Nocedal, J. (1997) „*Algorithm 778: L-BFGS-B, FORTRAN routines for large scale bound constrained optimization*“, ACM Transactions on Mathematical Software, 23(4), 550 – 560.
156. Zvonkov, V.V. (1956) „*Sudovie tjagovie rasčeti*“, izdanje: Rečnoi transport, Moskva, str: 324.

Biografija autora

Aleksandar Radonjić rođen je u Beogradu 11. oktobra 1975. godine, gde je završio osnovnu školu i XII Beogradsku gimnaziju. Na Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu upisao se 1995. godine i diplomirao 2002. godine na Odseku za vodni saobraćaj i transport. Prosečna ocena tokom studija bila je 8,68 (8 i 68/100). Tokom studiranja bio je na stručnoj praksi na ruskom brodu-jedrenjaku „Sedov“ gde je u funkciji studenta-kadeta proveo tri meseca usavršavajući tehnike navigacije i plovidbe na moru.

Od oktobra 2003. godine angažovan je na Odseku za vodni saobraćaj i transport kao asistent-pripravnik. Poslediplomske studije na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisao je školske 2003/2004 godine. Takom 2005. godine proveo je 7 dana na stručnom usavršavanju u Japanu na Pomorskom fakultetu u Tokiju. Magistarsku tezu pod nazivom „Istraživanje eksperimentalnih metoda za određivanje plovidbenih osobina rečnih brodova“ odbranio je 21.12.2007. godine pod mentorstvom prof. dr Vladete Čolića, dipl. inž. saobraćaja.

Od 01.05.2008. godine kandidat je angažovan u zvanju asistenta na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Stručni ispit iz oblasti saobraćaja položio je 2008. godine pred ispitnom komisijom u Savezu inženjera i tehničara Srbije. U toku dosadašnjeg rada kandidat je učestvovao kao autor i koautor u 30 naučno-istraživačkih radova u domaćim časopisima, zbornicima radova, kao i na međunarodnim i domaćim konferencijama i tehnološkim projektima. Jedan je od autora dva osnovna i dva pomoćna udžbenika i jedne monografije u izdanju Univerziteta u Beogradu, Saobraćajnog fakulteta.

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisani: Aleksandar Radonjić

Broj indeksa: / _____

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

PRILOG ISTRAŽIVANJU ANALITIČKIH METODA ZA PRORAČUN TEHNIČKO-
EKSPLOATACIONIH POKAZATELJA BRODOVA DUNAVSKE PLOVNE MREŽE U
CILJU POBOLJŠANJA PLOVIDBE

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da u rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 24.6.2014.

Pagonjeh A.

Prilog 2.

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Aleksandar Radonjić

Broj indeksa /

Studijski program /

Naslov rada Prilog istraživanju analitičkih metoda za proračun tehničko-eksploatacionih pokazatelja brodova dunavske plovne mreže u cilju poboljšanja plovidbe

Mentor prof. Dr Katarina Vukadinović

Potpisani Aleksandar Radonjić

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 24.6.2014.

Pagonjeh A.

Prilog 3.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

PRILOG ISTRAŽIVANJU ANALITIČKIH METODA ZA PRORAČUN TEHNIČKO-
EKSPLOATAACIONIH POKAZATELJA BRODOVA DUNAVSKE PLOVNE MREŽE U
CILJU POBOLJŠANJA PLOVIDBE

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

U Beogradu, 24.6.2014.

Potpis doktoranda