Model određivanja širine ograničenih plovnih putova

Barić, Mate

Doctoral thesis / Disertacija

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:248586

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository

Image not found or type unknown

DIGITALNA KNJIŽNICA

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

Mate Barić

MODEL ODREĐIVANJA ŠIRINE OGRANIČENIH PLOVNIH PUTOVA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Rijeka, 2017.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

Mate Barić

MODEL ODREĐIVANJA ŠIRINE OGRANIČENIH PLOVNIH PUTOVA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: dr. sc. Robert Mohović
Komentor: dr. sc. Đani Mohović

Rijeka, 2017.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF MARITIME STUDIES

Mate Barić

MODEL FOR DETERMINING THE WIDTH OF RESTRICTED FAIRWAYS

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2017

Mentor rada: dr. sc. Robert Mohović
Komentor rada: dr. sc. Đani Mohović

Doktorska disertacija obranjena je 28.11.2017 u Rijeci na Pomorskom fakultetu, Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije u sastavu:

1. izv. prof. dr. sc. Renato Ivče, predsjednik
2. red. prof. dr. sc. Robert Mohović, mentor i član
3. izv. prof. dr. sc. Đani Mohović, komentor i član
4. red. prof. dr. sc. Roko Dejhalla, član

SAŽETAK

Ovom doktorskom disertacijom sustavno su sagledane i analizirane metode i međunarodne preporuke određivanja dimenzija ograničenih plovnih putova. Istaknuti su utjecajni čimbenici koji djeluju na sile međudjelovanja broda i obale te je izvršena njihova analiza. Temeljem ovih spoznaja definiran je model dodatne širine plovnog puta kojeg treba uzeti u obzir zbog utjecaja sile međudjelovanja broda i obale.

Utjecaj sile međudjelovanja na brod u plovidbi analiziran je uz pomoć podataka dobivenih navigacijskim simulatorom. Radi sagledavanja ukupne slike, analizirani su plovni putovi različitih pokosa, te su definirani različiti uvjeti plovidbe, ali bez djelovanja ostalih vanjskih sila kako bi se izolirao utjecaj samo ovoga fenomena. Uvjeti plovidbe se raščlanjuju po odnosu dubine i gaza broda, udaljenosti broda od ruba plovnog puta te brzini plovidbe. Ovim modelom je kod definiranja dimenzija plovnog puta, novog ili postojećeg, s aspekta sigurnosti plovidbe moguće bez upotrebe simulacija plovidbe broda dobiti dodatnu širinu plovnog puta zbog sile međudjelovanja broda i obale. Također, moguće je unaprijediti sigurnost plovidbe, te konceptualnu i detaljnu fazu projektiranja dimenzija plovnih putova.

Rezultati i spoznaje dosegnute u radu omogućuju točnije definiranje dimenzija plovnog puta, te unaprjeđenje organizacije plovidbe i planiranje kapaciteta na plovnom putu.

Ključne riječi: kriteriji određivanja dimenzija plovnog puta, definiranje dubine i širine plovnog puta, dodatna širina plovnog puta uslijed međudjelovanja broda i obale.

SUMMARY

This doctoral dissertation systematically analyses methods and international recommendations for determining dimensions of restricted fairways, points out most important factors of ship-bank interaction forces and analyses ship-bank interaction forces. Based on such conceptions model for determining additional width due to interaction forces was developed.

Influence of ship bank interaction forces on ship is analysed using data from navigational simulator. In order to properly asses' ship-bank interaction forces, fairways with different slopes and different navigation conditions, with no external forces, were analysed. Navigation conditions were divided with different depth draught ratio, distance of the vessel from bank and speed of the vessel. Using this model, it is possible to determine additional fairway width due to ship-bank interaction, new or existing, in terms of safety of navigation without using traffic simulations. Also, using this model it is possible to upgrade safety of navigation and concept and detail phase of fairway dimensioning process.

The results and findings archived in this dissertation increase accuracy of process of determining fairway dimensions and upgrade fairway organisation and capacity.

Key words: criteria for defining fairway dimensions, defining fairway depth and width, fairway additional width due to interaction forces.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
1.1. Obrazloženje i definicija problema 1
1.2. Ciljevi istraživanja i hipoteza 2
1.3. Dosadašnja istraživanja 3
1.4. Prikaz metoda istraživanja 6
1.5. Struktura rada 7
2. METODOLOGIJA ODREĐIVANJA DIMENZIJA OGRANIČENIH PODRUČJA PLOVIDBE I MANEVRIRANJA 9
2.1. Vrste i obilježja plovnih putova i područja manevriranja 9
2.2. Kriteriji za definiranje dimenzija plovnih putova i područja manevriranja 10
2.2.1. Širina plovnog puta 10
2.2.2. Sidrišta 19
2.2.3. Područja ukrcaja/iskrcaja peljara 22
2.2.4. Područja za zaustavljanje brodova 23
2.2.5. Područja za okretanje broda 24
2.2.6. Udaljenost plovnog puta od privezanih brodova 25
2.2.7. Mjesto priveza brodova 27
2.2.8. Ljudski faktor 30
2.3. Postupak određivanja dimenzija plovnih putova i područja manevriranja – konceptualni i detaljni pristup 32
2.3.1. Konceptualna metoda 32
2.3.2. Detaljna metoda 33
2.4. Procjena rizika 34
2.4.1. Pomorske nezgode 35
2.4.2. Metode procjene rizika 36
2.4.3. Utjecaj sila međudjelovanja na određivanje potrebne širine plovnog puta 40
2.4.4. Utjecaj ruba plovnog puta 43
2.4.5. Dodatni zagažaj broda uzrokovan međudjelovanjem s dnom 44
3. ANALIZA DUBINE PLOVNOG PUTA 48
3.1. Definiranje referentne razine vode 49
3.2. Statički gaz broda 50
3.3. Dinamička promjena gaza broda 51
3.3.1. Dodatni zagažaj broda 51
3.3.2. Promjena gaza broda zbog djelovanja centrifugalne sile pri zakretanju broda 54
3.3.3. Promjena gaza zbog utjecaja valova 57
3.3.4. Dodatan uron zbog djelovanja sile vjetra 64
3.3.5. Neto preostala dubina ispod kobilice broda 67

3.3.6. Manevarska margina 67
3.4. Određivanje dubine plovnog puta korištenjem metode vjerojatnosti 67
3.5. Promjene u razini dna 72
4. ANALIZA ŠIRINE PLOVNOG PUTA 73
4.1. Širina jednosmjernog plovnog puta 73
4.1.1. Širina jednosmjernog plovnog puta prema PIANC-u 73
4.1.2. Širina jednosmjernog plovnog puta prema ROM-u 75
4.1.3. Širina jednosmjernog plovnog puta prema MLIT-u 81
4.2. Dvosmjerna plovidba 87
4.2.1. Širina dvosmjernog plovnog puta prema PIANC-u 87
4.2.2. Širina dvosmjernog plovnog puta prema ROM-u 87
4.2.3. Širina dvosmjernog plovnog puta prema MLIT-u 89
4.3. Dodatna širina zavojitih dijelova plovnog puta 89
4.4. Analiza preporuka za određivanje potrebne širine plovnog puta 92
5. MODEL ODREĐIVANJA POTREBNE ŠIRINE PLOVNOG PUTA 93
5.1. Priprema modela za izračun potrebne širine plovnog puta 93
5.2. Analiza kormilarenja broda 96
5.3. Analiza trajektorije broda uslijed utjecaja sile međudjelovanja 100
5.4. Analiza preostale dubine ispod kobilice 103
5.5. Razvoj modela određivanja dodatne širine plovnog puta 105
5.5.1. Analiza modela za brodove punije forme 107
5.5.2. Analiza modela brodova finije forme 111
5.6. Ocjena valjanosti modela određivanja potrebne širine plovnog puta 115
5.7. Usporedba modela s postojećim metodama određivanja potrebne širine plovnog puta 122
6. ZAKLJUČAK 130
LITERATURA 132
POPIS SLIKA 137
POPIS TABLICA 138
POPIS GRAFIKONA 140

Popis simbola

a – faktor dodatne širine u zavojitom dijelu plovnog puta uslijed zanosa koji ovisi o tipu broda
A_{m0} – značajna amplituda vertikalnog gibanja broda na valovima za sve kritične točke, m
A_M – površina glavnog rebra uronjenog dijela broda, m^2
A_p – amplituda vertikalnog kretanja broda, m
$A_{V,F}$ – lateralna površina broda iznad vodene lijine na koju djeluje vjetar, m^2
$A_{V,L}$ – bočna površina nadvodnog dijela broda, m^2
A_{VL} – površina vodene linije broda, m^2
b – širina plovnog puta, m
b_b – dodatna širina uslijed pogreške koju mogu uzrokovati oznake plovnog puta, m
b_d – dodatna širina uslijed zaošijanja i zanosa uzrokovano vanjskim silama, m
b_{dc} – zanošenje broda koje nastaje uslijed promjene kursa, m
b_e – dodatna širina uslijed pogreške određivanja pozicije broda, m
b_r – dodatna širina uslijed vremena reakcije, m
b_{rc} – dodatna širina zbog vremena reakcije broda, m
b_s – udaljenost između dviju plovidbenih traka, m
c – brzina napredovanja valova, m/s
C_1 – koeficijent najveće visine vala
C_2 – koeficijent koji ubraja varijacije u vertikalnom kretanju broda uzrokovanom valovima
C_3 – koeficijent stanja nakrcanosti broda
C_4 – koeficijent brzine broda kao funkcije fr_h
C_5 – koeficijent varijacije odnosa dubine i gaza broda
C_6 – koeficijent za smjer valova u odnosu na uzdužnicu broda
C_ϕ – koeficijent kuta otklona kormila broda
C_B – koeficijent punoće deplasmana
C_F – koeficijent oblika trupa broda
C_{FS} – faktor sigurnosti
Ck – korekcijski faktor *iCORELS* izraza za izračun dodatnog zagažaja
C_{kor} – korekcijski faktor brzine broda
C_n – konstanta koja ovisi o stanju nakrcanosti broda
Cr – koeficijent koji se određuje na temelju oblika trupa broda i odnosa dubine vode i gaza broda (h/t)
Cs – konstanta za izračun dodatnog zagažaja po izrazu *Huuska/Guliev*
Cv – koeficijent koji ovisi o obliku trupa, omjeru dubine vode i gaza broda (h/t) te kutu djelovanja vjera u odnosu na uzdužnicu broda (αvr)
C_{val} – koeficijent koji se određuje na temelju oblika trupa broda, odnosu dubine vode i gaza broda (h/t) i kuta djelovanja valova u odnosu na uzdužnicu broda α_{val}
C_{vj} – koeficijent otpora zraka tijela izloženog vjetru
C_{Yn} – regresijski koeficijent za proračun koeficijenta otpora zraka tijela izloženog vjetru
C_Z *i* C_θ – koeficijenti na temelju karakteristika trupa broda za izračun dodatnog zagažaja po *Tucku*
d – udaljenost boka broda od ruba plovnog puta, m
D – deplasman broda, t
D_H – hidrodinamička masa ili pridružena masa vode, t
$d_{plutača}$ – horizontalna udaljenost između dviju plutača na suprotnim stranama plovnog puta, m
E_{max} – najveći prihvatljivi rizik
F_k – koeficijent zaobljenosti trupa broda na glavnom rebru,

Fr_h – *Froudeov* broj dubine

Fr – *Froudeov* broj

F_{vj} – sila vjetra, kN

F_{vjL} – lateralna sila vjetra, kN

g – ubrzanje sile teže (9,80665), m/s^2

G – visina nadvođa broda, m

h – dubina vode, m

$H_{R\zeta}$ – kvadrat prijenosne funkcije (RAO)

Hs – značajna visina valova, m

hs – visina težišta tereta iznad glavne palube, m

h_{vj} – visina točke težišta nadvodne površine na koju djeluje vjetar od kobilice broda, m

I_T – moment tromosti površine vodene linije, m^4

k – broj regresijskih koeficijenta

K – udaljenost točke okreta od krme, m

k_h – hidrodinamička tromost, kN/m

K_1 – korekcijski faktor koji predstavlja omjer dubine vode i visine uronjenog bočnog ruba plovnog puta.

Kg_{vj} – visina težišta površine na koju djeluje vjetar iznad kobilice, m

K_S – korekcijski faktor na temelju tip ograničenog plovnog puta

Ks_p – bezdimenzionalni faktor tipa plovnog puta

Kv – omjer bočne nadvodne površine broda (a_{lv}) i bočne podvodne površine broda (a_{lc})

$K_{\Delta T}$ – korekciji faktor za kritičnu brzinu broda

L_F – horizontalna udaljenost osmatrača od plutače, m

l_{vj} – krak sile vjetra, m

$l_R = \overline{KG} - \frac{T}{2}$ – poluga nagibnog momenta uslijed okreta broda, m

M_{Vj} – nagibni moment sile vjetra, Nm

n – opseg uzorka

N_p – ukupan broj prolaza broda

N_{pr} – prosječan broj prolaza na godinu

N_y – broj prolaza broda godišnje

N_{ye} – broj godina eksploatacije plovnog puta.

$N_0 = t / T_z$ – broj vertikalnih oscilacija broda ili broj susreta s valovima tijekom prolaska plovnim putem

p – specifični pritisak vjetra, N/m^2

P_p – vjerojatnost prekoračenja po prolazu

P_{UKC} – vjerojatnost da će bruto UKC biti premašen tijekom definiranog broja prolaza u uobičajenim uvjetima

p_v – poprečni presjek uronjenog dijela trupa broda na glavnom rebru, m^2

P_z – vjerojatnost prekoračenja

R^2 – koeficijent determinacije

R_a – amplituda odziva

R_c – radijus zavojitog dijela plovnog puta, m

R_C – radijus ustaljenog kruga okreta broda, m

R_H – hidraulički radijus (omjer poprečne podvodne površine plovnog puta i poprečne podvodne površine broda)

rh_{sd} – dodatna sigurnosna margina između broda i obale, m

rh_{sm} – dodatna sigurnosna udaljenost kako ne bi došlo do međudjelovanja broda i obale, m
S – odnos poprečnog presjeka plovnog puta i broda na glavnom rebru
s_1 – bezdimenzionalni faktor tip plovnog puta
t – vrijeme korištenja dijela sustava plovnog puta, min
T – gaz broda, m
T_E – period valova, s
T_H – prirodni period broda prilikom poniranja, s
T_R – prirodni period valjanja broda, s
U_C – brzina broda kod ustaljenog radijusa kruga okreta broda, čv
$V_{čv}$ – brzina broda, čv
$V_{m/s}$ – brzina broda, m/s
Vh – brzina broda u vodi dubine *h*, m/s
V_{strj} – brzina struje, m/s
V_{vj} – brzina vjetra, m/s
$V\infty$ – brzina broda u dubokoj vodi, m/s
W – ukupna širina ravnog dijela plovnog puta, m
W_{BM} – osnovna širina plovnog puta, m
$W_{BR(BG)}$ – dodatna udaljenost zbog sila međudjelovanja između broda i obale (lijevo i desno), m
W_c – udaljenost mimoilaženja između brodova, m
W_{dz} – dodatna širina uslijed detekcije zanosa, m
W_i – dodatna širina plovnog puta uslijed utjecaja vanjskih sila, m
W_{IF} – dodatna širina plovnog puta uslijed sila međudjelovanja, m
W_p – dodatna širina mimoilaženja brodova, m
W_{strj} – dodatna širina uslijed djelovanja sile struja, m
W_{vj} – dodatna širina uslijed djelovanja sile vjetra, m
W_z – dodatna širi uslijed zaošijavanja, m
$x_{j,k,l,m,n}$ – nezavisne ulazne varijable konkretnoga modela
X_L – udaljenost od okomice do težišta lateralna površine broda $a_{v,l,}$, m
y – poprečni pomak od prvotne rute broda, m
Y_L – broj godina iskorištavanja plovnog puta
Z – vertikalni pomak boka broda na valovima, m
Z/a_w – odnos pomaka pramca i amplitude vala
Z_{OV} – uron boka broda zbog djelovanja sile vjetra, m
α_{MAX} – kut koji zatvara položaj osmatrača i sredina plovnog puta.
α_{strj} – kut između smjera djelovanja struje i uzdužnice broda, °
α_{vj} – kut puhanja vjetra u odnosu na okomicu, °
β – kut zanosa broda, °
γ – pogreška u mjerenju horizontalnog kuta, °
δ – kut otklona kormila da bi se kompenzirao utjecaj zanosa, °
δ_R – kut otklona kormila broda, rad
ΔT – dodatno povećanje gaza zbog nagiba broda, m
ΔV – gubitak brzine zbog utjecaja plitke vode, m/s
ΔW_{DA} – dodatna širina u zavojitom dijelu plovnog puta uslijed zanosa, m
θ – kut koji zatvara položaj osmatrača i plutače s obje strane plovnog puta, °
λ – duljina valova, m
λ_B – frekvencija dolaska brodova

ρ – gustoća vode, t/m^3
ρa – gustoća zraka, kg/m^3
σ_b – standardna devijacija nepravilnosti morskog dna
σ_c – kombinirana standardna devijacija
σ_s – standardna devijacija kretanja broda
σ_w – standardna devijacija razine vode
φ – nagib broda, °
ϕ_R – najveći kut nagiba broda zbog centrifugalne sile kod okretanja broda, °
Ψ – smjer valova u odnosu na simetralu broda, °
∇ – volumen uronjenog dijela trupa broda, m^3

Popis kratica

$\overline{BM}_0$ – metacentarski radijus, m
DGPS – Differential Global Positioning System, Diferencijski globalni satelitski sustav određivanja položaja broda
DWA – dodatan uron broda u slankastoj vodi (engl. *Dock Water Allowance*), cm
ECDIS – Electronic Chart and Display Information System, Informacijski sustav i prikaz elektroničkih karata.
FWA – dodatan uron broda u slatkoj vodi (engl. *Fresh Water Allowance*), cm
GPS – Global Positioning System, Globalni satelitski sustav određivanja položaja broda
$\overline{KG}$ – visina težišta broda iznad kobilice, m
Loa – duljina broda preko svega, m
Lpp – duljina broda između okomica (pependikulara), m
$\overline{M_0G}$ – početna poprečna metacentarska visina broda, m
RADAR – Radio Detection and Ranging
RAO – operator amplitude odziva (engl. *Response Amplitude Operators)*
TPC – zagažaj broda, t/cm

1. UVOD

U ovom je poglavlju obrazložena tema disertacije uz definiciju problema istraživanja, ciljeva istraživanja i hipoteze. Ukratko su prikazana dosadašnja istraživanja. Navedene su i opisane korištene znanstvene metode, te je prikazana i opisana struktura rada po cjelinama.

1.1. Obrazloženje i definicija problema

Predmetu definiranja dimenzija plovnog puta, s aspekta sigurnosti plovidbe, može se pristupiti konceptualno ili detaljno. Konceptualni pristup je brz i jednostavan, te ne zahtijeva primjenu posebnih alata. Međutim, nedostatak konceptualnog pristupa je taj što se za izračun pojedinih dimenzija plovnog puta koriste matematički izrazi s unaprijed određenim članovima izraza koji u konačnici za određene tipove brodova i plovnih putova daju predimenzionirane vrijednosti.

Detaljni pristup definiranja dimenzija plovnog puta je konkretniji, u smislu da je potrebno imati više ulaznih podataka, a rezultat pruža detaljno objašnjene i definirane granice plovnog puta. Nedostatak detaljnog pristupa je taj što se geometrija trupa broda s vremenom mijenja u odnosu na brodove koji su korišteni u istraživanju za potrebe dobivanja matematičkih izraza. Nedostatak teorije vjerojatnosti kod detaljnog pristupa je taj što se vjerojatnost prekoračenja pojedinih graničnih dimenzija plovnog puta određuje na temelju statističkih podataka, čija točnost ovisi o kvaliteti baze podataka.

Jedan od načina detaljnog definiranja širine plovnih putova je korištenje navigacijskih simulatora. Navigacijski simulatori koriste matematičke i hidrodinamičke modele za definiranje i opisivanje kretanja broda u prirodi i njegovo međudjelovanje s okolinom i drugim plovnim objektima. Nedostatak ove metode je dug period pripreme i izvođenja simulacija, analiza rezultata te točnost matematičkih i hidrodinamičkih modela koje simulator koristi. U pripremu ulaze: definiranje referentnih modela brodova, definiranje profila osoba koje će sudjelovati u simulaciji i definiranja scenarija za pojedine simulacije. Nakon pripremne faze simuliraju se pripremljeni scenariji. Svaki scenarij se ponavlja više puta kako bi dobili više mogućih putanja kretanja broda, a po završetku simulacija sve sakupljene podatke potrebno je analizirati kvantitativno i kvalitativno.

Pri plovidbi broda u ograničenom plovnom putu dolazi do pojave sila međudjelovanja broda i ruba plovnog puta. Veličina utjecaja sila međudjelovanja broda i obale ovisi o brzini broda, udaljenosti broda od obale, dubini ispod kobilice broda, formi i dimenzijama broda te obilježjima plovnog puta. Izradom modela, koji je definiran na temelju detaljnog pristupa koristeći navigacijski simulator, uzeti su u obzir svi navedene čimbenici koji utječu na veličinu sile međudjelovanja između broda i obale, stoga je moguće doprinijeti točnosti detaljne faze definiranja širine plovnih putova. S tim pristupom je omogućeno detaljno definiranje dodatne širine plovnog puta, kao i ukupne širine, bez upotrebe posebnih alata.

Znanstveni problem doktorske disertacije je analiza utjecaja sile međudjelovanja na poprečni pomak broda pri plovidbi u ograničenim plovnim putovima s različitom konfiguracijom ruba plovnog puta, te posljedično na određivanje dodatne širine plovnog puta. Predmet istraživanja su čimbenici koji utječu na veličinu sila međudjelovanja između broda i ruba plovnog puta, te njihov utjecaj na gibanje broda, u ograničenim plovnim putovima i kanalima. Objekti istraživanja su tipovi ograničenih plovnih putova (neograničeni, ograničeni

i kanali), referentna razina vode, promjene razine vode (morske mijene, atmosferski utjecaji, meteorološki i oceanološki utjecaji), statički gaz broda (stanje nakrcanosti broda, bočni i uzdužni nagib, gustoća vode), dinamička promjena gaza broda (promjena gaza broda u plovidbi koju mogu uzrokovati valovi, dodatan uron broda i promjena trima broda uslijed interakcije s morskim dnom, te bočni nagib zbog sile vjetra i centrifugalne sile pri okretanju broda), moguće promjene u razini dna (zamuljivanje između dvaju jaružanja, pogreška u jaružanju i pogreška u mjerenju dubine), sile međudjelovanja (broda i ruba plovnog puta).

1.2. Ciljevi istraživanja i hipoteza

Jedan od značajnih čimbenika koji utječe na sigurnost plovidbe su horizontalne i vertikalne dimenzije ograničenih plovnih putova, posebno njihova dubina i širina. One se mogu definirati sa stanovišta projektiranja novog plovnog puta ili sa stanovišta sigurnosti plovidbe u eksploataciji plovnog puta.

Sigurna dubina pri projektiranju novog plovnog puta definira se kao vertikalna udaljenost od referentne razine vode do dna uzimajući u obzir statički gaz broda, dinamičku promjenu gaza broda i moguće promjene u razini dna. Statički gaz broda predstavlja najuronjeniju točku broda, koja se određuje na temelju stanja nakrcanosti broda, gustoće vode, te bočnog i uzdužnog nagiba. Dinamička promjena gaza broda može se promatrati kroz dva rotacijska gibanja broda (ljuljanje i posrtanje) te jedno translacijsko gibanje broda (poniranje). Opisana gibanja mogu uzrokovati valovi, međudjelovanje s dnom (dodatan zagažaj i promjena trima broda), sila vjetra i centrifugalna sila uslijed zakretanja broda. Moguće promjene u razini dna mogu nastati uslijed zamuljivanja između dvaju jaružanja, pogreške u jaružanju i pogreške u mjerenju dubine.

Sigurna dubina u eksploataciji definira se na sličan način kao i kod projektiranja novog plovnog puta. Razlika je u tome što se pri definiranju razine vode trebaju uzeti u obzir moguće promjene uzrokovane morskim mijenama, atmosferskim tlakom te drugim nepovoljnim meteorološkim i oceanološkim čimbenicima. U ovom slučaju za referentni vodeni raz uzima se dubina karte, dok moguće promjene u razini dna nisu uzete u obzir.

Ograničeni plovni putovi dijele se na plovne putove ograničene dubine i neograničene širine te plovne putove ograničene dubine i širine. Prilikom definiranja potrebne širine plovnog puta neophodno je uzeti u obzir i sigurnu dubinu koja utječe na potrebnu širinu plovnog puta. S aspekta projektiranja, za potrebe sigurnosti plovidbe, širinu plovnog puta je potrebno definirati na temelju dimenzija i manevarskih obilježja broda te obilježja plovnog puta. Kod postojećih plovnih putova poznate širine, sa stanovišta sigurnosti plovidbe, potrebno je definirati najveće dimenzije brodova koji taj plovni put mogu koristiti uz zadovoljavajući stupanj maritimne sigurnosti. Pri definiranju širine plovnog puta potrebno je uvažiti sljedeće čimbenike:

- organizaciju prometa unutar plovnog puta
- obilježja brodova, kao što su njihove dimenzije i manevarska obilježja i
- obilježja plovnog puta.

Uzimajući u obzir sve čimbenike, za sve dijelove plovnog puta potrebno je definirati širine plovidbenih traka, udaljenost plovidbenih traka od ruba plovnog puta, udaljenost između dviju plovidbenih traka, kao i dodatnu širinu plovidbene trake na zakrivljenim dijelovima plovnog puta.

Za određivanje dubine i širine plovnog puta može se koristiti konceptualni ili detaljni pristup. Konceptualni pristup je najčešće deterministički način definiranja dimenzija plovnog puta, što podrazumijeva unaprijed određene pojedine vrijednosti unutar korištenih izraza. Prednost ovog načina definiranja plovnih putova je jednostavnost korištenja. Kod detaljnog pristupa za izračun pojedinih dimenzija plovnog puta mogu se koristi matematički izrazi proizašli iz dosadašnjih istraživanja gibanja broda u ograničenjima plovnim putovima ili koristiti teoriju vjerojatnosti za izračun prekoračenja pojedinih mogućih pomaka broda.

Istraživanjem posljedica sila međudjelovanja na gibanje broda koje se javljaju pri plovidbi brodom u ograničenom plovnom području s različitim konfiguracijama pokosa, moguće je odrediti njihovo djelovanje na gibanje broda i na temelju toga definirati dodatnu širinu plovnog puta.

Imajući u vidu navedeno razmatranje, predložena je znanstvena hipoteza:

Širinu ograničenog plovnog puta moguće je točnije definirati određivanjem najvećeg poprečnog pomaka broda koji nastaje zbog utjecaja sila međudjelovanja između broda i ruba plovnog puta.

1.3. Dosadašnja istraživanja

Dosad su provedena mnogobrojna istraživanja pojedinih čimbenika koji utječu na dimenzije plovnog puta. Na temelju tih istraživanja dane su preporuke za određivanje dimenzija plovnog puta. Navedena istraživanja i preporuke analizirane su u daljnjem tekstu.

Velik broj istaknutih istraživanja i preporuka za određivanje dimenzija plovnih putova sažet je od strane „Međunarodne udruge za infrastrukturu vodenih putova“ (engl. *Permanent International Association of Navigation Congresses* – PIANC) u publikaciji Preporuke za projektiranje pristupnih plovnih putova[1]. Unutar tog dokumenta sažeta su pojedina istraživanja određenih faktora plovnog puta, kao i nacionalne preporuke za njihovo projektiranje. Istaknute nacionalne preporuke za određivanje dimenzija plovnih putova objavljene su od strane španjolske organizacije za inženjerska istraživanja CEDEX pod nazivom Preporuke za maritimne radove – ROM 3.1[2] te Tehnički standardi i preporuke za luke i plovne putove japanskog Ministarstva transporta, infrastrukture i turizma[3]. Sva navedena istraživanja predlažu dodatnu širinu ograničenog plovnog puta, zbog utjecaja sile međudjelovanja, na temelju unaprijed određenih vrijednosti.

Osim predloženih analitičkih izraza, koriste se i probabilističke metoda definiranja pojedinih dimenzija plovnog puta. Probabilističko određivanje dimenzija plovnog puta definira vjerojatnost dodira broda s dnom, tj. izračunava najveće pretpostavljeno vertikalno kretanje broda. Da bi se moglo pristupiti ovome načinu određivanja dimenzija plovnog puta, potrebno je imati definirane podatke o gazu broda, dodatnom uronu broda uslijed međudjelovanja s dnom, vertikalnom kretanju broda na valovima, morskim mijenama, tipu morskog dna, gustoći

[1]PIANC (2014): *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, Report No. 121-2014.

[2]ROM (Puerto Del Estado) (2007): *Recommendations for Designing the Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Harbour Basins*. ROM 3.1-99. Spain: CEDEX.

[3]Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), Japan (2009): *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, OCDI.

mora, podatke o jaružanju,[4] te vjerojatnost dodira s dnom. Vjerojatnosti dodira s dnom za brodove velikog gaza u prilaznim plovnim putovima definirani su od strane Van de Kaaa, PIANC-a, Savenijea, Danda i Lyona.[5, 6, 7] Također je potrebno definirati i rok korištenja plovnog puta. Na primjer, za luku Rotterdam definiran je rok korištenja plovnog puta od 25 godina i vjerojatnost dodira broda s dnom od 10%.[8]

Kod plovidbe broda u ograničenim područjima dolazi do značajnijeg povećanja otpora iz razloga što kod plovnih putova ograničenih dubinom dolazi do povećanja brzine strujanja vode ispod kobilice broda. To dovodi do pada tlaka što uzrokuje dodatan uron, trim i povećani otpor. Kod plovnih putova ograničenih dubinom i širinom opisani efekti postaju izraženiji.[9]

U opisanom slučaju dolazi do asimetričnog strujanja oko trupa broda, što uzrokuje razliku u tlakovima između lijeve i desne strane broda. Sukladno jednadžbi očuvanja mase strujanja, na maloj udaljenosti ispred i iza broda strujnice vode se šire, dok se uz bokove broda međusobno približavaju. Prema Bernoullijevoj jednadžbi formiraju se područja povišenog i sniženog tlaka oko trupa broda.[10] Općenito, u područjima po boku broda brzina strujanja se povećava, uzrokujući područja sniženog tlaka.[11]

Istraživanjem otpora, dodatnog urona broda i promjene trima broda uslijed međudjelovanja s dnom (engl. *squat*) identificirani su bitni čimbenici međudjelovanja, te su predloženi izrazi za izračun dodatnog urona broda. Najistaknutije izraze za izračun dodatnog urona uslijed interakcije s dnom razvili su:

- Tuck[12, 13, 14]
- Huuska/Guliev[15, 16]

[4]Briggs, Michael J., Leon E. Borgman, and Eivind Bratteland (2003): *Probability assessment for deep-draft navigation channel design*. Coastal engineering 48. str. 29-50.

[5]Van De Kaa, E.J. (1984): *Safety Criteria for Channel Depth Design*. Proc. Third Meeting of the U.S./Dutch M.O.U. on Dredging and Dredged Material Disposal, Working Group III: Navigation Channels, Charleston.

[6]Savenije, R. (1996): *Probabilistic Admittance Policy Deep Draught Vessels*. PIANC Bulletin 91.

[7]Dand, I.W., Lyon, P.R. (1993): *The Element of Risk in Approach Channel Design*. Int. Conf. on Maritime Technology: Challenges in Safety and Environmental Protection, Singapore.

[8]Savenije, R. (1996): *Probabilistic Admittance Policy Deep Draught Vessels*. PIANC Bulletin 91.

[9]Radan, D. (2004). *Uvod u hidrodinamiku broda*. Sveučilište u Dubrovniku.

[10]Erneux, T. (2009), *Applied Delay Differential Equations: Surveys and Tutorials in the Applied Mathematical Sciences*, Springer, New York.

[11]Vučinić, A. (1997), *Hidrodinamika plovnih objekata (Otpor i propulzija broda)*, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka.

[12]Tuck, E.O., Taylor, P.J. (1970): *Shallow Water Problems in Ship Hydrodynamics*, Proceedings 8th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena.

[13]Tuck. E.O. (1966): *Shallow Water Flows Past Slender Bodies*. J. Fluid Mech., 26, str. 81-95.

[14]Stocks, D.T., et al. (2002): *Maximization of the ship draft in the St. Lawrence Seaway Volume I; Squat Study*. Prepared for Transportation Development Centre, Transport Canada, June.

[15]Hooft, J. P. 1974. *The Behavior of a ship in head waves at restricted water depth.* International Shipbuilding Progress. 244(21), str.367.

[16]Guliev, U.M. (1971): *On Squat Calculations for Vessels Going in Shallow Water and Trought Channels*. PIANC Bulletin 1(7), str.17-20.

- ICORELS[17]
- Barrass[18, 19, 20, 21, 22, 23]
- Eryuzlu[24, 25]
- Romisch[26]
- Yoshimura.[27]

Kod plovidbe u području ograničenom dubinom i širinom, uz međudjelovanje s dnom može doći i do međudjelovanja broda i ruba plovnog puta. Rezultat toga je ubrzano strujanje ispod i oko trupa broda što uzrokuje pad tlaka i bočnu silu koja djeluje na način da približava brod prema obali, te stvaranja momenta zaošijanja koji zakreće pramac od obale, a krmu prema obali.[28] [29] Većina istraživanja sastoji se od procjene veličine sile međudjelovanja između broda i ruba plovnog puta te rasporeda tlakova oko broda, dok je samo gibanje broda opisano u početnoj fazi djelovanja sile.

Veličinu sile međudjelovanja koja se javlja između broda i ruba plovnog puta može se odrediti *in-situ* mjerenjima na brodovima, na modelima brodova, matematičkim modelima ili koristeći namjenske simulatore. *In-situ* mjerenja jako su rijetka iz financijskih i tehničkih razloga, te su ostali načini mjerenja i proračuna zastupljeniji. Rezultati istraživanja modela

[17]ICORELS (International Commission for the Reception of Large Ships) (1980). *Report of Working Group IV*, PIANC Bulletin No. 35, Supplement.

[18]Barrass, C.B. (1979): *A Unified Approach to Squat Calculations for Ships*. PIANC Bulletin 32, str. 3-10.

[19]Barrass, C.B. (1994a): *Further Discussion on Squat*."Seaways.

[20]Barrass, C.B. (1994b): *Change of Trim as a Ship Squats*, Seaways.

[21]Barrass, C.B. (2002): *Ship Squat – A Guide for Masters*, Private report, www.ship-squat.com.

[22]Barrass, C.B. (2004), *Ship Design and Performance for Masters and Mates*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford.

[23]Barrass, C.B. (2009): *Ship Squat and Interaction*, Whitersby Publishing & Seamanship, Livingston.

[24]Eryuzlu, N. E., and R. Hausser. (1978). *Experimental investigation into some aspects of large vessel navigation in restricted waterways*. Proceedings of the Symposium of Aspects of Navigability of Constraint Waterways Including Harbour Entrances, Vol 2, str. 1-15.

[25]Eryuzlu, N.E., Cao, Y.L., D`agnolo, F. (1994): *Underkeel Requirements for Large Vessels in Shallow Water*. Proceedings 28th International Navigation Congress, PIANC, Paper S II-2, Sevilla, Spain, str. 17-25.

[26]Romisch, K. Fuhrer (1977): *Section I – Inland Navigation*, Subject 3. PIANC Congress, Leningrad, Russia, str. 80.

[27]Yoshimura, Y. (1986): *Mathematical Model for the Manoeuvring Ship Motion in Shallow Water*, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 200.

[28]Dand, I. W. (1981): *On ship-bank interaction*. The Transactions of the Royal Institution of Naval Architects: International Journal of Maritime Engineering.

[29]Lataire, Evert, et al. (2007). *Navigation in confined waters: influence of bank characteristics on ship-bank interaction*. International Conference on Marine Research and Transportation, ICMRT.

brodova,[30, 31, 32] matematičkih modela[33, 34] i simulatora[35, 36] daju vjerodostojne podatke koji potvrđuju ranije opisano ponašanje broda pri plovidbi u blizini ruba plovnog puta.

1.4. Prikaz metoda istraživanja

U znanstvenom istraživanju u odgovarajućim kombinacijama koristile su se sljedeće znanstvene metode: metode analize i sinteze, metode indukcije i dedukcije, metode apstrakcije i konkretizacije, metode generalizacije i specijalizacije, komparativna metoda, metode dokazivanja i opovrgavanja, metoda deskripcije, statističke metode, metoda klasifikacije i metoda kompilacije.

Informacije, materijali, studije i podatci dobiveni korištenjem pisanog materijala i ostalih izvora, obrađeni su primjenom navedenih metoda uz citiranje tuđih opažanja, stavova, zaključaka i spoznaja.

Kao važnu metodu istraživanja treba istaknuti sustavnu analizu pomoću koje se problem istraživanja sagledao sustavnim pristupom, koji prvo sagledava cjelinu kao sustav, a zatim se cjelina analizirala po dijelovima, te matematička metoda koja je omogućila prikazivanje i objašnjenje zakonitosti stvari i pojava u okolini. Jedna od značajnijih korištenih metoda je simuliranje, što omogućuje simuliranje stvarnih dinamičkih sustava te njihovu analizu.

Također, u istraživanju je korištena metoda modeliranja koja omogućuje eksperimentalno istraživanje proračuna i širenje dobivenih rezultata na pojavu međudjelovanja. Konkretna metoda modeliranja koja je korištena je model konkretnog u apstraktnom,[37, 38] što podrazumijeva generalizaciju složenih hidrodinamičkih izraza sila međudjelovanja s ciljem dobivanja gibanja broda. Osnovna funkcija odabrane metode modeliranja je praktične naravi, što bi konkretno značilo da će se model upotrebljavati u rješavanju problema određivanja dimenzija ograničenog plovnog puta s aspekta sigurnosti plovidbe. Metoda modeliranja odabrana je iz razloga što omogućuje pouzdano rješavanje i razrađivanje složene dinamičke teorije međudjelovanja u kontroliranim uvjetima, s ciljem definiranja dimenzija ograničenih

---

[30]Vantorre, M., et al. (2003). *Experimental investigation of ship-bank interaction forces*. In International Conference MARSIM.

[31]Vantorre, M., Verzhbitskaya, E., & Laforce, E. (2002). *Model test based formulations of ship-ship interaction forces*. Ship Technology Research, 49, str. 124-141.

[32]Eloot, K., & Vantorre, M. (2011). *Ship behaviour in shallow and confined water: an overview of hydrodynamic effects through EFD*.

[33]Lo, D. C., et al. (2009). *Application of computational fluid dynamics simulations to the analysis of bank effects in restricted waters*. Journal of Navigation, 62(03), str. 477-491.

[34]Maimun, A., et al. (2013). *A mathematical model on manoeuvrability of a LNG tanker in vicinity of bank in restricted water*. Safety Science, 53, str. 34-44.

[35]Sutulo, S., & Soares, C. G. (2008, January). *Simulation of the hydrodynamic interaction forces in close-proximity manoeuvring*. ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, str. 839-848.

[36]Kobylinski, L. K. (2011). *Capabilities of ship handling simulators to simulate shallow water, bank and canal effects*. TransNav-International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation". 5(2), str. 247-252.

[37]Šešić, B. V. (1988). *Osnove metodologije društvenih nauka*.

[38]Rumbaugh, J., et al. (1991). *Object-oriented modeling and design*. (Vol. 199, No. 1). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-hall.

plovnih putova, primjenu teorije međudjelovanja s ciljem definiranja gibanja broda, te prilagođavanje teorije za primjenu u praksi.

Postupak izrade modela sadrži sljedeće dijelove:

1. postavljanje problema (analiza sile međudjelovanja na gibanje broda pri plovidbi u ograničenim plovnim putovima)
2. priprema baze podataka (simuliranje uvjeta plovidbe u ograničenom plovnom putu)
3. stvaranje modela (izrada modela za određivanje gibanja broda koja uzima u obzir sile međudjelovanja)
4. analiza modela (verifikacija podataka koristeći navigacijski simulator i dosadašnja istraživanja)
5. prijenos spoznaja s modela na praksu (korištenje modela pri definiranju dimenzija plovnih putova).

1.5. Struktura rada

Doktorska disertacija obuhvaća šest poglavlja uključujući uvod i zaključak. Tematika je obrađena sljedećim redoslijedom: definiranje metodologije određivanja dimenzija plovnog puta, određivanje dubine plovnog puta, određivanje širine plovnog puta, definiranje modela za određivanje dodatne širine plovnog puta zbog utjecaja međudjelovanja broda i obale te na kraju zaključak.

Uvod obuhvaća definiciju znanstvenog problema i cilj istraživanja, definiciju hipoteze, prikaz dosadašnjih istraživanja, metode koje su tijekom istraživanja korištene, te strukturu rada.

U drugom poglavlju definirane su vrste i obilježja ograničenih plovnih putova i područja manevriranja te njihove značajke. Opisani su kriteriji za izračun vertikalnih i horizontalnih dimenzija ograničenog plovnog puta i područja manevriranja. Također, opisani su konceptualni i detaljni pristup određivanja dimenzija plovnog puta i područja manevriranja, kao što su širine ulaza u luke, područja za zaustavljanje i okretanje brodova te sidrišta. U ovom je poglavlju opisan način procjene rizika za plovne putove s aspekta sigurnosti plovidbe. Sile međudjelovanja između broda i obale predstavljaju važan element istraživanja, stoga je ovdje analizirano njihovo djelovanje.

Treće poglavlje obuhvaća konceptualni i detaljni pristup određivanja vertikalnih dimenzija plovnih putova. Dubina i širina plovnog puta međusobno su povezane, s obzirom da je za definiranje širine plovnog puta potrebno imati definiranu dubinu plovnog puta. U poglavlju analize dubine, opisani su parametri potrebni za određivanje dubine ograničenog plovnog puta s aspekta sigurnosti plovidbe. Definirani su statički gaz broda i način kako se određuje, te dinamička promjena gaza broda. Opisani su svi važni čimbenici koji utječu na povećanje gaza broda u plovidbi te načini izračuna.

U četvrtom poglavlju, analizirana je širina plovnog puta, opisani su važni čimbenici kod jednosmjerne i dvosmjerne plovidbe. Predočen je i definiran način određivanja dodatne širine plovnog puta zbog utjecaja zanošenja uzrokovanog vjetrom, valovima i morskim strujama. Definiran je i faktor ljudske pogreške koji utječe na dodatnu širinu plovnog puta te balisaža plovnog puta i njezin utjecaj. U ovome dijelu obrađeni su elementi dvosmjerne plovidbe gdje

se pridodaje dodatna širina između dvaju brodova zbog sila interakcije. Na kraju poglavlja opisana je dodatna širina kod zavojitih dijelova plovnog puta.

U petom poglavlju predočeno je glavno istraživanje ove doktorske disertacije. Prikazan je proces prikupljanja podatka koristeći simulacije plovidbe broda u ograničenim plovnim putovima. Prikupljeni podatci su identificirani i teoretski razrađeni. Nakon identifikacije i teoretske razrade podataka, opisan je proces razvoja modela određivanja potrebne širine plovnih putova. Postupak provjere i ispitivanja modela, opisan je u dijelu verifikacije i vrednovanja modela. Cilj vrednovanja je potvrđivanje uspješnosti modela za određivanje potrebne širine ograničenog plovnog puta. Rezultati istraživanja uspoređeni su sa simuliranim vrijednostima međudjelovanja i gibanja broda. Nadalje, obrađeni su i analizirani svi simulirani rezultati, uz prikaz njihove primjene.

U zaključnom poglavlju navedeni su i pojašnjeni rezultati koji predstavljaju rješenje znanstvenog problema. U ovome dijelu navedeni su svi zaključci i znanstvene spoznaje proizišle iz istraživanja. Prikazani su znanstveni doprinosi koji su proizašli iz istraživanja. Mogućnost primjene dobivenih izraza opisana je u obliku prijedloga za daljnja istraživanja te planiranih znanstvenoistraživačkih aktivnosti.

Nakon iznesenog sadržaja doktorske disertacije, popisana je sva korištena literatura, kratice, simboli, slike, grafikoni i tablice.

2. METODOLOGIJA ODREĐIVANJA DIMENZIJA OGRANIČENIH PODRUČJA PLOVIDBE I MANEVRIRANJA

Osnovni cilj i zahtjev koji se u prvom redu mora ispuniti prilikom analize područja plovidbe i manevriranja, bilo postojećih ili novih, je sigurnost plovidbe. Međutim, utvrđene razine sigurnosti često se dovode do krajnjih granica iz raznih razloga poput smanjenja vremena boravka broda u luci, omogućavanje duljeg vremena raspoloživosti luke bez obzira na prevladavajuće meteorološke i oceanološke uvijete te zahtjeva za prihvat većih brodova.

Zbog svega navedenog, razvoj područja plovidbe i manevriranja je stalan i neprekidan proces prilagođavanja razine sigurnosti plovidbe prema zahtjevima koje nameću brodari i luke.

2.1. Vrste i obilježja plovnih putova i područja manevriranja

Prilazni plovni putovi, područja za manevriranje, lučki bazeni, sidrišta i područja za privez brodova su najčešće dijelovi lučkih područja. S obzirom na smještaj luke u odnosu na glavne plovidbene pravce i konfiguraciju obale, navedena područja mogu više ili manje utjecati na razinu sigurnosti plovidbe.

Sa stajališta manevriranja brodom navedena područja se mogu podijeliti u tri osnovne grupe:

- područja za plovidbu
- područja za manevriranje i
- područja za privez i sidrenje.

U područja za plovidbu pripadaju prilazni plovni putovi, u područja za manevriranje pripadaju područje za zaustavljanje brodova, područje za okretanje brodova, ulazi u luku te područje lučkih bazena koje brod koristi pri prilazu mjestu priveza, dok u područja za privez i sidrenje pripadaju neposredna mjesta boravka broda u luci, odobalni vezovi te sidrišta.

Obilježja i izgled prilaznog plovnog puta će uvelike ovisiti o konfiguraciji obale i položaju luke u odnosu na glavne plovidbene pravce, što najčešće znači da će područje biti dovoljne širine i dubine za prilazni plovni put ili će zahtijevati dodatno produbljivanje i/ili proširivanje u svrhu postizanja dovoljne razine sigurnosti plovidbe. Prilazne plovne putove, s obzirom na djelovanje određenih vanjskih sila, najčešće se dijeli u dvije osnovne grupe:

- vanjski (izloženi) plovni put i
- unutarnji (zaštićeni) plovni put.

Prilazni plovni put najčešće završava s područjem za manevriranje, koje može biti unutar ili izvan zaštićenog lučkog bazena, ovisno o raspoloživoj širini i dubini područja.

Ograničeni plovni putovi prema izgledu dijele se u tri osnovne grupe:

- neograničeni plovni put (plovni put ograničene dubine i neograničene širine)
- ograničeni plovni put (plovni put ograničen dubinom i širinom) te
- kanal (umjetni plovni put).

2.2. Kriteriji za definiranje dimenzija plovnih putova i područja manevriranja

S aspekta sigurnosti plovidbe, određivanje dimenzija plovnog puta može se promatrati s dva stajališta. U prvom slučaju promatra se novi plovni put čije je dimenzije tek potrebno odrediti na temelju definirane vrste broda koji će taj plovni put koristiti. U drugom slučaju promatra se već postojeći plovni put čije su dimenzije najčešće već utvrđene te ih nije moguće znatnije mijenjati, a potrebno je definirati obilježja brodova koji će taj plovni put koristiti.

Prilikom definiranja dimenzija plovnih putova i područja za manevriranje, brodovi se najčešće dijele prema manevarskim karakteristikama i upravljivosti. Uobičajena je podjela na brodove slabih, umjerenih i dobrih manevarskih karakteristika. Međutim, ta podjela ovisi o procjeni te se uvelike mijenja razvojem tehnologije.

Umjesto generaliziranja brodova u različite grupe, pri definiranju dimenzija plovnih putova i područja za manevriranje, najbolje je koristiti pojedina geometrijska i konstrukcijska obilježja broda, poput:

- osnovnih dimenzija broda
- međusobnih omjera pojedinih dimenzija broda
- koeficijenata forme broda
- nadvodnih i podvodnih površina broda
- nosivosti i/ili deplasmana broda te
- vrste tehnologije prijevoza tereta.

Navedeni podatci broda ponekad su dostupni za konkretni brod, međutim u slučaju nedostatka konkretnih podataka koriste se podatci sličnih brodova ili podatci dobiveni proračunom.[39]

Deplasman predstavlja ukupnu masu broda, a najmanji deplasman za sigurnu plovidbu, je deplasman u balastu, koji je jednak zbroju mase praznoga broda, posredne nosivosti i masi vode u balastnim tankovima. Taj deplasman najčešće iznosi 20 – 40% najvećeg deplasmana broda ili 30 – 50 % ukupne nosivosti broda.

2.2.1. Širina plovnog puta

Na širinu plovnog puta, s aspekta sigurnosti plovidbe, utječu dva osnovna čimbenika; raspoloživi morski prostor i njegova dubina te brodske dimenzije. Međutim, osim navedenih osnovnih čimbenika potrebno je u obzir uzeti još i:

- opći izgled plovnog puta
- upravljivost broda
- utjecaj vanjskih sila
- utjecaj ruba plovnog puta
- dubinu vode i

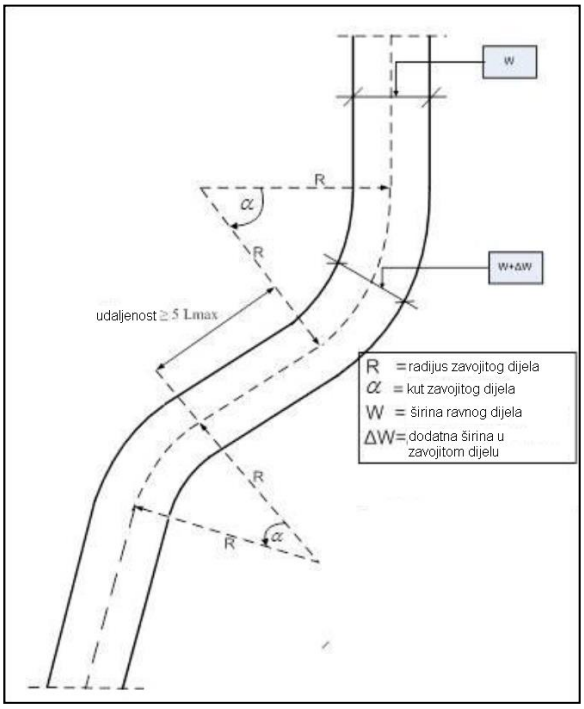
[39]Takahashi, H., Goto, A., Abe, M. (2006): *Study on Standards for Main Dimensions of the Design Ship.* Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), No. 309.

- gustoću prometa.

Izgled plovnog puta, kako je već ranije navedeno, uvelike ovisi o položaju luke i konfiguraciji obale. Idealni plovni put se sastoji od ravnog prilaznog plovnog puta koji završava područjem za okretanje brodova. Međutim, vrlo često to u praksi nije moguće postići tako da se plovni put najčešće sastoji od ravnih dijelova povezanih s blagim zavojitim dijelovima. Ponekad nije moguće postići jednolike uvjete na čitavom plovnom putu tako da pojedini dijelovi mogu imati različite širine i dubine, te različita ograničenja brzine plovidbe.

Preporučeni faktori koji se trebaju uzeti u obzir pri definiranju općeg izgleda plovnog puta su:

- dužina plovnog puta
- uvjeti na završetku plovnog puta
- prepreke na plovnom putu ili zamuljivanje
- prevladavajući uvjeti vjetra, morskih struja i valova,
- položaj ulaska u luku u odnosu na plovni puta te
- uvjeti na rubovima plovnog puta.



Slika 1: Određivanje općeg izgleda zavojitog dijela plovnog puta
(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

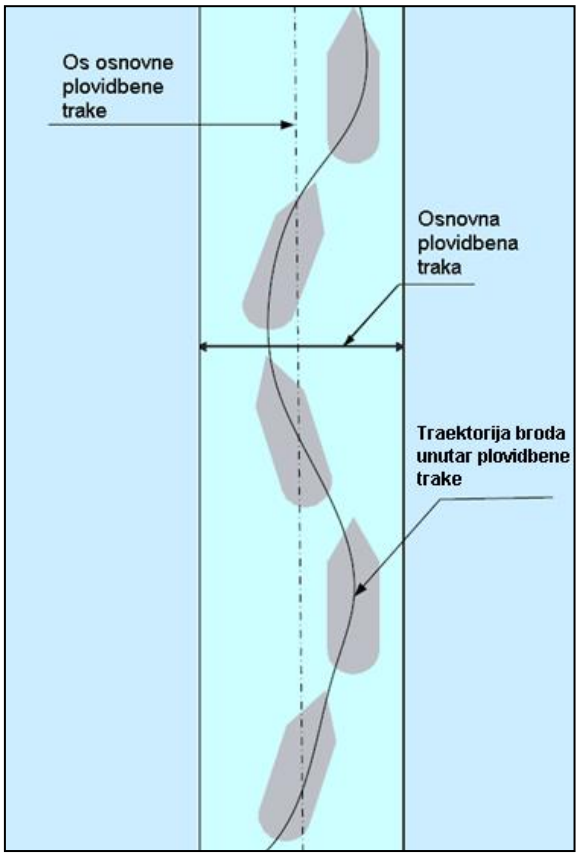
Zavojiti dio plovnog puta spaja dva ravna dijela plovnog puta. Međutim, u nekim slučajevima se ne mogu izbjeći uzastopni zavojiti dijelovi. U tom slučaju taj dio plovnog puta može se analizirati koristeći podatke dobivene navigacijskim simulatorima, kako bi se odredila trajektorija kretanja broda prilikom plovidbe analiziranim plovnim putom.

Prilikom definiranja izgleda novog plovnog puta preporuča se da udaljenost između uzastopnih zavojitih dijelova treba biti veća od pet duljina najvećeg broda za zavojite dijelove

s različitim smjerom okreta broda (Slika 1), i tri duljine najvećeg broda za zavojite dijelove s istim smjerom okreta broda.

Završni dio plovnog puta, ako ne završava područjem za manevriranje nego izravno vodi do mjesta priveza, tada os plovnog puta ne smije biti okomita u odnosu na mjesto priveza. U tom slučaju potrebno je postaviti os plovnog puta na način da brod pri prilazu mjestu priveza mora napraviti okret, što umanjuje rizik udara broda u slučaju kvara.

Jedan od elemenata pri definiranju širine plovnog puta je i upravljivost broda. Prilikom plovidbe u ograničenim plovnim putovima u idealnim okolnostima i u odsutnosti vanjskih sila brod bi plovio pravocrtno po sredini plovnog puta. Međutim, i kad na brod ne djeluju vanjske sile vjetra, struja i valova, brod neće ploviti pravocrtno. Razlog tome je što pri plovidbi u ograničenim plovnim putovima dolazi do pojave sile međudjelovanja s dnom i rubom plovnog puta, kao i zbog brzine reagiranja kormilara u interpretaciji vizualnih oznaka položaja broda unutar plovnog puta, te stoga što vrijeme reakcije broda na stroj i kormilo koje nije trenutno (Slika 2).



Slika 2: Prikaz utjecaja upravljivosti broda na širinu osnovne plovidbene trake
(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

Potrebna širina osnovne plovidbene trake na koju utječe upravljivost broda ovisi o mnogim faktorima, a među njima najvažniji su:

- manevarske karakteristike broda
- dubina plovnog puta
- blizina ruba plovnog puta

- vještina kormilara
- vizualna pomagala na plovnom putu i
- vidljivost.

Kod upravljivosti broda bitne manevarske karakteristike broda mogu se podijeliti u tri osnovne grupe:

- sposobnost održavanja kursa s malim otklonom kormila ($\delta_R < 5°$)
- sposobnost promjene kursa s umjerenim otklonima kormila ($\delta_R = 10 - 20°$)
- sposobnost okretanja s najvećim otklonom kormila.

Sposobnost održavanja kursa ovisi i o brodskoj formi. Brodovi punih formi, s velikim koeficijentom punoće deplasmana C_B (npr. brodovi za prijevoz sirove nafte u razlivenom stanju tankeri i brodovi za prijevoz suhog rasutog tereta) teže održavaju kurs te imaju izraženo zanošenje tijekom okreta. Brodovi finijih formi, s manjim koeficijentom punoće deplasmana (npr. brodova za prijevoz kontejnera) puno bolje održavaju kurs. Međutim, treba naglasiti da nakrcani brodovi ponekad teže održavaju kurs u vodama srednje dubine ($h/T \approx 1,5$), a u plitkim vodama ($h/T \approx 1,2$) sposobnost održavanja kursa broda se poboljšava, dok se smanjuje sposobnost okretanja.[40]

Vizualna pomagala na plovnom putu zajedno s vidljivošću uvelike utječu na sposobnost održavanja kursa, na načina da kormilar brže uoči skretanje broda s zadanog kursa. U slučaju da je plovni put označen, položaj broda može se provjeravati promatranjem oznaka plovnog puta golim okom ili RADAR-skim sustavom[41], ili koristeći prikaz pozicije dobivene GPS-om[42] ili DGPS-om[43] na pomorskoj karti ili na ekranu ECDIS[44] uređaja. U slučaju da je plovni put označen plutačama, udaljenost između dviju uzastopnih plutača u smjeru plovidbe treba biti u skladu s veličinom broda, brzinom broda i vidljivosti.

U slučaju da plovni put nije označen, najčešće se koriste elektronički sustavi za određivanje pozicije broda, poput GPS-a i DGPS-a skupa s papirnatim ili elektroničkim kartama (ECDIS). Osoba koja upravlja brodom utvrđuje poziciju prema prikazu broda na karti. Međutim, bez obzira na visoku točnost elektroničkih uređaja potrebno je u obzir uzeti moguće pogreške pozicije. Također, često prilikom praćenja kretanja broda na elektroničkoj karti, pozicija broda se uzima kao potpuno točna i percipira se na zaslonu uređaja, te se ne provjerava koristeći druge metode. Greška koja tada može nastati iznosi i do pola širine broda.

Bitan faktor upravljivosti broda je i brzina plovidbe. Premala brzina plovidbe dovodi do smanjenja učinkovitosti kormila, pa čak i do gubitka kontrole. Prevelika brzina plovidbe utječe na djelomično upravljive vanjske sile (utjecaj međudjelovanja broda i dna, te broda i obale),

[40] *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014. str. 78.

[41] RADAR – engl. Radio Detection and Ranging

[42] GPS – engl. Global Positioning System

[43] DGPS – engl. Differential Global Positioning System

[44] ECDIS – engl. Electronic Chart and Display Information System, informacijski sustav i prikaz elektroničkih karata

čiji se utjecaj povećava brzinom broda. Preporučene brzine plovidbe[45] u pojedinim dijelovima plovnog puta i područja manevriranja prikazane su u priloženoj tablici 1.

Tablica 1: Preporučene brzine broda u pojedinim područjima plovidbe i manevriranja

Područje	Brzina broda	
	m/s	čv
Plovni putovi – dulji *(≥ 50 Loa*)	4 - 7,5	8 - 15
Plovni putovi – kraći *(< 50 Loa*)	4 - 6	8 - 12
Sidrišta	1 - 1,5	2 - 3
Manevarska područja	2 - 3	4 - 6
Terminalska područja	1 - 1,5	2 - 3
Ulazi u luke	2 - 4	4 - 8
Plovni put unutar luke	3 - 5	6 - 10
Prilazi mjestu priveza	1 - 1,5	2 - 3

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Osim brzine plovidbe, na plovnom putu je potrebno i definirati graničnu veličinu djelovanja vanjskih sila na brod. U pravilu plovni put je postavljen pod što povoljnijim kutom u odnosu na prevladavajuće vanjske sile (vjetar,[46] morske struje,[47] valove,[48]). U slučaju da za konkretno područje točni podatci vanjskih sila nisu dostupni ili dostupni podatci nisu relevantni (kratak period mjerenja podataka), mogu se koristiti sljedeći preporučeni granični uvjeti:[49]

- brzina vjetra $V_{vj,\ 1\ min}$ ≤ 15 m/s (29 čv)
- brzina struja $V_{strj,\ 1\ min}$ ≤ 1 m/s (2 čv)
- značajna visina valova *Hs* ≤ 3 m.

Vanjske sile, odnosno djelovanje vjetra, struja i valova, kao što je već ranije opisano, su bitan čimbenik kojeg valja uzeti u obzir pri definiranju širine plovnog puta.

[45]Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain). ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.

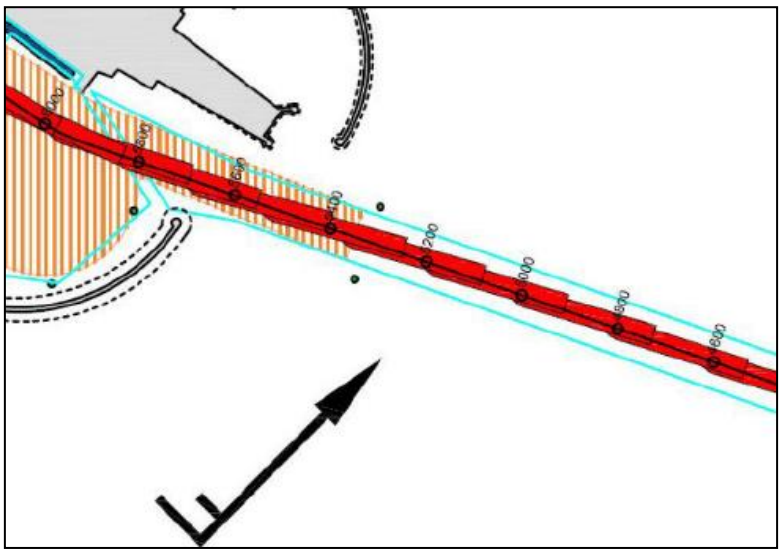
[46]$V_{vj,\ 1\ min}$ – brzina vjetra na visino od 10 metara iznad razine mora, prikazan kao 1 minutni prosjek.

[47]$V_{strj,\ 1\ min}$- brzina struje na dubini koja odgovara polovici gaza broda, prikazana kao 1 minutni prosjek.

[48]*Hs* – Značajna visina valova. Predstavlja srednju visinu 1/3 najviših valova u promatranom periodu.

[49]Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.

Sila vjetra koja djeluje lateralno na brod, pri svim brzinama uzrokuje bočni zanos (Slika 3) međutim, najznačajnije utječe prilikom manje brzine broda. To znači da će sposobnost održavanja zadanog kursa broda kurs biti otežana.



Slika 3: Zanos broda pod lateralnim djelovanjem sile vjetra
(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

Veličina djelovanja lateralne sile vjetra na brod ponajviše ovisi o:

- brzini broda
- lateralnoj nadvodnoj površini broda (u odnosu na lateralnu podvodnu površinu broda)
- odnosu dubine i gaza broda (iz razloga što se sa smanjenjem odnosa dubina/gaz povećava otpor broda) i
- brzini i smjeru puhanja vjetra u odnosu na brod.

Veličina lateralnog djelovanja sile morske struje utječe na sposobnost održavanja kursa broda, dok veličina longitudinalnog utjecaja sile morske struje djeluje na manevrabilnost broda i sposobnost zaustavljanja. U većini slučajeva morske struje su paralelne s osi plovnog puta, te vrlo rijetko djeluju okomito na os plovnog puta. Međutim, u pojedinim lukama i tijekom određenih faza morskih mijena, bez obzira na smjer djelovanja, struje morskih mijena mogu postati prejake za sigurnu plovidbu, što uvelike utječe na raspoloživost luke.

Djelovanje valova se ponajviše očituje kroz vertikalno kretanje broda (posrtanje, poniranje i ljuljanje) što će utjecati na definiranje potrebne dubine plovnog puta. Međutim, utječe i na širinu plovnog puta, jer brod na valovima, zbog djelovanja sila valova, uobičajeno zaošijava.

Osim definiranja veličine graničnih vrijednosti vanjskih sila, s aspekta sigurnosti plovidbe, potrebno je kod postojećeg plovnog puta definirati najveću dopuštenu veličinu zanosa koji nastaje pod utjecajem vanjskih sila ili u slučaju novog plovnog puta na temelju najvećeg zanosa definirati dodatnu širinu. U većini slučajeva se definira najveći dopušteni zanos i dodatna širina prema graničnim vrijednostima vanjskih sila, a preporučene granične vrijednosti zanosa prikazane su u tablici 2.

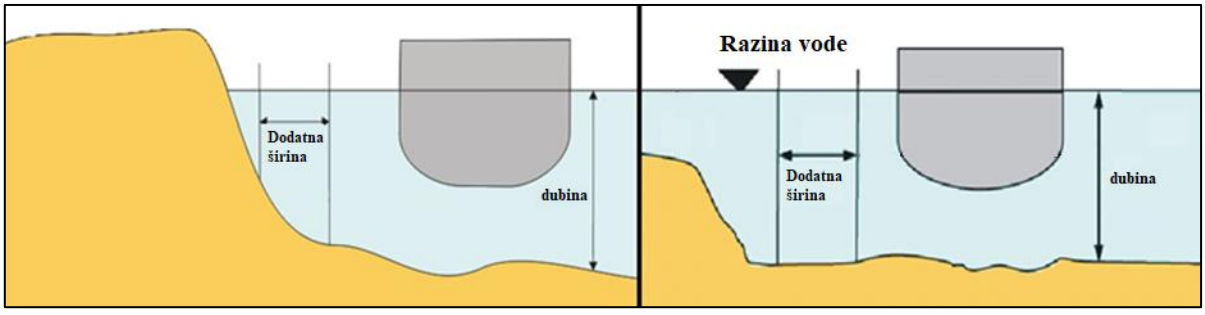
Najveći dopušteni kut zanosa u tablici se razlikuje za ravni i zakrivljeni dio plovnog puta, te po odnosu dubine vode na plovnom putu i gaza broda (*h/T*), a predstavlja ukupni zanos pod utjecajem vanjskih sila vjetra, struja i valova. Konkretan način izračuna djelovanja pojedine vanjske sile objašnjen je u poglavlju 4.

Tablica 2*:* Granične vrijednosti kuta zanosa broda na ograničenom plovnom putu

Plovni put	Kut zanosa β (°)
Plovni putovi s omjerom dubine i gaza broda $h/T \leq 1{,}2$	
ravni dio plovnog puta	5
zakrivljeni dio plovnog puta	10
Plovni putovi s omjerom dubine i gaza broda $1{,}2 < h/T < 1{,}5$	
ravni dio plovnog puta	10
zakrivljeni dio plovnog puta	15
Plovni putovi s omjerom dubine i gaza broda $h/T \geq 5{,}0$	
ravni dio plovnog puta	15
zakrivljeni dio plovnog puta	20

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Na brod u plovidbi, osim vanjskih sila, djeluju i sile međudjelovanja. Kad brod plovi u blizini ruba plovnog puta, strujanje vode oko trupa broda varira i postaje asimetrično u odnosu na uzdužnicu broda. Zbog asimetričnog strujanja dolazi do pojave izraženih hidrodinamičkih sila. Da bi se izbjegao utjecaj sila međudjelovanja između broda i ruba plovnog puta potrebna je dodatna širina plovnog puta (Slika 4).



Slika 4: Primjer dodatne dimenzije ograničenog plovnog puta različitog pokosa

Veličina sile međudjelovanja između broda i ruba plovnog puta ponajviše ovisi o:

- brzini broda
- pokosu ruba plovnog puta
- poprečnom presjeku/simetrija plovnog puta

- odnosu *h/T* i
- udaljenosti boka broda od ruba plovnog puta.

U slučaju da je promet na plovnom putu dvosmjeran potrebno je pridodati dodatnu širinu mimoilaženja između dvaju brodova zbog sile međudjelovanja. Dinamika sila međudjelovanja između dva broda nastaje također zbog asimetričnog strujanja vode oko trupa broda. Međudjelovanje brod-brod potrebno je razmatrati kod mimoilaženja i pretjecanja. Kod mimoilažena sila međudjelovanja izraženija, ali kratkotrajna, dok je kod pretjecanja sila manja međutim dugotrajnija. Kolika će biti sile međudjelovanja između dva broda ponajviše ovisi o:

- brzini brodova,
- udaljenosti između brodova i
- dubini vode.

Kako bi se razina sigurnosti podigla na veću razinu u obzir se uzimaju i dodatni čimbenici poput gustoće prometa, jer što je gustoća prometa veća i udaljenost između dviju plovidbenih traka treba biti veća.

Prilikom definiranja organizacije prometa u analiziranom plovnom putu, s ciljem ostvarivanja dovoljne razine sigurnosti, potrebno je analizirati i promet. Kod novih plovnih putova taj promet se procjenjuje, dok kod postojećih već postoje statistički zapisi o količini i strukturi prometa.

Jednosmjerni plovni put u većem broju slučajeva je najekonomičniji za kratke plovne putove s malim prometom, dok dulji plovni putovi i gušći promet zahtijevaju dvosmjernu plovidbu. U nekim slučajevima, gdje nije moguće uspostaviti dvosmjernu plovidbu s prihvatljivom razinom sigurnosti, organizira se jednosmjerna plovidba s mjestima za mimoilaženje i pretjecanje.

Nakon što se definira organizacija prometa na plovnom putu, potrebno je analizirati kapacitet plovnog puta i manevarskih područja. Podatak o količini prometa ovisi i o vremenu čekanja. Prihvatljivo vrijeme čekanja brodova se definira prema vrsti broda i tereta kojeg prevozi, te su dani sljedeći prijedlozi:[50]

- brod za prijevoz kontejnera: 5 – 10 % servisnog vremena (vrijeme potrebno za ukrcaj, odnosno iskrcaj tereta)
- brod za prijevoz ukapljenog plina: 10 % servisnog vremena
- brod za prijevoz generalnog tereta: 30 % servisnog vremena
- brodovi za prijevoz tekućih tereta u razlivenom stanju: 30 % servisnog vremena
- brodovi za prijevoz rudače: > 40 % servisnog vremena
- putnički brodovi za kružna putovanja: 30 minuta.

Jedna od metoda određivanja kapaciteta plovnog puta je teorija redova čekanja. Zbog jasnoće prikaza, prilaz luci je pojednostavljen u jednostavan sustav (Slika 5). Za potpunu i točnu procjenu bitno je znati da dio sustava s najmanjim kapacitetom određuje sveukupan kapacitet.

[50]Groenveld, R. (2001): Lecture Notes, Delft University of Technology, *Service Systems in Ports and Inland Waterways*, Delft.

Uobičajeno, prilazni plovni put završava područjem za okretanje brodova, a zbog sigurnosti, kad jedan brod koristi područje za okretanje niti jedan drugi brod ne smije ući u to područje. Zbog toga je područje za okretanje brodova dio sustava s najmanjim kapacitetom.



Slika 5: Shema prilaznog plovnog puta i područja za okretanje brodova

Pretpostavka predložene analize je da brodovi dolaze negativnom eksponencijalnom razdiobom označenom slovom *M* (Markov) i ako se pretpostavi vrijeme korištenja plovnog puta s determinističkom vrijednosti *D*, sustav se može opisati kao *M/D/1*. Tada *M* predstavlja razdiobu dolazaka, *D* razdiobu vremena provedenog na plovnom putu i *1* za broj brodova koji koriste jedan element sustava (područje za okretanje brodova).[51]

Funkcija gustoće negativne eksponencijalne razdiobe je:[52]

$$f(t) = \lambda_B e^{-\lambda_B \cdot t} , \qquad [1]$$

gdje su:

λ_B – frekvencija dolaska brodova

t – vrijeme korištenja dijela sustava plovnog puta (min).

Tablica 3 prikazuje prosječna vremena čekanja prema broju brodova u određenom elementu sustava (npr. vrijeme provedeno u području okreta broda). Da bi dobili vrijeme čekanja i prosječno vrijeme zauzetosti dijela sustava s najmanjim kapacitetom, prvo je potrebno odrediti broj brodova koji godišnje ulaze u luku, te vrijeme korištenja dijela sustava s najmanjim kapacitetom u jednoj godini. Tada je moguće dobiti prosječno vrijeme zauzetosti dijela sustava s najmanjim kapacitetom, na način da se podijeli vrijeme za brodove koji koriste taj dio sustava kod ulaska u luku (u minutama) u jednoj godini s vremenom raspoloživosti (broj minuta u jednoj godini umanjeno za vrijeme zauzetosti za brodove koji izlaze iz luke). Kada se utvrdi vrijeme zauzetosti, u tablici se pridružuje koeficijent vremena čekanja (vrijednosti između se interpoliraju). Prosječno vrijeme čekanja broda u dolasku, dobije se umnoškom vrijednosti „koeficijent vremena čekanja“ iz tablice 3 i vremena korištenja dijela sustava s najmanjim kapacitetom brodova u dolasku (u minutama).

Tablica 3: Određivanje vremena čekanja brodova prikazano kroz prosječno vrijeme korištenja elementa plovnog puta po sustavu M/D/1

Koeficijent vremena zauzetosti dijela sustava s najmanjim kapacitetom	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**
Koeficijent vremena čekanja	0,06	0,13	0,21	0,33	0,50	0,75	1,17	2,00	4,50

(Izvor: Groenveld, R. (2001): Lecture Notes, Delft University of Technology, *Service Systems in Ports and Inland Waterways*, Delft.)

[51]Groenveld, R. (2001): Lecture Notes, Delft University of Technology, *Service Systems in Ports and Inland Waterways*, Delft.

[52]Kovač Striko, E., Fratović, T., & Ivanković, B. (2005). *Vjerojatnost i statistika*. Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu.

Ako vrijeme korištenja pojedinog dijela sustava plovnog puta značajno varira, može se koristiti sustav *M/M/1* (Markov/razdioba frekvencije dolaska brodova/dio sustava s najmanjim kapacitetom). Vremena čekanja prikazana kroz prosječno vrijeme korištenja sustava prikazana su u tablici 4.

Tablica 4: Određivanje vremena čekanja brodova prikazano kroz prosječno vrijeme korištenja elementa plovnog puta po sustavu M/M/1

Koeficijent vremena zauzetosti dijela sustava s najmanjim kapacitetom	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Koeficijent vremena čekanja	0,11	0,25	0,43	0,67	1,00	1,50	2,33	4,00	9,00

(Izvor: Groenveld, R. (2001): Lecture Notes, Delft University of Technology, *Service Systems in Ports and Inland Waterways*, Delft.)

Ako vrijeme korištenja dijela sustava plovnog puta značajnije ne varira, može se koristiti sustav *M/E2/1*. *E2* označava *Erlang*-k razdiobu s *k=2* (parametar oblika), μ je frekvencija korištenja (broj brodova koji mogu koristiti određeni dio sustava u nekoj vremenskoj jedinici) i *t* je vrijeme korištenja elementa sustava. Funkcija gustoće *Erlang*-k razdiobe je:[53]

$$f(t) = \frac{(k\mu)^k t^{k-1} e^{-k\mu t}}{(k-1)!} \quad . \qquad [2]$$

Koeficijenti vremena čekanja prikazano je u tablici 5.

Tablica 5: Određivanje vremena čekanja brodova prikazano kroz prosječno vrijeme korištenja elementa plovnog puta po sustavu M/E2/1

Koeficijent vremena zauzetosti dijela sustava s najmanjim kapacitetom	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Koeficijent vremena čekanja	0,08	0,19	0,32	0,50	0,75	1,13	1,75	3,00	6,75

(Izvor: Groenveld, R. (2001): Lecture Notes, Delft University of Technology, *Service Systems in Ports and Inland Waterways*, Delft.)

2.2.2. Sidrišta

Sidrište je definirano kao područje gdje se brodovi sidre i čekaju svoj red za ulaz u luku, gdje se vrši transfer putnika/tereta ili krcaju gorivo i zalihe.

Sidrišta su obično smještena u vanjski dio luke ili blizu plovnog puta koji vodi prema luci. Međutim, pod određenim uvjetima, sidrište može biti smješteno unutar same luke, na primjer kad su vezovi smješteni uz obale rijeke.

Definiranje parametara sidrišta ovisi o sljedećim faktorima:

- veličini, dimenzijama i karakteristikama brodova
- namjeni sidrišta

[53]Groenveld, R. (2006). *Ship Traffic Simulation Study Port Extension Maasvlakte 2 of the Port of Rotterdam*. PIANC Congress 2006, Estoril.

- duljini boravka brodova na sidrištu
- konfiguraciji područja i raspoloživosti prostora za manevriranje
- organizaciji sidrišta
- broju definiranih mjesta za sidrenje
- uvjetima na području sidrišta i granični uvjeti
- fizičkim karakteristikama područja, točnije dubini i vrsti morskog dna i
- raspoloživosti sredstava u slučaju onečišćenja.

Sidrište mora biti dovoljno veliko kako bi se osigurao dovoljan prostor za okretanje broda na sidru, uzimajući u obzir i period boravka broda na sidru, duljinu broda, pretpostavljenu duljina sidrenog lanca i blizinu opasnih područja.

Pomorske karte pružaju informaciju o vrsti i kvaliteti morskog dna, što je bitna informacija prilikom sidrenja. Preporučljivo je da se sidrišta ne smještaju u blizini gustog pomorskog prometa, kako bi se umanjila mogućnost sudara. To posebno vrijedi u slučaju magle ili ostalih fenomena koji mogu umanjiti vidljivost.

Sidrište bi trebalo biti smješteno, koliko je god to moguće, u blizini prirodnih ili umjetnih obalnih markacija kako bi se olakšao prilaz i točnije određivanje mjesta sidrenja.

Granični uvjeti (Tablica 6) na mjestu sidrenja ovise o vrsti broda, vrsti sidrišta i vremenu boravka broda na sidru. Granična brzina vjetra se određuje općenito za sve vrste brodova, međutim, u slučaju da brod ima veću nadvodnu površinu predložene granične brzine vjetar treba umanjiti za 20 %.[54]

Tablica 6: Preporuke graničnih uvjeta za sidrišta

Radnja	$V_{vj,\ 1\ min}$	$V_{strj,\ 1\ min}$	*Hs*
Manevar prilaska sidrištu	17 m/s	2 m/s	2,5 m
Sidrenje dvama sidrima na pramcu	24 m/s	2 m/s	3,5 m
Sidrenje jednim sidrom na pramcu	20 m/s	2 m/s	3,0 m
Operacije ukrcaja/iskrcaja	Ovisno o opremi koja se koristi		

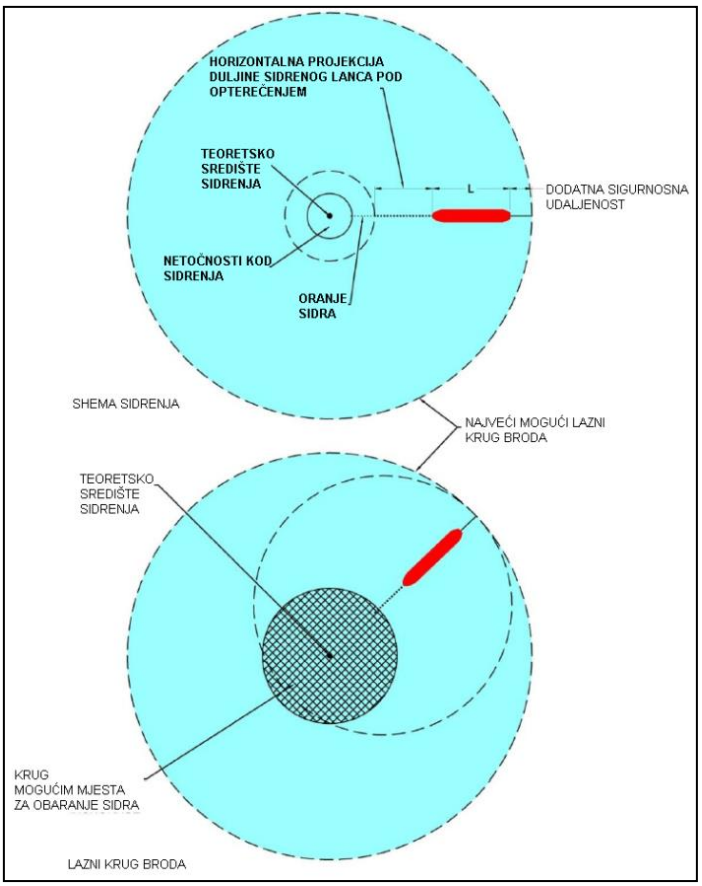
(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

U nastavku je prikazan primjer izračuna dimenzije sidrišta za brod usidren s jednim sidrom na pramcu. Lazni krug može se odrediti deterministički zbrojem sljedećih duljina (Slika 6):

- duljina broda preko svega (*Loa*)
- duljina ispuštenog sidrenog lanca (u ravnini)

[54]Puertos Del Estado (1999*): Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.

- netočnost pretpostavljene pozicije sidrenja i stvarne pozicije sidra
- prihvatljiva granica oranja sidra kod obaranja sidra, koja se može odrediti kao funkcija brzine vjetra (sličan kriterij se može postaviti za kombinirani utjecaj sile valova i morskih struja ili za pojedinačan utjecaj sile valova ili morskih struja):[55]
  - povoljna vrsta morskog dna:
    - sidrenje kod brzine vjetra ≤ 10 m/s 0 m
    - sidrenje kod brzine vjetra do 20 m/s 60 m
    - sidrenje kod brzine vjetra do 30 m/s 120 m
    - sidrenje kod brzine vjetra ≥ 30 m/s 180 m
  - nepovoljna vrsta morskog dna:
    - sidrenje kod brzine vjetra ≤ 10 m/s 30 m
    - sidrenje kod brzine vjetra do 20 m/s 90 m
    - sidrenje kod brzine vjetra do 30 m/s 150 m
    - sidrenje kod brzine vjetra ≥ 30 m/s 210 m
- dodatna sigurnosna udaljenost koja iznosi 10 % ukupne duljine broda (*Loa*), a ne smije biti manje od 20 metara (osim za ribarske brodove i brodice za koje se može koristiti dodatna sigurnosna udaljenost od 5 metara).



Slika 6: Lazni krug broda usidrenog jednim sidrom na pramcu
(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

[55] *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

2.2.3. Područja ukrcaja/iskrcaja peljara

U IMO rezolucija A.960(23)[56] dane su preporuke pri postupku ukrcaja/iskrcaja peljara, među kojima su istaknutije:

- uspostava odgovarajuće nadležne službe peljarenja, te objavljena lokacija ukrcaja i iskrcaja peljara
- pozicija ukrcaja peljara treba biti dovoljno udaljena od područja peljarenja, kako bi se osigurali sigurni uvjeti ukrcaja peljara
- pozicija ukrcaja peljarenja treba biti smještena na mjestu koje omogućuje dovoljno vremena i morskog prostora da se obavi izmjena podataka između zapovjednika i peljara.

Peljar se ukrcava i iskrcava s broda preko peljarskih ljestava, koje moraju udovoljavati zahtjevima rezolucije A.1045(27).[57] U slučaju da brod nije usidren, brod uobičajeno plovi brzinom od 6 do 12 čvorova, ovisno o prevladavajućim uvjetima, što ponekad zahtijeva održavanje istog kursa od 10 do 20 minuta. Vrlo često će brod zadržati taj kurs sve dok peljar ne dođe na zapovjednički most.

Granični uvjeti ukrcaja/iskrcaja peljara su prilagođeni graničnim uvjetima rada za peljarske brodice. Primjeri graničnih uvjeta ukrcaja peljara prikazani su u tablici 7.

Tablica 7: Primjeri graničnih uvjeta za peljarske brodice

Luka	Značajna visina valova	Dužina peljarske brodice
1. Prilaz Elbe	3,5 m	25 m (katamaran)
2. Brisbane	3,0 – 4,0 m	13 m
3. Flushing i Roterdam	3,5 m	25 m (katamaran)
4. Istanbul	4,0 m	17 m
5. Marseille	nema propisanih graničnih uvjeta	17 m
6. Rio de Janeiro	nema propisanih graničnih uvjeta	10 i 12 m
7. Dundee	4,0 – 5,0 m (od izlaska do zalaska sunca)	15 m
8. Milford Haven	2,5 – 3,5 m	16 m

(Izvor*: Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

Slični uvjeti se koriste i za ukrcaj peljara helikopterom. Međutim, u tom slučaju kurs kretanja broda nije unaprijed definiran. Uobičajeno, kurs kretanja broda bit će određen na način da se brod što manje ljulja i posrće. Vodič za operacije helikopter/brod od strane Međunarodne komore brodara[58] daje opće prijedloge i pravila za određivanje nacionalnih i lokalnih pravila zahtjeva. Kao primjer, u tablici 8, prikazani su granični uvjeti pravila za helikopterske operacije ukrcaja peljara u luci Rotterdam.

[56]IMO Resolution A.960(23), *Recommendations on training and certification and on operational procedures for maritime pilots other than deep-sea pilots*, 05. December 2003.

[57]IMO Resolution A.1045(27), *Pilot transfer arrangements*, 30. November 2011.

[58]International Chamber of Shipping (2008), *ICS Guide to helicopter/ship operations*, 4th edition.

Tablica 8: Granični uvjeti za helikopterske operacije ukrcaja peljara u luci Rotterdam

Operacije ukrcaja peljara helikopterom otkazuju se u slučaju:
– Velike relativne vlage s temperaturom ispod 0 °C (opasnost od leda) – Kiše koja se ledi – Grmljavinskog nevremena – Jake tuče ili snijega – Vjetrova brzine preko 55 čvorova (više od 10 Bf) – Relativnog vjetra na palubi većeg od 25 čvorova (više od 6 Bf), u slučaju korištenja vitla

(Izvor: *Port Information Guide*, Rotterdam, October 2016.)

2.2.4. Područja za zaustavljanje brodova

Područja za zaustavljanje brodova bitan su faktor prilaznog plovnog puta i lučkog akvatorija. Smještaj i izgled područja za zaustavljanje brodova definirat će se prema raspoloživosti prostora, brzini plovidbe, potrebi za pomoći tegljača, vrsti tegljača i vremenu potrebnom za prihvat tegljača, vremenskim uvjetima, te o zaustavnom putu broda koji ponajviše ovisi o veličini broda, deplasmanu, obliku podvodnog dijela trupa broda, sustavu propulzije, brzini broda, dubini ispod kobilice i trenutnim vremenskim prilikama.

S obzirom na raspoloživi prostor i djelovanje vanjskih sila, područje za zaustavljanje brodova se može smjestiti unutar ili izvan zaštićenog dijela luke. U slučaju da je područje za zaustavljanje brodova izvan samog zaštićenog dijela luke, može se dopustiti veća prilazna brzina. U tom slučaju, osim što je potreban dulji prostor za zaustavljanje, produljuje se period slabije upravljivosti brodom, u prvom redu radi dulje vožnje krmom. Takav način zaustavljanja iziskuje povoljne vremenske prilike te pomoć tegljača radi kontrole smjera kretanja broda. Drugi slučaj je mala brzina prilaska području za zaustavljanje koje se nalazi izvan ili unutar zaštićenog dijela luke. Tada je potrebno puno kraće vrijeme za zaustavljanja broda, čime se smanjuje vrijeme slabije upravljivosti brodom, a tegljači su najčešće potrebni samo ako se područje za zaustavljanje broda nalazi unutar zaštićenog dijela luke.

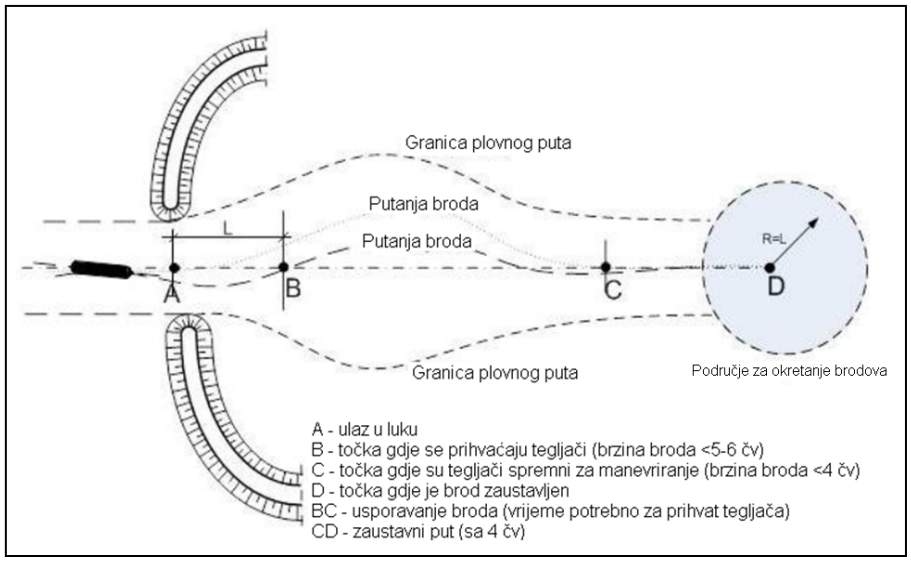
U slučaju da je potrebno područje za zaustavljanje broda smjestiti izvan zaštićenog dijela luke, granični uvjeti su prilagođeni graničnim uvjetima rada tegljača. Preporuka graničnih radnih uvjeta za područja za zaustavljanje brodova koji se nalazi izvan zaštićenog dijela luke su:[59]

- Brzina vjetra $V_{vj,\ 1\ min}$ $\leq$ 10 m/s (20 čv)
- Brzina struje $V_{strj,\ 1\ min}$ $\leq$ 1 m/s (2 čv)
- Visina valova *Hs* $\leq$ 2 m.

Postupak određivanja dužine zaustavnog područja koje se nalazi unutar zaštićenog dijela luke prikazana je u sljedećem primjeru (Slika 7). U konkretnom primjeru, brod prihvaća tegljače nakon ulaska u zaštićeni dio luke (točka A), brzinom približno do 5 čvorova. Vrijeme potrebno za prihvat tegljača prikazan je dužinom od točke B do točke C, a koliko će taj postupak trajati ponajviše ovisi o sposobnosti posade broda i tegljača, način na koji se tegljač prihvaća

[59]Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.

na brod (koristi li se tegleni konop s broda ili tegljača), tipu tegljača i vremenskim uvjetima. U uobičajenim okolnostima taj postupak traje u prosjeku od 5 do 20 minuta. Ako se brod kreće prebrzo ili su nepovoljni vremenski uvjeti, prihvat tegljača će biti otežan, a sigurnost same operacije može biti ugrožena.



Slika 7: Procedura zaustavljanja broda i dimenzije plovnog puta
(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

Nakon prihvata tegljača (točka C), koji sad kontroliraju smjer kretanja broda, brod počinje voziti krmom i počinje usporavati, dok se potpuno ne zaustavi (točka D). Uobičajeno, prosječna duljina zaustavnog puta za brodove u balastu iznosi između 3 do 5 duljina broda, za potpuno nakrcane brodove iznosi od 7 do 8 duljina broda, a uz pomoć tegljača ta vrijednost iznosi od 1,5 do 2 duljine broda.

2.2.5. Područja za okretanje broda

Područje za okretanje brodova je krajnji element prilaznog plovnog puta, koji se uobičajeno nastavlja na područje za zaustavljanje brodova, te se prema tome može nalaziti unutar ili izvan zaštićenog dijela luke.

Kod projektiranja novih luka veličina područja za okretanje brodova se definira prema veličini broda, dok se kod postojećih definira najveća veličina broda prema raspoloživim uvjetima.

Pri definiranju veličine područja za okretanje brodova potrebno je uzeti u obzir sljedeće čimbenike:

- širinu i dubinu raspoloživog prostora
- veličinu i vrstu broda
- djelovanje vanjskih sila
- potrebnu asistenciju tegljača i
- način izvođenja manevra.

Širina i dubina raspoloživog prostora je ulazni parametar koji će u daljnjem postupku definirati sve ostale parametre. To znači, ako je prostor za okretanje broda smješten u zaštićenom dijelu luke, djelovanje vanjskih sila neće biti izraženo, međutim u većem broju slučajeva za izvođenje manevra okreta broda bit će potrebna pomoć tegljača. U praksi, veličina okreta broda uz pomoć tegljača iznosi od 1,6 do 2 duljine broda.

U slučaju da se područje za okretanje brodova nalazi izvan luke, u povoljnim vremenskim prilikama manevar se može izvesti, uz uvjet raspoloživog prostora, bez pomoći tegljača. Međutim, radi sigurnosti plovidbe i djelovanja vanjskih sila u većini slučajeva se koristi pomoć barem jednog tegljača. U praksi, veličina okreta broda bez pomoći tegljača iznosi od 3 do 4 duljine broda. Da bi se manevar okreta broda sigurno izveo, djelovanje vanjskih sila je ograničeno za slučaj kad se manevar okreta izvodi uz ili bez pomoći tegljača. U slučaju da se okret broda izvodi bez pomoći tegljača preporučeni granični uvjeti su:[60]

- Brzina vjetra $V_{vj,\ 1\ min}$ ≤ 10 m/s (20 čv)
- Brzina struja $V_{strj,\ 1\ min}$ ≤ 0,5 m/s (1 čv)
- Značajna visina valova *Hs* ≤ 2/3 m (ovisno o vrsti manevra).

U slučaju da se okret broda izvodi uz pomoć tegljača preporučeni granični uvjeti su:

- Brzina vjetra $V_{vj,\ 1\ min}$ ≤ 10 m/s (20 čv)
- Brzina struja $V_{strj,\ 1\ min}$ ≤ 0,5 m/s (1 čv)
- Značajna visina valova *Hs* ≤ 1,5/2 m (ovisno o vrsti tegljača).

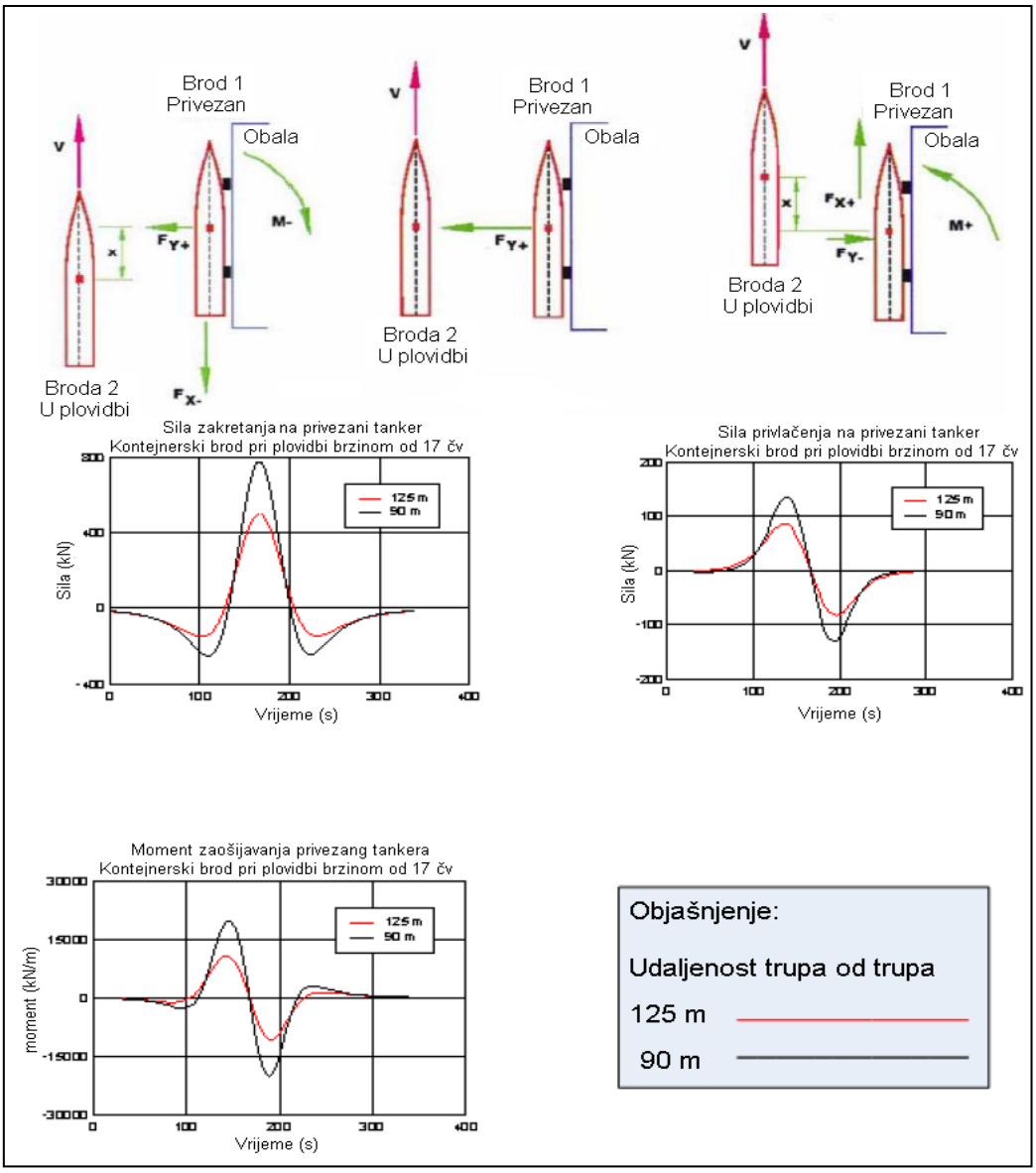
Osim ranije navedenih zahtjeva, pri definiranju dimenzija područja za okretanje brodova potrebno je uzeti u obzir i druge čimbenike poput okoline. U slučaju da je okolina područja okreta broda nepovoljna (npr. privezani brodovi s opasnim teretom, lučke strukture, snažni vjetar i morske struje, visoki valovi) potrebno je povećati veličinu područja okretanja brodova. Često lokalne prilike utječu na konačan izgled područja za okretanje brodova. Naime, u slučaju izraženog djelovanja vanjskih sila iz određenog smjera, područje okretanja brodova treba biti izduženo u smjeru djelovanja te vanjske sile.

Ako su lokalne prilike otežane i zahtijevaju poznavanje većeg broja podataka, tada se mogu koristiti podatci dobiveni simulacijama na navigacijskom simulatoru, što će omogućiti kvalitetnije definiranje dimenzija područja za okretanje brodova.

2.2.6. Udaljenost plovnog puta od privezanih brodova

Za plovne putove unutar lučkog akvatorija, mora se u obzir uzeti utjecaj broda u plovidbi na privezane brodove, te shodno tome definirati sigurnu udaljenost. Utjecaj broda u plovidbi na privezane bodove očituje se kroz pomake privezanog broda, što može uzrokovati poteškoće kod operacija s teretom ili dodatna opterećenja na privezne konope.

[60]Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.



Slika 8*:* Sile na privezani brod

(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

Sile koje djeluju na privezani brod (Slika 8) tijekom prolaska drugog broda jesu:[61]

- sila odbijanja koju stvara područje visokog tlaka oko pramca broda u prolazu, djeluje na način da razdvaja brodove jedan od drugog (privezani brod se pravocrtno pomiče prema natrag i bočno od obale, te zakreće prema obali);
- kako brod koji plovi dolazi u paralelan položaj s privezanim brodom, sila odbijanja prelazi u silu privlačenja, zbog djelovanja područja niskog tlaka uz bok broda koji plovi, te se privezani brod zakreće prema brodu koji prolazi;
- kako brod u plovidbi odmiče, privezani brod još ima tendenciju privlačenja prema brodu koji plovi. Ovo je faza kad su sile na privezani brod najveće. U slučaju da privezani brod

[61]Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*.

izgubi kontakt s bokobranima, tada se gubi sila trenja i može doći do još većih uzdužnih pomaka privezanog broda. Dosadašnja istraživanja su pokazala da je to kritična granica kada pomaci privezanog broda mogu postati znatno veći;

- u završnoj fazi kada brod koji prolazi odmiče, sila privlačenja tada prelazi u silu odbijanja zbog djelovanja povišenog tlaka na krmi broda u plovidbi. Posljedica toga je odbijanje privezanog broda natrag prema obali (privezani brod se pravocrtno pomiče prema naprijed i bočno prema obali, te zakreće od obale);

Efekt broda koji plovi u blizini privezanog broda vrlo je bitan u slučaju da je privezani brod osjetljiv na pomake, kao na primjer u slučaju terminala za tekuće terete i kontejnere. Ograničenja se trebaju odrediti na temelju brzine i udaljenosti brodova, a sve s ciljem da sila međudjelovanja ne bi djelovala na privezane brodove i prouzročila štete. U suprotnom slučaju potrebno je prekinuti operacije na privezanom brodu dok drugi brod ne prođe.

Veličina utjecaja broda u prolazu ovisi o:

- brzini brodova kroz vodu, jer je efekt približno proporcionalan kvadratu brzine broda
- udaljenosti između brodova u plovidbi i privezanih brodova, jer se efekt povećava smanjivanjem udaljenosti
- odnosu veličina privezanog broda i broda u plovidbi, veliki brodovi s većim gazom i velikim koeficijentom punoće deplasmana u plovidbi imaju tendenciju stvaranja većeg efekta na manji privezani brod
- dubini ispod kobilice broda koji plovi i privezanog broda, jer kod male dubine ispod kobilice dolazi do povećanja efekta, zbog povećanog efekta omjera S[62] i
- geometriji plovnog puta, širini i dubini, jer uski plovni putovi mogu pojačati efekt zbog faktora odnosa presjeka.

Ako se za konkretni primjer ne rade dinamički modeli koji procjenjuju hidrodinamičku silu između dvaju brodova kako bi se odredili specifični uvjeti kod prolaza broda, mogu se koristiti sljedeće preporuke kako bi se smanjio utjecaj broda u plovidbi na privezani brod:

- brzina broda u prolazu od 4 čvora ili manja za udaljenost između dvaju brodova od minimalno 2B (udaljenost od trupa do trupa broda)
- brzina broda u prolazu od 6 čvorova ili manja za udaljenost između dvaju broda od minimalno 4B.

2.2.7. Mjesto priveza brodova

Broj i veličina mjesta priveza brodova ovisi o veličini lučkog bazena i raspoloživom mjestu dovoljne dubine za privez, veličini i broju brodova te o razmještaju i međusobnom odnosu mjesta za privez brodova. Način organizacije priveza unutar luke mora zadovoljiti dovoljnu razinu sigurnosti tijekom manevriranja, u odnosu na zaklonjenost luke, tehnologiju manevriranja, itd.

U slučaju da se brodovi privezuju na istu obalu u nizu, udaljenost između njih treba iznositi minimalno 0,1 duljinu najduljeg broda, a u slučaju loših vremenskih uvjeta 0,2 duljine

[62]engl. *Blockage factor* – odnos poprečnog presjeka plovnog puta i uronjenog dijela broda na glavnom rebru.

duljeg broda. U slučaju određenih vrsta brodova i tereta, poput brodova za prijevoz tekućih tereta, potrebni su stroži zahtjevi. Uobičajena praksa ovisi o pravilima pojedine zemlje, međutim udaljenosti u prosjeku iznose:[63]

- udaljenost između dvaju privezanih tankera između 30 i 100 metara
- udaljenost između tankera i broda u plovidbi između 50 i 150 metara
- udaljenost između dvaju tankera za prijevoz ukapljenih plinova između 50 i 150 metara. U slučaju da su ta dva tankera, tankeri za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (LNG), ta udaljenost treba iznositi jednu duljinu broda ili između 250 i 300 metara
- udaljenost između privezanog tankera za prijevoz ukapljenih plinova i broda u plovidbi treba iznositi između 60 i 250 metara, a u slučaju da je privezani broda tanker za prijevoz prirodnog ukapljenog plina ta udaljenost ne smije biti manje od 300 metara.
- udaljenost između tankera za prijevoz ukapljenih naftnih plinova (LPG) i ostalih instalacija ne smije biti manja od 150 metara, a za tankere za prijevoz ukapljenih prirodnih plinova (LNG) ne smije biti manja od 300 metara.

Ako je vez unutar luke organiziran na gatovima, međusobna udaljenost između dvaju gatova trebala bi iznositi najmanje 4 širine najšireg broda i dodatne širine potrebne za rad tegljača. Duljina gata za privez jednog broda trebala bi biti za 30 do 50 metara veća od duljine broda koji se privezuje. Udaljenost broda od obale bi trebala iznositi minimalno od 0,1 do 0,15 duljina broda.

Mjesta za privez brodova na terminalima za prekrcaj tekućih tereta, ili sličnim obalama za privez brodova, najčešće se sastoje od strukture na koju se naslanja brod i priveznih utvrdica. Struktura na koju se naslanja brod opremljena je bokobranima, a njezina duljina uobičajeno iznosi otprilike od 0,25 do 0,4 duljine broda. Međutim, u većini slučajeva velik broj terminala prihvaća brodove različitih veličina, pa je stoga potrebno na siguran način prihvatiti sve brodove.

Prilikom definiranja graničnih uvjeta za mjesta priveza na obali, gatovima i terminalima, može se izdvojiti nekoliko bitnih čimbenika:

- vrsta i veličina brodova koji se privezuju
- privezna oprema obale
- dozvoljeni pomaci tijekom operacija ukrcaja i iskrcaja tereta
- broj privezanih brodova i
- raspoloživost tegljača.

Zaustavljanje operacija ukrcaja ili iskrcaja tereta ovisit će o vrsti tereta i vrsti opreme koja se koristi, dok su za putničke brodove bitne granice udobnosti za putnike. U tablici 9 prikazani su preporučeni granični uvjeti za brodove privezane na lučke obale, gatove i terminale.

[63]Thoresen, C.A., *Port Designer`s Handbook: Recommendations and Guidelines*, Thomas Telford, London, 2003, str. 88.

Tablica 9: Preporučeni granični uvjeti na mjestu priveza

	$V_{vj,\ 1\ min}$	$V_{strj,\ 1\ min}$	*Hs*
Mjesto priveza			
Djelovanje frontalnih vanjskih sila	17 m/s	1,0 m/s	2,0 m
Djelovanje lateralnih vanjskih sila	10 m/s	0,1 m/s	1,5 m
Zaustavljanje ukrcaja/iskrcaja tereta (konvencionalna oprema)			
Frontalne sile			
Tankeri za prijevoz sirove nafte (DWt)			
< 30000	22 m/s	1,5 m/s	1,5 m
30000 – 200000	22 m/s	1,5 m/s	2,0 m
> 200000	22 m/s	1,5 m/s	2,5 m
Brodovi za prijevoz suhog rasutog tereta			
Ukrcaj	22 m/s	1,5 m/s	1,5 m
Iskrcaj	22 m/s	1,5 m/s	1,0 m
Tankeri za prijevoz ukapljenog plina			
< 60000 m^3	22 m/s	1,5 m/s	1,2 m
> 60000 m^3	22 m/s	1,5 m/s	1,5 m
Brodovi za prijevoz generalnog tereta, veliki ribarski brodovi, brodovi za prijevoz hlađenog tereta	22 m/s	1,5 m/s	1,0 m
Brodovi za prijevoz kontejnera, tereta na kotačima i trajekti	22 m/s	1,5 m/s	0,5 m
Brodovi za prijevoz putnika (granice za ukrcaj/iskrcaj putnika)	22 m/s	1,5 m/s	0,5 m
Ribarski brodovi	22 m/s	1,5 m/s	0,6 m
Lateralne sile			
Tankeri za prijevoz sirove nafte (DWt)			
< 30000	20 m/s	0,7 m/s	1,0 m
30000 t – 200000	20 m/s	0,7 m/s	1,2 m
> 200000	20 m/s	0,7 m/s	1,5 m
Brodovi za prijevoz suhog rasutog tereta			
Ukrcaj	22 m/s	0,7 m/s	1,0 m
Iskrcaj	22 m/s	0,7 m/s	0,8 m
Tankeri za prijevoz ukapljenog plina			
< 60000 m^3	16 m/s	0,5 m/s	0,8 m
> 60000 m^3	16 m/s	0,5 m/s	1,0 m
Brodovi za prijevoz generalnog tereta, veliki ribarski brodovi, brodovi za prijevoz hlađenog tereta	22 m/s	0,7 m/s	0,8 m
Brodovi za prijevoz kontejnera, tereta na kotačima i trajekti	22 m/s	0,5 m/s	0,3 m
Brodovi za prijevoz putnika (granice za ukrcaj/iskrcaj putnika)	22 m/s	0,7 m/s	0,3 m
Ribarski brodovi	22 m/s	0,7 m/s	0,4 m
Brodovi privezani na gatovima			
Tankeri za prijevoz tekućih tereta, tankeri za prijevoz ukapljenih plinova			
Frontalne sile	30 m/s	2,0 m/s	3,0 m
Lateralne sile	25 m/s	1,0 m/s	2,0 m
Brodovi za prijevoz putnika			
Frontalne sile	22 m/s	1,5 m/s	1,0 m
Lateralne sile	22 m/s	0,7 m/s	0,7 m
Brodovi nautičkog turizma (granice komfora)			
Frontalne sile	22 m/s	1,5 m/s	0,4 m
Lateralne sile	22 m/s	0,7 m/s	0,2 m
Ostali tipovi brodova	Ograničenja prema opremi koja se koristi		

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Osim priveza uz obalu, brod se može privezati i na odobalne terminale. Odobalni terminali mogu biti izvedeni kao mjesta priveza na jednu točku, plutaču (*engl. SPM* – Single Point Mooring) ili privezni toranj (*engl. STM* – Single Tower Mooring). Privezne plutače mogu biti izvedene kao plutače usidrene jednim sidrom (*engl. SALM* – Single Anchor Leg Mooring) ili kao plutače usidrene s više sidara (*engl. CALM* – Catenary Anchor Leg Mooring). Osim navedenog priveza na jednu točku, odobalni terminali mogu biti izvedeni i kao mjesta priveza u više točaka (*engl. MPM* – Multy Point Mooring).

Granični uvjeti područja za odobalne vezove ovise o tome može li se brod može slobodno okretati oko točke priveza ovisno o smjeru djelovanja vanjskih sila (vez na SPM ili STM) ili to ne može (vez na MPM). Preporučeni granični uvjeti prikazani su u tablici 10.

Tablica 10: Preporučeni granični uvjeti područja za privez brodova

Radnja	**Područja priveza gdje se brod može slobodno okretati**			**Područje priveza gdje se brod ne može slobodno okretati**	
	Privez na jednu plutaču	**Privez na jednu plutaču (ribarski brodovi i brodovi za razonodu)**	**Privez na fiksnu točku**		
Prilaz i privez					
$V_{vj,\ 1\ min}$	17 m/s	17 m/s	17 m/s	10 m/s	
$V_{strj,\ 1\ min}$	2 m/s	2 m/s	2 m/s	0,5 m/s	
Hs	2,5 m	2,0 m	2,5 m	2,0 m	
Privezan brod				Uzdužno	Poprečno
$V_{vj,\ 1\ min}$	30 m/s	24 m/s	30 m/s	30 m/s	22 m/s
$V_{strj,\ 1\ min}$	2 m/s	2 m/s	2 m/s	2 m/s	1 m/s
Hs	4,5 m	2,0 m	3,5 m	3,0 m	2,0 m

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

2.2.8. Ljudski faktor

Približno do 85 % pomorskih nezgoda je posljedica ljudske pogreške.[64] Prema istraživanju Europske agencije za pomorsku sigurnost, između 2011. i 2015. godine, četiri glavna uzroka svih nezgoda su gubitak kontrole broda, udar, sudar i nasukanje (Tablica 11). U istom analiziranom razdoblju, 48 % nezgoda se dogodilo u plovidbi na otvorenom moru, dok se 49 % nezgoda dogodio tijekom prilaska, boravka ili odlaska iz luke (Tablica 12).[65]

[64]Mohovic, D., Mohovic, R., & Baric, M. (2016). *Deficiencies in Learning COLREGs and New Teaching Methodology for Nautical Engineering Students and Seafarers in Lifelong Learning Programs*. Journal of Navigation, 69(04), str. 765-776.

[65]European Maritime Safety Agency. *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2015*.

Tablica 11: Statistika nezgoda prema tipu nezgoda u razdoblju od 2011. do 2014. godine

Tip nezgode	2011. – 2013.	2014.
Gubitak kontrole	24 %	26 %
Udar	18 %	18 %
Sudar	17 %	16 %
Nasukanje	17 %	14 %
Oštećenje broda	12 %	14 %
Požar/Eksplozija	8 %	8 %
Naplavljivanje	3 %	3 %
Prevrtanje	1 %	1 %
Puknuće trupa	0 %	0 %

(Izvor: European Maritime Safety Agency. *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2015*.)

Tablica 12: Raspodjela nezgoda prema lokaciji u razdoblju od 2011. do 2014. godine

Lokacija nezgode	2011. – 2014.
U plovidbi	48 %
Na sidrištu/Na mjestu priveza	16 %
Prilaz luci	23 %
Odlazak iz luke	10 %
Nepoznato	3 %

(Izvor: European Maritime Safety Agency. *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2015*.)

Prema svemu navedenom, lako je uvidjeti da je manevriranje brodom tijekom prilaska i odlaska iz luke složen proces koji zahtijeva jasno definirane razine sigurnosti koje se ne smiju prekoračiti.

Također, ljudski faktor je bitan iz razloga što se plovidba i manevriranje broda sastoji od niza ljudskih odluka, te provođenja tih odluka u djelo. Shodno svemu navedenom i prikazanoj statistici, vrlo je bitno uključiti ljudski faktor u proces definiranja dimenzija plovnog puta, bilo kroz analizu dimenzija plovnih putova koristeći podatke dobivene navigacijskim simulatorima ili kroz procjenu rizika.

Ljudski faktor najčešće se promatra kroz fenomene kao što su umor, iskustvo, moral, motivacija, upravljačka politika, standardi za stjecanje svjedodžbi, uvjeti službe, okoliš,

lojalnost, jezik i uvježbanost. Spektar ljudskih pogrešaka najjednostavnije se može prikazati sljedećim redoslijedom: nerazumijevanje, propust, nepažnja, kriva posudba i neznanje.[66]

Ljudski faktor je posebno značajan kod definiranja dimenzija plovnog puta, bilo novog ili postojećeg plovnog puta, iz razloga što je manevriranje broda posljedica ljudskih odluka (peljara, zapovjednika, časnika, kormilara), te se izvršava od strane ljudi (posade, tegljača,…). Pogreške koje se u tom procesu događaju proizlaze iz ljudskog ponašanja i utječu na uključene osobe te na rizični događaj i korišteni model.

Uzevši sve u obzir, kod procesa definiranja dimenzija plovnog puta potrebno je uzeti u obzir ljudski faktor, koristeći suvremene alate (npr. simulacije u stvarnom vremenu) ili metode procjene rizika.

2.3. Postupak određivanja dimenzija plovnih putova i područja manevriranja – konceptualni i detaljni pristup

Metodologija određivanja dimenzija plovnih putova i područja manevriranja, s aspekta sigurnosti, razlikuje se za nove i postojeće plovne putove. Kod projektiranja dimenzija novih plovnih putova i područja manevriranja dimenzije se određuju na temelju brodova koji će taj plovni put i područja manevriranja koristiti, dok se kod postojećih plovnih putova i područja manevriranja na temelju ranije utvrđenih dimenzija određuju dimenzije brodova koji taj plovni put i područja manevriranja mogu sigurno koristiti.

Za određivanje dimenzija ograničenih plovnih putova i područja manevriranja koriste se dvije osnovne metode:

- konceptualna metoda i
- detaljna metoda.

Odvijanje procesa može sadržavati obje navedene metode, ili samo jednu (konceptualnu) u slučaju da su dobiveni podatci dovoljno točni, te da ih je moguće provesti bez dodatnih investicija (npr. poput jaružanja).

2.3.1. Konceptualna metoda

Faze konceptualnog projektiranja se sastoje od primarnog određivanja širine, dubine i općeg izgleda plovnog puta koristeći podatke i izraze iz preporuka zajedno s ostalim bitnim podatcima o brodovima i okolišu.

U prvoj fazi određuju se osnovne dimenzije plovnog puta (širina, dubina i opći izgled). Taj dio procesa treba biti brz i ne zahtijeva puno podataka, kako bi se razmotrilo što više mogućnosti. Osnovne dimenzije plovnog puta kombiniraju se s prijedlozima ili preporučenim graničnim uvjetima te zahtjevima u pogledu balisaže.

Početni projekt se temelji na dostupnim podatcima. U ovoj fazi se ne koriste posebni alati ili metode (npr. navigacijski simulatori). Međutim, u ovoj fazi određivanja dimenzija plovnih

[66]Mohović, R. (2002), *Model manevriranja brodom u ograničenim plovnim područjima u funkciji sigurnosti i zaštite morskog okoliša*, Doktorska disertacija, Pomorski fakultet, Sveučilište u Rijeci.

putova vrlo su korisni komentari i povratne informacije od iskusnih korisnika (peljara i pomoraca).

Prednost ove metode su različite moguće alternative izgleda planiranog plovnog puta. Alternative se mogu razlikovati u širini, dubini i općem izgledu plovnog puta. Paralelno s različitim mogućnostima se radi i procjena troškova koja eliminira neodgovarajuće planove. To omogućuje smanjivanje broja mogućnosti u konceptualnoj fazi projektiranja kako bi se detaljnije mogle analizirati povoljnije mogućnosti.

Konceptualno određivanje dimenzija plovnih putova se nakon početne faze može nadograditi. Nadogradnja osnovnih dijelova se sastoji od detaljnijeg dimenzioniranja radi utvrđivanja konačnog općeg izgleda, širine, dubine i balisaže. Dimenzije plovnog puta trebaju biti određene prema međunarodno priznatim standardima i preporukama. Može se izvesti i preliminarno testiranje koristeći simulatore (jednostavni modeli koji predviđaju kretanje brodova) te analize rizika. Studije koje se baziraju na podatcima dobivenim u navigacijskim simulatorima su korisne, posebno ako poslije preliminarne faze nije definiran konačan izgled plovnog puta.

Cilj konceptualnog određivanja dimenzija plovnog puta je definiranje konačnog izgleda plovnog puta, osnovnih dimenzija plovnog puta, postizanje dovoljnog stupnja sigurnosti plovidbe, troškova izrade i održavanja, te plan za daljnje detaljno definiranje dimenzija.

Odluka o finalnom izgledu plovnog puta treba se temeljiti na ekonomskim, tehničkim i maritimnim studijama. Obično je konceptualni izgled plovnog puta predimenzioniran iz razloga što se primjenjuju opće preporuke i standardi koji ne sadržavaju sve specifične slučajeve i uvjete. Također, koriste se deterministčke metode određivanja dimenzija plovnog puta kombiniranjem različitih komponenti, što uglavnom dovodi do predimenzioniranja.

Rezultati konceptualnog projektiranja koriste se za prikaz projekta i njegovih troškova, te pružaju odgovarajući materijal za donošenje odluke za nastavak projekta.

2.3.2. Detaljna metoda

Detaljna metoda je rigorozniji i detaljniji proces namijenjen za potvrđivanje i razvoj konceptualne faze projekta. Metode koje se koriste u detaljnoj fazi projektiranja oslanjaju se na numeričke i fizičke modele te zahtijevaju puno više ulaznih podataka, kao i odgovarajuće tumačenje njihovih rezultata.

Rezultati detaljne faze određivanja dimenzija plovnih putova mogu se provjeravati analizom prometa, procjenom rizika i procjenama troškova, čiji rezultati mogu dovesti do prilagođavanja daljnjeg postupka detaljne faze.

Drugi aspekti detaljne metode određivanja dimenzija uključuju definiranje broja, vrste i pozicije oznaka plovnog puta, analiziranje plovidbe ili lokaliziranih problema na plovnom putu zbog kojih se ne može udovoljiti zahtjevima preporuka.

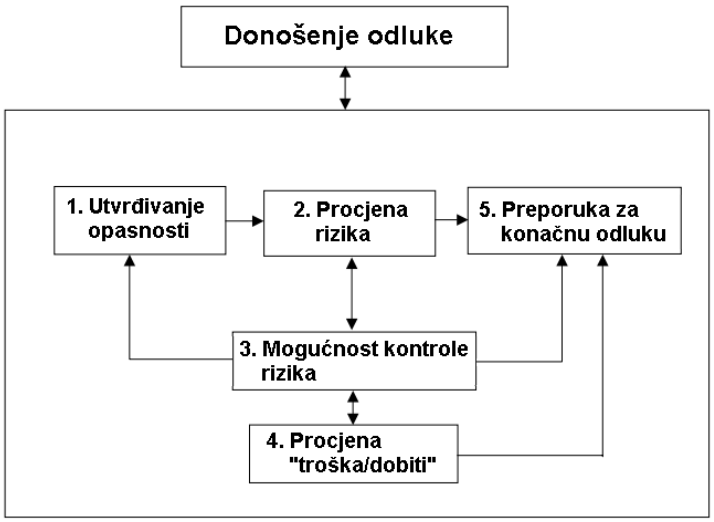
U ovoj fazi projektiranja potrebno je provjeriti i granične uvjete. Granični uvjeti obuhvaćaju vremenske uvjete, veličine i manevarske karakteristike brodova, raspoloživost tegljača, peljaranje itd. U mnogim slučajevima potrebne su simulacijske studije kako bi se definirali granični uvjeti, a ponekad i numerički i fizički modeli.

Ako su razmatrani uvjeti plovidbe, okoliša, troškova relativno jednostavni, a svi se traženi zahtjevi ispune, tada neće trebati previše dorađivati konceptualni model. U tom slučaju nisu potrebne analize rizika, testiranja na simulatoru i dodatna istraživanja. Glavni cilj detaljne faze je određivanje optimalnih dimenzija ograničenog plovnog puta koje zadovoljavaju uvjete sigurnosti plovidbe i uvjete ekonomičnosti.

2.4. Procjena rizika

Prema IMO-u[67] rizik je mjera vjerojatnosti da će se neželjeni događaj dogoditi zajedno s mjerom posljedica koje iz njega proizlaze u određenom vremenu, tj. kombinacija učestalosti nezgode i ozbiljnosti posljedica.[68]

Procjena rizika je dio procesa upravljanja rizikom koji sistematično koristi sve raspoložive informacije za određivanje učestalosti različitih nezgoda koje se mogu dogoditi, te veličinu njihovih posljedica. Procjena rizika je tehnički i znanstveni postupak kojim se rizik pojave određenog stanja u sustavu modelira i kvantificira. Uključuje analizu i ocjenu rizika, koje se sastoje od identifikacije opasnosti, procjene vjerojatnosti događaja i posljedica. Upravljanje pomorskim rizikom predstavlja, u osnovi, poseban skup djelovanja kroz cijeli tijek pomorskog poduhvata radi prepoznavanja rizika i upravljanja njime.[69]



Slika 9: Dijagram toka FSA metodologije
(Izvor: MSC/Circ. 1023, MEPC/Circ. 392, *Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process,* IMO, 04/2002)

Jedna od metoda procjene rizika, preporučena od strane IMO-a, je metoda formalne procjene sigurnosti (FSA).[70] FSA je strukturirana i sistematizirana metodologija čiji je cilj povećanje pomorske sigurnosti, uključujući zaštitu ljudi, zdravlja, morskog okoliša i imovine

[67]IMO – engl. *International Maritime Organisation*, Međunarodna pomorska organizacija.

[68]IMO, *Formal Safety Assessment,* MSC 83/INF.2, 2007.

[69]Bukša, J., & Zec, D. (2005). *Model procjene pomorskih rizika u ograničenom plovnom području*. Pomorstvo: Scientific Journal of Maritime Research, 19(1), str. 173-193.

[70]MSC/Circ. 1023, MEPC/Circ. 392, *Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process*, IMO, 04/2002.

koristeći analizu rizika i procjenu troška/dobiti. FSA metodologija podrazumijeva provođenje sljedećih koraka (Slika 9):[71]

- utvrđivanje opasnosti
- procjena rizika u svezi analiziranih opasnosti
- razmatranje ostalih načina upravljanja utvrđenim rizicima
- procjena „troška/dobiti“ ostalih načina upravljanja rizicima
- donošenje preporuke za konačnu odluku.

2.4.1. Pomorske nezgode

Svaka nezgoda mora imati neki početni uzrok. Uzrok možemo definirati kao ponašanje ili događaj koji dovodi do opasnosti ili izvanrednog događaja. Kako uzroka koji dovode do nezgode može biti i više, prvi koji vodi ka opasnom događaju ili nezgodi naziva se inicijalni ili početni događaj.[72]

Uzroci koji dovode do opasnosti mogu biti:

- ljudska pogreška
- tehnički kvar:
  - izazvan ljudskom pogreškom
  - nije izazvan ljudskom pogreškom (skrivene mane sustava)
- viša sila (vanjski, nepredvidivi i neotklonjivi događaj).

Prema IMO-u[73] nezgoda se definira kao nenamjeran (nehotičan) događaj koji uključuje smrtnost, povrede ljudi, gubitak broda ili njegovo oštećenje, gubitak ili oštećenje druge imovine ili štete po okoliš.

Pomorske nezgode najčešće se dijele na:

- sudar
- udar
- nasukanje
- požar/eksplozija
- prodor vode
- potonuće
- gubitak stabilnosti
- onečišćenje okoliša.

[71]Mohović, Đ. (2010). *Ocjena prihvatljivosti pomorskih plovidbenih rizika*, Doktorska disertacija, Pomorski fakultet, Sveučilište u Rijeci.

[72]Ibidem

[73]IMO, *Formal Safety Assessment*, MSC 83/INF.2, 2007.

Posljedice nezgoda razmatraju se ovisno o tome na koga utječu. U slučaju pomorskih nezgoda one mogu izazvati posljedice na:

- pojedinca (prolazne ili trajne povrede, invalidnost ili gubitak života)
- društvo (isto kao i za pojedinca samo što se uzima u obzir veća skupina ljudi, a često se podrazumijeva da ta skupina ne sudjeluje u tom procesu već je izvan njega)
- imovinu i prava (materijalne posljedice kao što su gubitak imovine, gubitak prihoda, troškovi za umanjenje posljedica onečišćenja i dr.)
- okoliš (prolazna ili trajna promjena šireg ili užeg okoliša).

2.4.2. Metode procjene rizika

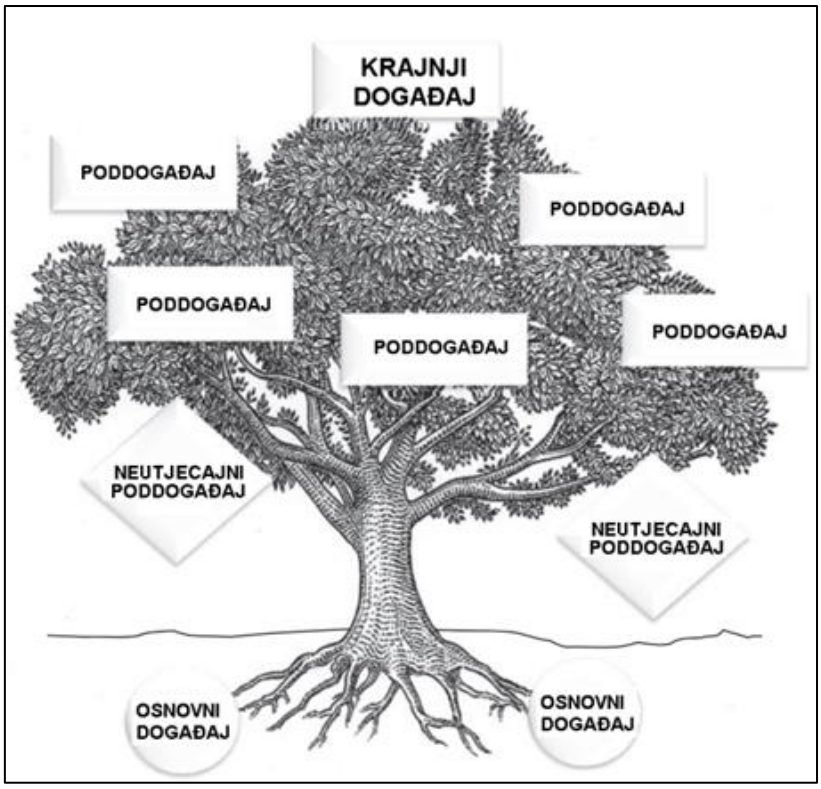
Neke od metoda koje se koriste u postupku procjene rizika su:[74]

- metoda opasnosti i operabilnosti (HazOp – *engl. Hazard and operability studies*)
- analiza stabla pogrešaka (FTA – *engl. Fault tree analysis*)
- analiza stabla događaja (ETA – *engl. Event tree analysis*)
- analiza troškova/dobiti (*engl. Cost/Benefit*) i
- metoda matrice (*engl. Matrix method*).

Osnovna ideja metode opasnosti i operabilnosti (HazOp) je sustavno istraživanje devijacija s normalnog rada sustava koji može imati štetne posljedice. Potrebno je sistematski ispitati sve dijelove sustava i odrediti namjenu svakoga dijela. Prvi korak je napraviti pregled i opis sustava te utvrditi neovisne i međuovisne dijelove. Drugi korak je odrediti devijacije svakog posebnog dijela. Kada se odrede devijacije moguće je odrediti uzroke te razumjeti problem. Tek tada je moguće predložiti sigurnosne mjere.

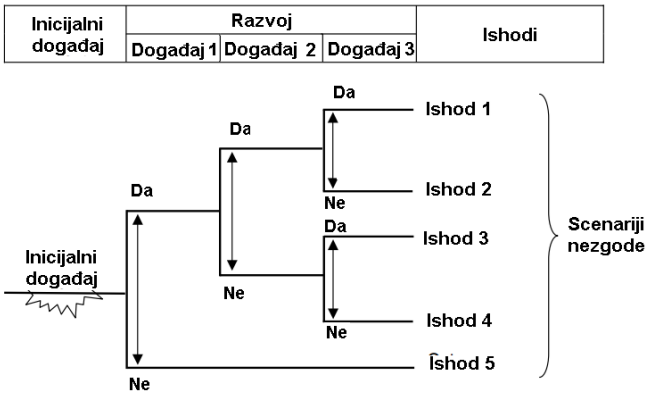
Analiza stabla pogrešaka (FTA) se koristi radi identifikacije podsustava koji je najkritičniji za rad analiziranog sustava te kako bi se analizirao način na koji dolazi do neželjenog događaja i njegove posljedice (Slika 10). Korištenjem logičkih dijagrama prikazuje se veza između uzroka i nastanka neželjenog događaja s binarnom operacijskom metodom (opisani događaj se dogodi ili ne dogodi). Stablo pogrešaka može biti analizirano kvantitativno ili kvalitativno. Kvalitativna analiza opisno definira sustave i strukturira uzroke do krajnjeg događaja s time da se događaj zavisan od više uzroka koristi veza „i“, dok se za događaj zavisan od jednog uzroka koristi veza „ili“. Kvantitativna analiza koristi vjerojatnost za izračunavanje krajnjeg događaja. Za događaje opisane vezom „ili“ koristi jednadžbu za serijske sustave, a za događaje opisane vezom „i“ koristi jednadžbu za paralelne sustave.

[74]Mohović, Đ. (2011). *Upravljanje rizikom u pomorstvu*, Autorizirana predavanja, Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci.



Slika 10: Koncept analize stabla pogrešaka
(Izvor: Vincoli, J. W. *Fault Tree Analysis. Basic Guide to System Safety*, 3rd ed., str. 145-156.)

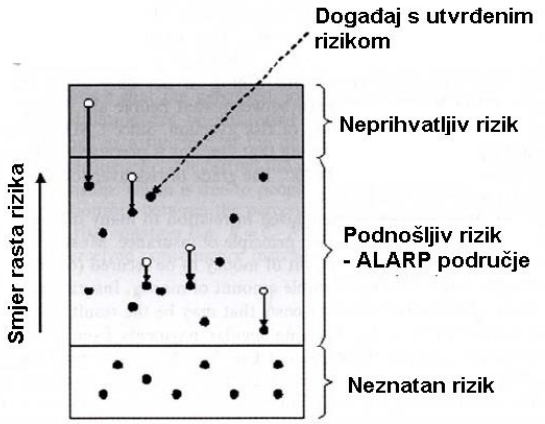
Nakon utvrđene vjerojatnosti neželjenog događaja FTA metodom, analizom stabla događaja (ETA) analiziramo posljedice neželjenog događaja. Upotrebom logičkih dijagrama opisuje se veza između početnog događaja i događaja koji opisuje posljedice (Slika 11). Prvi korak je identifikacija početnog događaja, a nakon toga kronološkim redom utvrditi sigurnosne sustave i njihove mehanizme koji su prepreka razvoju događaja.



Slika 11: Koncept metode analize stabla događaja
(Izvor: Ericson, C. A. (2005). *Event tree analysis. Hazard Analysis Techniques for System Safety*, str.223-234.)

Analiza troškova/dobiti je opća tehnika za usporedbu troškova i koristi projekta. Nakon utvrđene razine rizika, koja može biti prihvatljiva ili neprihvatljiva, može se pristupiti postupku smanjenja rizika, što stvara određene troškove. U nekom trenutku trošak mjera za smanjenje rizika može imati za posljedicu neekonomičnost sustava. Iz tog razloga mora postojati ravnoteža između troškova nastalih pri implementaciji sigurnosnih mjera i preostalog rizika.

Osim prihvatljivog i neprihvatljivog rizika, u Velikoj Britaniji je 1992. godine *Health and Safety executive* razvio i ALARP[75] principe. Kod ovog principa svaki rizik koji je između granice neznatnog rizika i prihvatljivog rizika nalazi se u ALARP zoni (Slika 12). To znači da će se rizik neželjenog događaja u toj zoni pokušati dodatno sniziti uz povoljan uvjet troška/dobiti. Prema tome, rizike možemo smatrati: neprihvatljivim, podnošljivim i neznatnim.



Slika 12: Smanjenje rizika upotrebom ALARP principa
(Izvor: Mohović, Đ. (2011). *Upravljanje rizikom u pomorstvu*, Autorizirana predavanja, Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci)

Metoda matrice[76] omogućava identifikaciju najnepogodnijih slučajeva i njihovo rješavanje prema već ranije utvrđenim procedurama. Međutim, ta metoda dovodi do razbijanja individualnih događaja, gdje svaki pojedini slučaj može biti prihvatljiv, dok ukupno gledajući nisu prihvatljivi. Kako bi se to izbjeglo, analiza se ne smije razbiti u previše manjih scenarija. Prvi korak je određivanje vjerojatnosti promatranog događaja, a koriste se sljedeće varijable:

- niski = niska vjerojatnost događaja (gotovo se nikad ne događa)
- umjereni = vjerojatno (događa se ponekad)
- visoki = vrlo vjerojatno (događa se često).

Drugi korak je određivanje ukupne posljedice događaja, koja se određuje zbrojem individualnih posljedica događaja za četiri bitne komponente: sigurnost, reputaciju, poslovanje i utjecaj na okoliš (Tablica 13) . Te četiri komponente se definiraju kao:

- sigurnost: posljedice koje se tiču ljudi uključenih u radne operacije, obuhvaćajući one koji nisu, međutim, mogu biti pogođeni posljedicama;
- reputacija: posljedice koje utječu na mišljenje trećih osoba na aktere štetnog događaja, uobičajeno kod događaja koji veoma djeluju na zajednice;
- poslovanje: posljedice koje utječu na materijalna dobra;
- okoliš: posljedice koje se tiču onečišćenje okoliša te utjecaj na lokalni ekosustav.

[75]ALARP – engl. *As Low As Reasonably Practicable*, U najmanjoj mogućoj primjenjivoj mjeri.
[76]*Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

Tablica 13: Vrednovanje posljedice događaja za četiri promatrane kategorije utjecaja

Komponenta	Rezultat			
	N	S	V	VV
Sigurnost	2	3	4	6
Reputacija	1	2	3	5
Poslovanje	1	2	3	4
Utjecaj na okoliš	3	4	5	6

(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014)

Zbroj rezultata posljedice događaja vrednuje se četirima kategorijama:

- niske posljedice (N) = rezultat procjene između 0 i 7
- umjerene posljedice (S) = rezultat između 8 i 11
- visoke posljedice (V) = rezultat između 12 i 15
- vrlo visoke posljedice (VV) = rezultat između 16 i 21.

Nakon što se odredi vjerojatnost događaja i posljedica, rizik pojedinog događaja se klasificira kao (Tablica 14):

- neprihvatljivo (NP): potrebna je primjena određenih korektivnih mjera koje će smanjiti razinu rizika, te klasificirati događaj kao prihvatljiv ili se odbacuje;
- korektivno (K): potrebna je primjena korektivnih mjera koje će smanjiti razinu rizika na najmanju moguću mjeru (primjena ALARP metode);
- prihvatljivo (P): nema potrebe za korektivnim mjerama.

Tablica 14: Matrica procjene rizika

Rizik= Vjerojatnost · Posljedica					
Ozbiljnost posljedica	Posljedica	Rezultat procjene posljedica	Vjerojatnost događaja		
			Niska (Mala vjerojatnost događaja)	Srednja (Srednja vjerojatnost događaja)	Visoka (Velika vjerojatnost događaja)
	Niska (N)	0 - 7	P	K	K
	Srednja (S)	8 - 11	K	K	NP
	Visoka (V)	12 - 15	K	NP	NP
	Vrlo visoka (VV)	16 - 21	NP	NP	NP

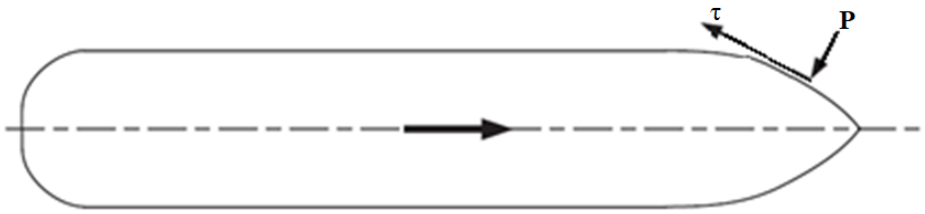
(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014)

2.4.3. Utjecaj sila međudjelovanja na određivanje potrebne širine plovnog puta

Plovidbom broda kroz vodu do izražaja dolaze dva osnovna svojstva vode, viskoznost i hidrodinamički tlak. Oba navedena svojstva utječu na silu otpora broda koja se na trup prenosi tangencijalnim naprezanjima koja nastaju zbog viskoznosti vode te normalnim naprezanjima koja većinom nastaju zbog djelovanja hidrodinamičkog tlaka, ali i viskoznosti vode. U nekoj točki na površini trupa broda djelovanje sila se može predočiti tangencijalnom silom τ koja djeluje u smjeru strujanja vode te normalnom silom P koja djeluje po normali na površinu (Slika 13). Ove sile djeluju neprekinuto na svaku točku površine trupa broda. Integriranjem tangencijalnih sila po čitavoj površini trupa broda dobije se otpor trenja, dok se integriranjem normalnih sila dobiju otpor tlaka te otpor valova. Na temelju toga se kao osnovne sastavnice sile ukupnog otpora broda mogu navesti:

- otpor trenja (tangencijalna naprezanja zbog viskoznosti vode)
- otpor tlaka (normalna naprezanja isključivo povezana s viskoznošću vode) i
- otpor valova (normalna naprezanja uslijed djelovanja hidrodinamičkog tlaka).

Suma ovih sastavnica predstavlja ukupni otpor broda. Kod novijih brodova, kojima je površina trupa većinom glatka, ispitivanjima je utvrđeno da pri malim brzinama otpor uslijed viskoznosti vode iznosi, 80 % do 85 % ukupnog otpora broda, a pri većim brzinama do oko 50 % ukupnog otpora broda. Preostali dio se praktički može svrstati u otpor valova koji je povezan s energijom utrošenom na valove na površini vode, a nastaju zbog napredovanja broda po inače mirnoj površini vode.



Slika 13: Prikaz djelovanja otpora trenja i sile tlakova na trup broda u plovidbi
(Izvor: Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge University Press)

Kada brod uplovi u područje ograničene dubine dolazi do promjena zbog međudjelovanja broda i dna. Pritom dolazi do povećanja brzine strujanja između broda i dna što za posljedicu ima promjenu tlakova na dnu broda te dalje dovodi do promjene gaza i trima broda. Na taj način promjena oblika strujanja vode oko broda dovodi do povećanja otpora trenja i posebno do povećanja otpora valova. Veličina utjecaja će ovisiti o dubini vode te o brzini broda.

Učinak plitke na otpor valova može se aproksimirati koristeći teoriju valova uzimajući u obzir dubinu vode, brzinu broda i brzinu valova. Pri tome se brzina napredovanja valova c može dobiti koristeći podatak o dubini vode h i duljini valova λ.

U dubokoj vodi, kada je omjer h/λ približno jednak ili veći od 0,5 tada se može pisati:

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}}\,. \qquad [3]$$

U plitkoj vodi, izraz glasi:

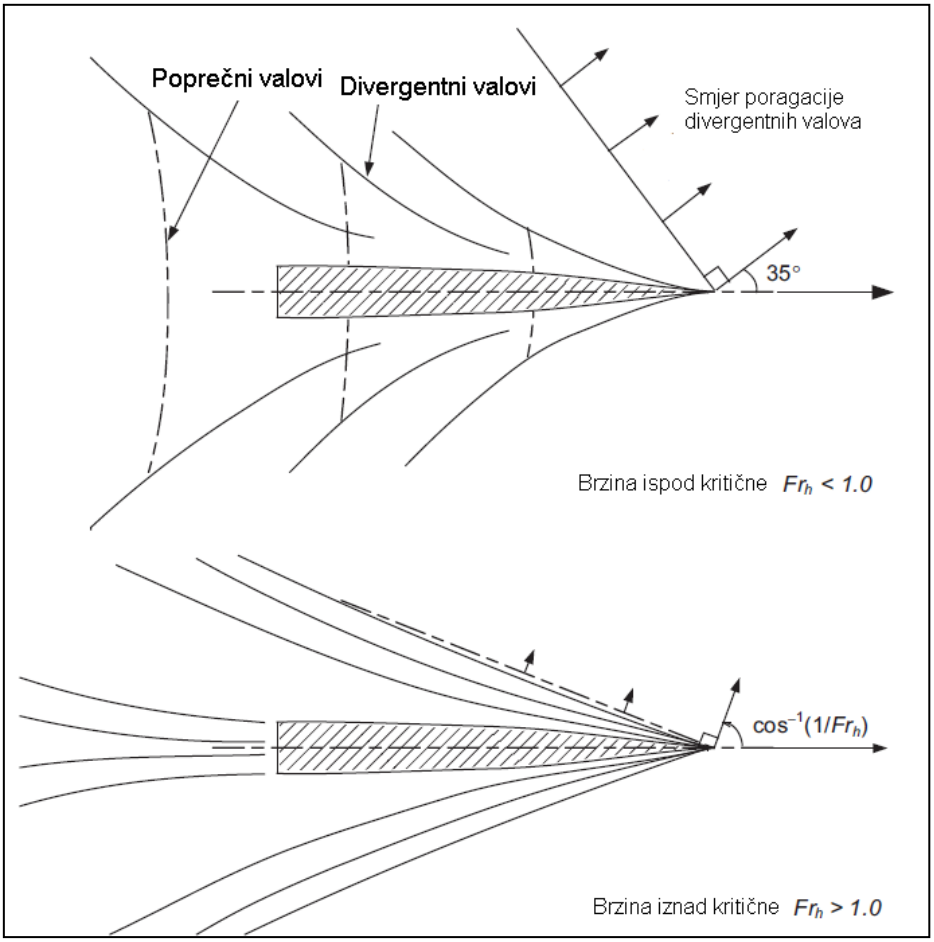
$$c = \sqrt{g \cdot h}\,. \qquad [4]$$

Tada brzina valova ovisi o dubini vode, a valovi različite duljine se propagiraju istom brzinom. Kao dobar pokazatelj utjecaja ograničene dubine na otpor valova broda koristi se *Froudeov* broj dubine.[77]

$$Fr_h = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}\,. \qquad [5]$$

Brzine u rasponu $0{,}90 < Fr_h < 1{,}1$ klasificiraju kao kritične brzine.

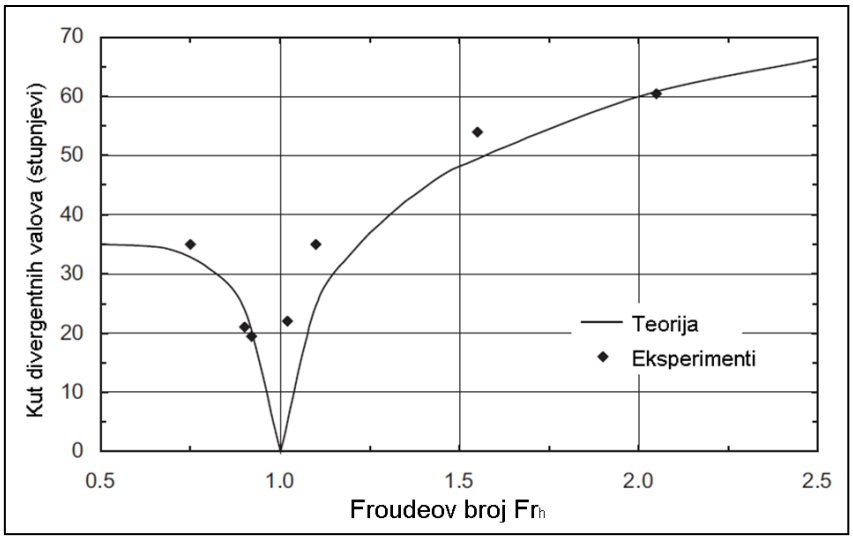
Sustav valova pri brzinama ispod kritične prikazan je na slici 14, s poprečnim (transverzalnim) valovima i razilaznim (divergentnim) valovima koji se kreću iza broda pod kutom od približno 35°. Kako se brzina broda približava kritičnoj, kut valova se približava kutu od 90° u odnosu na simetralu broda. Na brzinama iznad kritične dolazi ponovno do stvaranja divergentnih valova pod kutom od $\cos^{-1}(1/Fr_h)$ bez poprečnih valova, kako je prikazano na slici 14.



Slika 14: Uzorak valova ispod i iznad kritične brzine broda
(Izvor: Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge University Press)

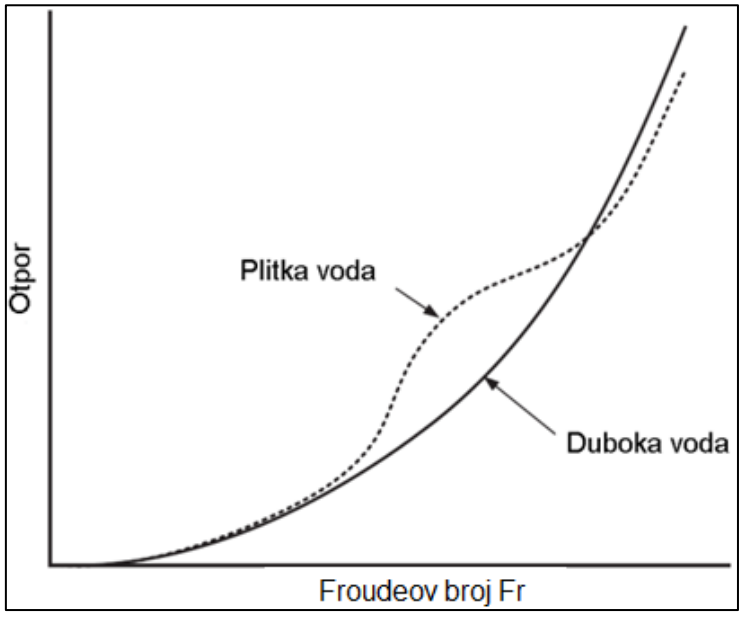
[77]Hanson, H. (2004). *Hydraulics of Open Channel Flow* (2nd Edition) Elsevier. Butterworth-Heinemann, str 265.

Gravitacijski val ne može putovati brzinom većom od $c > \sqrt{g \cdot h}$, tako da poprečni valovi zaostaju iza broda, te ostaju samo divergentni valovi. Promjena u kutu divergentnih valova u odnosu na brzinu prikazana je na grafikonu 1.



Grafikon 1: Promjena kuta divergentnih valova u odnosu na brzinu broda
(Izvor: Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011*). Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power.* Cambridge University Press)

Kada je brzina plovidbe približna kritičnoj brzini dolazni do značajnijeg otpora valova. Na grafikonu 2 prikazan je utjecaj plitke vode na krivulju otpora. U praksi, najveći utjecaj nastaje kada je brzina broda otprilike od 0,96 do 0,98 kritične brzine.[78]



Grafikon 2: Utjecaj plitke vode na krivulju otpora
(Izvor: Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge University Press)

[78]Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). *Ship resistance and propulsion: practical estimation of propulsive power*. Cambridge University Press.

2.4.4. Utjecaj ruba plovnog puta

Utjecaj ograničene širine plovnog puta je sličan utjecaju opisanome za utjecaj plitke vode, međutim puno izraženiji.

Korekcija brzine za utjecaj ograničenog plovnog puta je pogodna za brzine koje iznose 0,7 kritične brzine. Često korišten faktor korekcije autora *Lackenbya*, koji je preporučen od strane ITTC[79]-a, može se odrediti prema izrazu:[80]

$$\frac{\Delta V}{V} = 0{,}1242\left[\frac{A_M}{h^2} - 0{,}05\right] + 1 - \left[\tanh\left(\frac{g \cdot h}{V^2}\right)\right]^{0{,}5}, \qquad [6]$$

gdje su:

V – brzina (m/s)

ΔV – gubitak brzine zbog utjecaja plitke vode (m/s)

A_M – poprečni presjek uronjenog dijela broda (m^2)

h – dubina vode (m).

Zbog promjene u gazu i trimu broda, valova i ostalih nelinearnih učinaka, navedeni izraz se ne može koristiti za veće brzine. Eksperimentalni i teoretski podatci, poput onih u grafikonu 3 daju neke smjernice za brodove većih brzina, koji prikazuju veće otpore i gubitke brzine u plitkoj vodi. Izraz [7] i grafikon 3 su vrlo učinkoviti za plitku vodu neograničene širine. Korekcije brzine za plitku vodu ograničene širine dao je *Landweber*, na temelju pokusa za ograničene plovne putove pravokutnog oblika. Približna korekcijska krivulja za ograničena plovna područja glasi:[81]

$$\frac{Vh}{V\infty} = 1 - 0{,}09\left[\frac{\sqrt{A_M}}{R_H}\right]^{1{,}5}, \qquad [7]$$

gdje su:

A_M – poprečni presjek uronjenog dijela broda (m^2)

$V\infty$ – brzina broda u dubokoj vodi (m/s)

Vh – brzina broda u vodi dubine h (m/s)

R_H – hidraulički radijus (omjer površine poprečnog presjeka plovnog puta i zbroja poprečnog opsega uronjenog dijela broda i plovnog puta).[82]

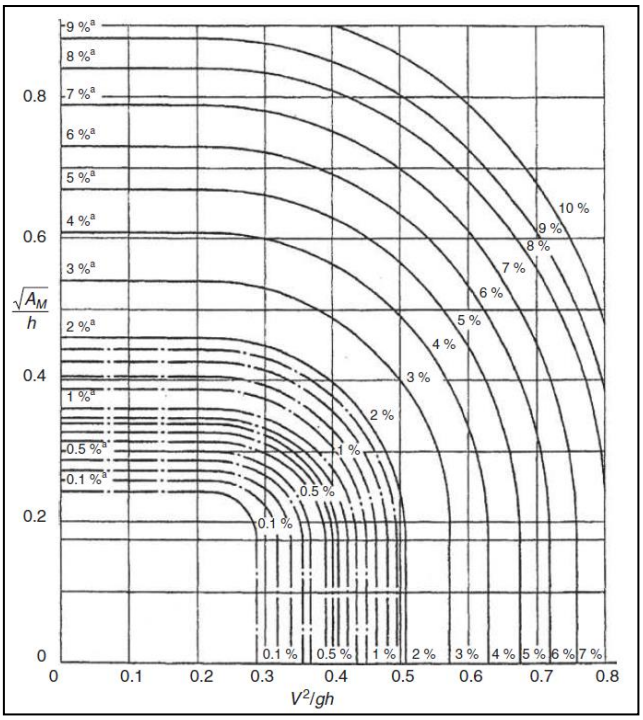
$$R_H = b \cdot h / (b + 2h) \qquad [8]$$

[79]ITTC – engl. International Towing Tank Conference

[80]Lackenby, H. (1963). *Note on the Effect of Shallow Water on Ship Resistance*. BSRA Report No. 377.

[81]Landweber, L. (1939). *Tests on a Model in Restricted Channels*. EMB Report 460.

[82]Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011*). Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge University Press.



Grafikon 3: Gubitak brzine u postotcima zbog utjecaja plitke vode
(Izvor: Lackenby, H. (1963). *The Effect of Shallow Water on Ship Speed. Shipbuilder and Marine Engine Builder*. Vol. 70.)

Kako se povećava širina plovnog puta *b*, hidraulički radijus R_H teži prema dubini *h*. Kad se brod nalazi u plovnom putu pravokutnog presjeka tada izraz za hidraulički radijus glasi:[83]

$$R_H = (b \cdot h - A_M)/(b + 2h + p_v), \qquad [9]$$

gdje je:

p_v – poprečni opseg uronjenog dijela trupa broda na glavnom rebru (m^2).

Ako je R_H jednak *h* (s neograničenom širinom plovnog puta) tada vrijedi izraz [9] i grafikon 3, u slučaju da je $\sqrt{A_M / h} = 0{,}70$, $V^2 / g \cdot h = 0{,}36$ i $Fr_h = 0{,}60$.

2.4.5. Dodatni zagažaj broda uzrokovan međudjelovanjem s dnom

Kada brod plovi u području ograničene dubine dolazi do ubrzanog protoka vode ispod kobilice broda te posljedično do pada tlaka. Taj pad tlaka dovodi do dodatnog zagažaja, kao i do promjene trima broda.

Najčešće korištene izraze za izračun dodatnog urona uslijed međudjelovanja s dnom razvili su *Tuck, Huuska/Guli, ICORELS, Romisch, Yoshimura* i *Barrass.*

Tuckov izraz razvijen je 1966. godine,[84] a 1970. godine izraz je dopunjen.[85] Oba izraza se koriste za izračun dodatnog zagažaja na pramcu broda. Godine 2002. izraz je preporučen za

[83]Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge University Press.

[84]Tuck. E.O. (1966): *Shallow Water Flows Past Slender Bodies*. J. Fluid Mech., 26, str. 81-95

[85]Tuck, E.O., Taylor, P.J. (1970): *Shallow Water Problems in Ship Hydrodynamics*, Proceedings 8th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena.

izračun dodatnog zagažaja riječnih brodova za prijevoz suhih rasutih tereta u dijelovima plovnog puta St. Lawrence.[86] Predloženi izrazi za izračun dodatnog zagažaja na pramcu su:

$$S_b = (C_Z + C_\theta) \cdot \frac{\nabla}{Lpp^2} \cdot \frac{Fr_h^2}{\sqrt{1 - Fr_h^2}}, \qquad [10]$$

$$S_b = 1{,}46 \cdot \frac{\nabla}{Lpp^2} \cdot \frac{Fr_h^2}{\sqrt{1 - Fr_h^2}} \cdot Ks + 0{,}5 Lpp \cdot \sin\left\{ \frac{\nabla}{Lpp^3} \cdot \frac{Fr_h^2}{\sqrt{1 - Fr_h^2}} \cdot Ks \right\}, \qquad [11]$$

gdje su:

C_Z i C_θ – koeficijenti na temelju karakteristika trupa broda

∇ – volumen uronjenog dijela trupa broda, (m^3)

K_S – korekcijski faktor na temelju tip ograničenog plovnog puta.

Huuska/Guliev izraz je kombinacija proračuna za dodatan zagažaj i trim u neograničenim plovnim putovima.[87] Preporučeni izraz se koristi za izračun dodatnog zagažaja na pramcu. Predloženi izraz koriste FMA (*Finnish Maritime Administration*) i španjolski ROM-a izračun dodatnog zagažaja. Ne preporuča se koristiti u slučaju da je brzina broda veća od 0,7 od kritične brzine. Predloženi izraz glasi:

$$S_b = Cs \cdot \frac{\nabla}{Lpp^2} \cdot \frac{Fr_h^2}{\sqrt{1 - Fr_h^2}} \cdot Ks_p, \qquad [12]$$

gdje su:

Cs – konstanta za izračun dodatnog zagažaja. Vrijednost konstante koja se koristi je 2,40

Ks_p – bezdimenzionalni faktor tipa plovnog puta. Određuje se na sljedeći način:

$$Ks_p = \begin{cases} 7{,}45 s_1 + 0{,}76 & s_1 > 0{,}03 \\ 1{,}0 & s_1 \leq 0{,}03 \end{cases}$$

s_1 – bezdimenzionalni faktor tip plovnog puta

$s_1 = 0{,}03$ *Plovni put neograničene širine*

$s_1 = \frac{R_H}{K_1}$ *Plovni put s uronjenim bočnim rubom*

$S_1 = R_H$ *Umjetni plovni putovi (kanali)*

K_1 – korekcijski faktor koji predstavlja omjer dubine vode i visine uronjenog bočnog ruba plovnog puta.

[86]Stocks, D.T., Dagget, L.L., Page, Y. (2002): *Maximization of the ship draft in the St. Lawrence Seaway Volume I; Squat Study*. Prepared for Transportation Development Centre, Transport Canada, June.

[87]Hooft, J. P. (1974). *The Behaviour of a Ship in Head Waves at Restricted Water Depth*. International Shipbuilding Progress, 244(21), str. 367.

ICORELS izraz je razvijen od strane „*International Commission for the Reception of Large Ships*“[88] za izračun dodatnog zagažaja na pramcu, koristeći ranije preporučene teorije za proračun dodatnog zagažaja broda autora *Huuska/Guliev* i *Tucka*. Izraz se preporuča koristi samo za neograničene plovne putove, a glasi:

$$S_b = Ck \cdot \frac{\nabla}{Lpp^2} \cdot \frac{Fr_h^{\,2}}{\sqrt{1 - Fr_h^{\,2}}}, \qquad [13]$$

gdje je:

Ck – korekcijski faktor koji se određuje na sljedeći način:

$$Ck = \begin{cases} 1{,}7 & C_B < 0{,}70 \\ 2{,}0 & 0{,}70 \le C_B < 0{,}80 \\ 2{,}4 & C_B \ge 0{,}80 \end{cases}$$

Romischev izraz je razvijen na modelima brodova testiranim u bazenima, za izračun dodatnog zagažaja broda na pramcu i krmi broda.[89] Izraz se može koristiti za sve konfiguracije plovnih putova (neograničene, ograničene i kanale).

Dodatni zagažaj na pramcu:

$$S_b = C_{kor} \cdot C_F \cdot K_{\Delta T} \cdot T\,. \qquad [14]$$

Dodatni zagažaj na krmi:

$$S_s = C_{kor} \cdot K_{\Delta T} \cdot T\,, \qquad [15]$$

gdje je:

C_{kor} – korekcijski faktor brzine broda

$$C_V = 8\left(\frac{V}{Vcr}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{V}{Vcr} - 0{,}5\right)^4 + 0{,}0625\right], \qquad [16]$$

C_F – korekcijski faktor oblika trupa broda

$$C_F = \left(\frac{10 C_B}{Lpp / B}\right)^2. \qquad [17]$$

Kad je faktor $C_F = 1$ dodatni zagažaj je na krmi, a kad je $C_F > 1$ dodatni zagažaj je na pramcu.

$K_{\Delta T}$ – korekciji faktor za kritičnu brzinu broda

$$K_{\Delta T} = 0{,}155\sqrt{h/T} \qquad [18]$$

[88]ICORELS (International Commission for the Reception of Large Ships) (1980). *Report of Working Group IV*, PIANC Bulletin No. 35, Supplement.

[89]Romisch, K. Fuhrer (1977): *Section I – Inland Navigation*, Subject 3. PIANC Congress, Leningrad, str. 80.

Izraz autora *Yoshimura* je razvijen na temelju testiranja modela brodova u bazenima,[90] a dodatno je razvijen od strane japanskog Ministarstva pomorstva i infrastrukture[91] za izračun dodatnog zagažaja broda pri projektiranju plovnih putova u Japanu. Izraz glasi:

$$S_b = \left[\left(0{,}7 + 1{,}5 \frac{1}{h/T} \right) \cdot \left(\frac{C_B}{lpp/B} \right) + 15 \frac{1}{h/T} \cdot \left(\frac{C_B}{Lpp/B} \right)^3 \right] \cdot \frac{V^2}{g}, \qquad [19]$$

gdje je:

$V_{m/s}$ – brzina broda (m/s).

Barrassov izraz se koristi za izračun najvećeg dodatnog zagažaja broda, bilo na pramcu ili krmi. Izraz se razvijao od 1979. godine,[92, 93, 94] a unaprjeđenja su napravljena 2002. i 2004. godine.[95, 96] Posljednja inačica izraza je ona iz 2009. godine.[97] Ovo je jedan od najkorištenijih izraza, iz razloga što se može koristiti za sve vrste plovnih putova (neograničene, ograničene i kanale) te izračunava dodatan uron bilo na pramcu ili krmi ovisno o formi trupa broda. Izraz glasi:

$$S_b = \frac{C_B \cdot S^{0{,}81} \cdot V^{2{,}08}}{20}, \qquad [20]$$

gdje su:

S – omjer poprečne površine uronjenog dijela broda i poprečne površine plovnog puta

$V_{čv}$ – brzina broda (čv).

U slučaju da je C_B veći od 0,7 najveći dodatni zagažaj će se dogoditi na pramcu broda, a u slučaju da je C_B manji od 0,7 na krmi broda.

[90] Yoshimura, Y. (1986): *Mathematical Model for the Manoeuvring Ship Motion in Shallow Water*. Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 200.

[91] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), Japan (2009): *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japa*n (2007), OCDI.

[92] Barrass, C.B. (1979): *A Unified Approach to Squat Calculations for Ships*. PIANC Bulletin 32, str. 3-10.

[93] Barrass, C.B. (1994a*): Further Discussion on Squat*. Seaways, March.

[94] Barrass, C.B. (1994b): *Change of Trim as a Ship Squats*. Seaways, October, str. 30-32.

[95] Barrass, C.B. (2002): *Ship Squat – A Guide for Masters*. Private report, www.ship-squat.com.

[96] Barrass, C.B. (2004): *Thirty-Two Years of Research into Ship Squat*. Squat Workshop 2004, Elsfleth/Oldenburg.

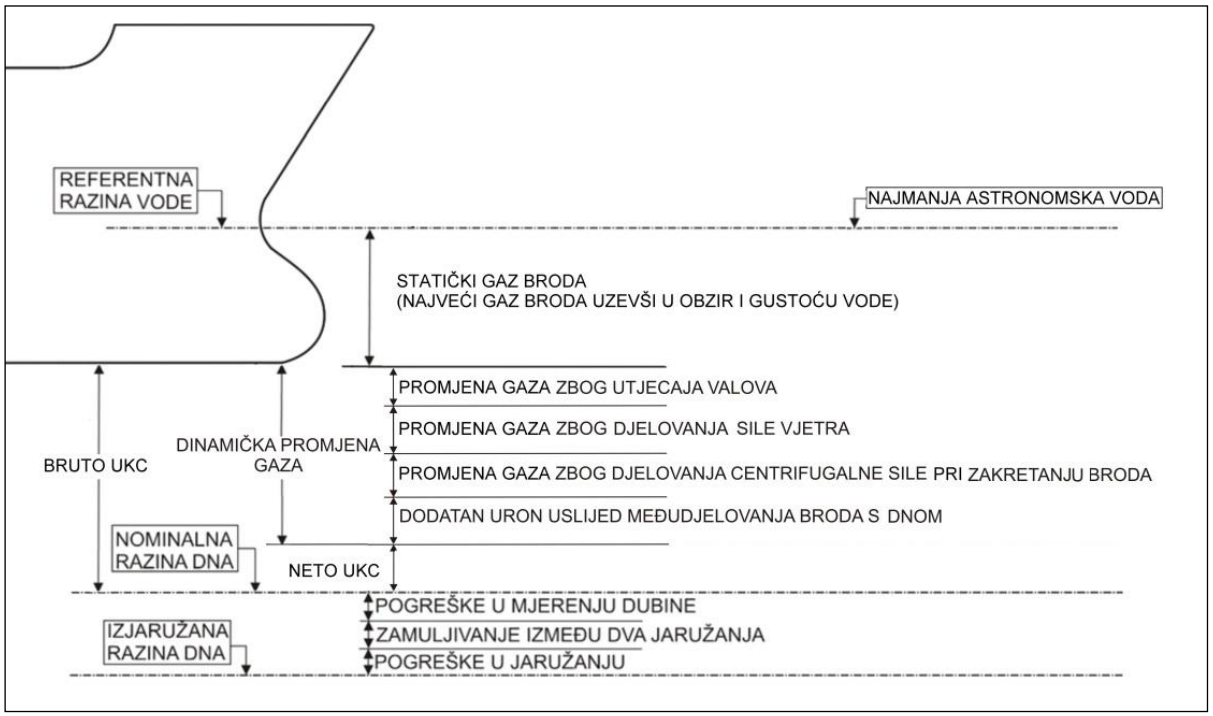
[97] Barrass, C.B. (2009): *Ship Squat and Interaction*. Whitersby Publishing & Seamanship, Livingston.

3. ANALIZA DUBINE PLOVNOG PUTA

Analizu dubine plovnog puta, s aspekta sigurnosti plovidbe, promatra se sa stajališta novog i postojećeg plovnog puta. Kod novog plovnog puta, dubinu je potrebno prilagoditi već unaprijed definiranoj veličini brodova, dok je kod postojećeg plovnog puta potrebno definirati veličine brodova prema dostupnoj dubini.

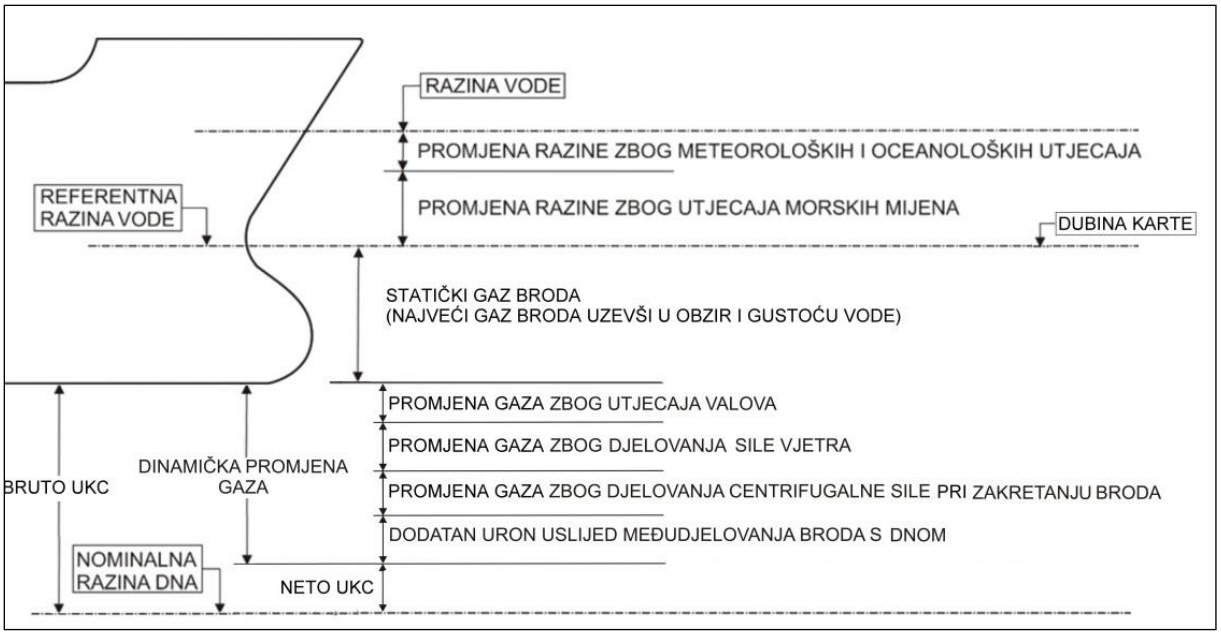
Kod projektiranja dubine novog plovnog puta, polazna razina je referentna razina vode. Da bi se odredila potrebna razina nominalnog dna, potrebno je još uzeti u obzir statički gaz broda, dinamičku promjenu gaza broda koju čine promjena gaza zbog utjecaja valova, promjena gaza zbog djelovanja sile vjetra, promjena gaza zbog djelovanja centrifugalne sile pri zakretanju broda, dodatan uron uslijed međudjelovanja broda i dna, te neto UKC.[98] Nominalnu razinu dna potrebno je korigirati te uračunati pogreške u mjerenju dubine, zamuljivanje između dvaju jaružanja i moguće pogreške prilikom jaružanja (Slika 15).

Kod određivanja trenutne dubine postojećeg plovnog puta u eksploataciji, polazi se od razine vode u koju je uračunata promjena zbog utjecaja morskih mijena te promjena zbog meteoroloških i oceanoloških utjecaja. Do razine nominalnog dna potrebno je uračunati statički gaz broda i bruto UKC u koji spadaju dinamičke promjene gaza broda i neto UKC (Slika 16).



Slika 15: Raščlamba elemenata sigurne dubine pri projektiranju novog plovnog puta

[98]UKC – engl. *Under Keel Clearance*, preostala dubina ispod kobilice broda.



Slika 16: Raščlamba elemenata sigurne dubine postojećeg plovnog puta u eksploataciji

3.1. Definiranje referentne razine vode

Referentna razina vode predstavlja polaznu razinu za određivanje sigurne dubine plovnog puta, bilo novog ili postojećeg. Međutim, postupak definiranja referentne razine vode i konačne dubine plovnog puta, razlikuju se u fazi projektiranja i eksploatacije plovnog puta.

Kod projektiranja plovnog puta, referentna razina vode u većini slučajeva predstavlja najmanju astronomsku vodu.

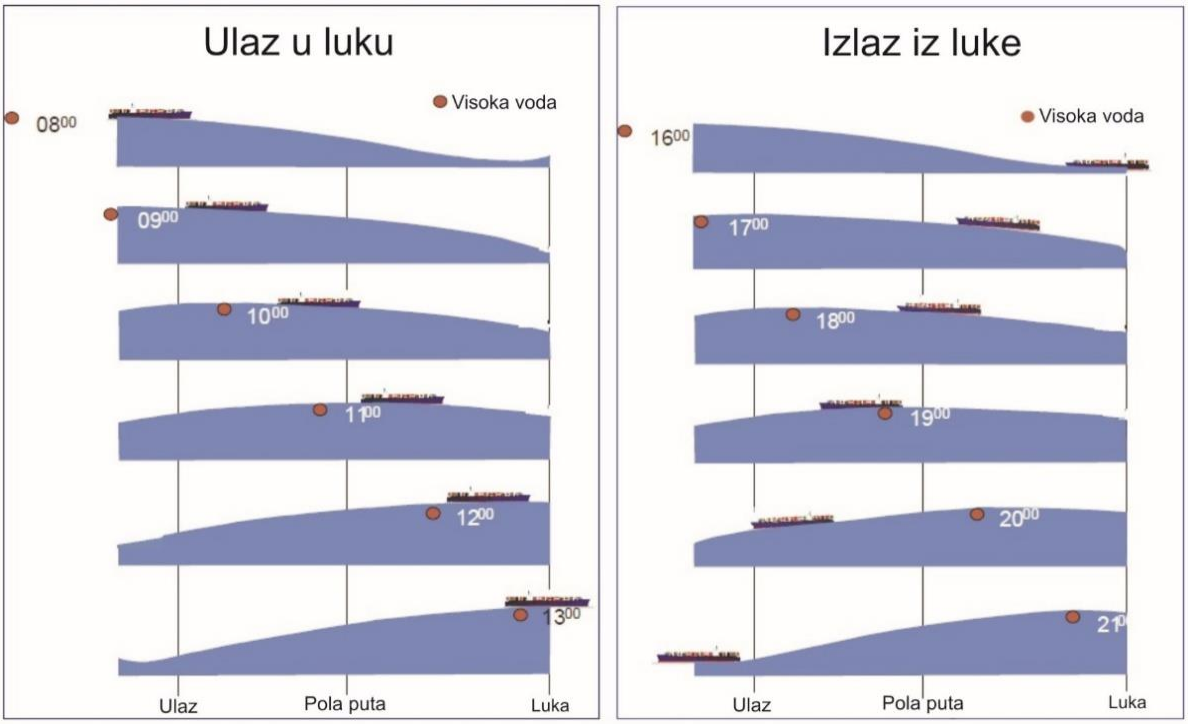
Kod definiranja raspoložive dubine postojećeg plovnog puta, referentna razina vode je dubina karte. Na kartama HHI-a,[99] dubina se mjeri od srednje razine nižih niskih voda živih morskih mijena koja predstavlja hidrografsku nulu. Međutim, kod definiranja dubine postojećeg plovnog puta potrebno je uračunati promjenu razine vode zbog utjecaja morskih mijena, te zbog meteoroloških i oceanoloških utjecaja.

Razina morskih mijena određuje se koristeći tablice morskih mijena. U slučaju velike razlike između razine visoke i niske vode potrebno je odrediti vrijeme raspoloživosti plovnog puta za brodove velikog gaza. Na slici 17 je prikazan primjer korištenja plimnog vala prilikom ulaska i izlaska iz luke. Kod ulaska u luku brod kreće u vrijeme nastupa visoke vode te prati plimni val do ulaza u luku. U drugom slučaju brod izlazi iz luke gdje ima dovoljno dubine u vrijeme niske vode, suprotno od smjera kretanja plimnog vala. U tom slučaju brod će naići na plimni val u prilaznom plovnom putu, što će mu omogućiti dovoljnu dubinu i sigurnu plovidbu do otvorenog mora. Međutim, ovo neće biti moguće u slučaju dužeg plovnog puta ili prejakih struja morskih mijena, što može dovesti do ograničenja plovidbe i vremena prilaza luci u određenim periodima morskih mijena, čime izravno utječe vrijeme raspoloživosti plovnog puta.

U meteorološke i oceanološke utjecaje mogu se nabrojiti djelovanje vjetra, valova i atmosferskog tlaka. Dugotrajni (približno od 4 do 5 dana) niski ili visoki tlak zraka u prosjeku

[99]HHI – Hrvatski hidrografski institut

povećava ili smanjuje razinu mora za 1 cm za svaki hPa (mbar), a vjetar i valovi mogu pojačati taj efekt u zatvorenim bazenima.



Slika 17: Primjer ulaza i izlaska iz luke za vrijeme visoke vode
(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014)

3.2. Statički gaz broda

Nakon završetka operacija s teretom, brod će imati konačan statički gaz. Najveći statički gaz broda ovisit će o trimu i bočnom nagibu. Međutim, najveći statički gaz broda može varirati tijekom plovidbe zbog na primjer potrošnje goriva i zaliha, balastiranja, itd.

Do promjene statičkog gaza broda može doći i zbog promjene u gustoći vode. Ako brod uplovi u vodu manje gustoće, doći će do proporcionalnog povećanja gaza broda. Gaz broda će se u prosjeku povećati za 2 – 3 %[100] u slatkoj vodi u odnosu na morsku vodu. Izraz za izračun dodatnog urona broda u slatkoj vodi glasi:

$$FWA = \frac{D}{40 \cdot TPC}, \qquad [21]$$

gdje su:

FWA – dodatan uron broda u slatkoj vodi (engl. *Fresh Water Allowance*) (cm)

D – deplasman broda (t)

TPC – zagažaj broda (t/cm).

[100] *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

Izraz za izračun dodatnog urona broda u slankastoj vodi glasi:

$$DWA = \frac{FWA \cdot (1{,}025 - \rho)}{1{,}025 - 1{,}000}, \qquad [22]$$

gdje su:

DWA – dodatan uron broda u slankastoj vodi (engl. *Fresh Water Allowance*) (cm)

FWA – dodatan uron broda u slatkoj vodi (engl. *Fresh Water Allowance*) (cm)

ρ – gustoća slankaste vode (t/m^3).

3.3. Dinamička promjena gaza broda

Na dinamičku promjenu gaza broda uvelike utječu neupravljive i djelomično upravljive sile. U neupravljive sile koje uzrokuju promjenu gaza ubrajaju se sile vjetra, valova i promjena gaza zbog djelovanja centrifugalne sile pri zakretanju broda, dok se u djelomično upravljive sile ubrajaju sile međudjelovanja između trupa broda i dna. Na neupravljive sile navigator nema utjecaja, dok se kod djelomično upravljivih sila djelovanjem na brzinu broda utječe na veličinu sila međudjelovanja koje se u promatranom slučaju javljaju između broda i dna te broda i obale.

3.3.1. Dodatni zagažaj broda

Dodatni zagažaj broda (engl. *squat*) i promjena trima broda zbog međudjelovanja s dnom je stalan uron broda koji se sastoji od pravocrtnog pomaka (uronuća) i rotacije (promjena trima) zbog strujanja vode uz trup broda. Ograničena dubina i širina plovnog puta dodatno povećavaju utjecaj dodatnog zagažaja. Tok vode uz trup broda uzrokuje promjenu hidrodinamičkog tlaka oko trupa broda.[101] Taj fenomen uzrokuje vertikalnu silu koja rezultira dodatnim zagažajem broda i uzdužnim momentom koji uzrokuje promjenu trima broda. Pritom se dodatni zagažaj može manifestirati paralelnim uronućem broda i promjenom trima broda.

Kod brodova punije forme, kao na primjer tankera ili brodova za prijevoz rasutih tereta, najveći dodatni zagažaj javlja se na pramcu, dok se kod brodova finijih formi, kao na primjer putničkih brodova i brodova za prijevoz kontejnera, najveći dodatni zagažaj javlja na krmi broda. Prema autoru *Barrassu* veličina koeficijenta punoće deplasmana broda (C_B) utječe na to da li će e najveći dodatni zagažaj broda javiti na pramcu ili krmi.[102] Brodovi s $C_B \approx 0{,}7$, će paralelno uronuti, brodovi s $C_B < 0{,}7$ (npr. brodovi za prijevoz kontejnera) imat će najveći dodatni zagažaj na krmi, dok brodovi s $C_B > 0{,}7$ (npr. tankeri i brodova za prijevoz rasutih tereta) imat će najveći dodatni zagažaj na pramcu. Slično pravilo je dao i *Romisch*, koji navodi da će brod imati najveći dodatni zagažaj na krmi ako je $C_B = 0{,}1\frac{Lpp}{B}$.[103]

Osim navedenog, o tome hoće li će najveći dodatni uron nastati na pramcu ili krmi broda ovisi i o trimu. Prema autoru *Barrassu* brodovi s velikim početnim trimom imaju najveći

[101]Newman, J. N. (1977). *Marine Hydrodynamics*. MIT Press.

[102]Barrass, B. (2004). *Ship Design and Performance for Masters and Mates*. Butterworth-Heinemann.

[103]Römisch, K. (1993): *Der Squat in Begrenzten Fahrwassern Betrachtung aus Hydromechanischer Sicht*. Schiff & Hafen / Seewirtschaft, Heft 10, str. 58-62.

dodatni zagažaj na dijelu broda s najvećim uronom.[104] Međutim, posljednja istraživanja pokazuju da je dinamički trim broda, funkcija statičkog gaza i trima broda.[105] Zaključak je donesen na temelju opširnih mjerenja na *Postpanamax* brodovima za prijevoz kontejnera i brodovima za prijevoz rasutih tereta na rijekama Wesser i Elba u Njemačkoj. Istraživanje je pokazalo da brod može imati jedan statički trim, a potpuno suprotnu promjenu dinamičkog trima. Većina mjerenja u ovom istraživanju je izvedena na brodovima s novijim krmenim zrcalima koji su širi od ranije generacije brodova, što rezultira većim uzgonom na krmi broda te može utjecati na dinamički trim broda.

Koliki će biti dodatni zagažaj ovisi o karakteristikama broda i konfiguraciji plovnog puta. Neke od značajnijih karakteristika broda koje djeluju na dodatni zagažaj uključuju gaz broda, brzinu broda i oblik trupa koji se za potrebe izračuna procjenjuje koeficijentom punoće deplasmana. Međutim, najvažnija karakteristika je brzina broda, koja je u ovom slučaju izražena brzinom kretanja kroz vodu (relativna brzina). Općenito, dodatni zagažaj je približno proporcionalan kvadratu brzine broda što znači da dvostruko povećanje brzine broda dovodi do četverostrukog povećanja dodatnog zagažaja.

Ostale karakteristike broda koje mogu djelovati na dodatni zagažaj uključuju duljinu između okomica *Lpp* i širinu broda *B*. Šire krmeno zrcalo i bulb na pramcu također utječu na dodatni zagažaj broda, jer su ta dva dijela najistureniji dijelovi broda. Velik broj ranih mjerenja dodatnog zagažaja su bili razvijeni za brodove koji nisu imali bulb, dok se kod novijih brodova u većini slučajeva ugrađuje bulb, prvenstveno da bi se smanjio otpor. Novija krmena zrcala su šira nego prije, te s povećanjem gaza utječu na dodatni zagažaj.[106]

Glavni faktori plovnog puta koji utječu na veličinu dodatnog zagažaja su blizina ruba plovnog puta i dna, a prikazani su dubinom i poprečnim presjekom. Ako brod nije u plitkoj vodi male dubine ispod kobilice, utjecaj dodatnog zagažaja je često zanemariv. Odnos dubine vode i gaza broda (*h/T*) veći od 1,5 se smatra dovoljnom dubinom da se utjecaj dodatnog zagažaja ne smatra opasnim. Brod će imati utjecaj dodatnog zagažaja i u dubljem moru, međutim on je malen, a more je dovoljno duboko tako da nema rizika od dodira dna.

Ograničeni plovni putovi mogu se podijeliti u dvije osnove kategorije: plovni put ograničene dubine i neograničene širine (Slika 18a), te plovni put ograničene dubine i širine. (Slika 18b). Plovni put ograničene dubine i neograničene širine su uobičajeno šira područja u blizini otvorenog mora.

Općenito, pod neograničene plovne mogu se klasificirati plovni putovi koji su približno široki više od 8 širina broda.[107] Plovni put ograničene dubine i širine je specifičan tip ograničenog plovnog puta. Rijetki su i služe kao premosnica između dviju velikih vodenih masa. Tipičan primjer su Sueski kanal, Panamski kanal i Kielski kanal. Rubovi ograničenih plovnih putova i kanala su često idealizirani kao jednoličan pokos, dok u stvarnosti mogu biti stepenasti što sprječava eroziju zbog utjecaja valova.

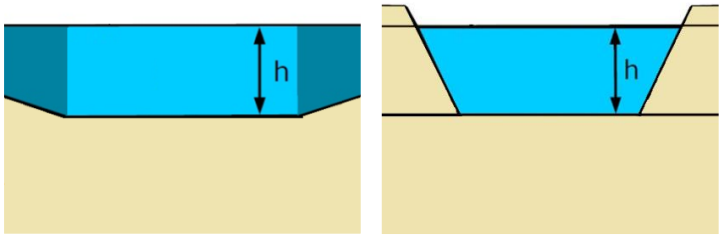
---

[104]Barrass, C. B. (2002). *Ship squat–A Guide for Masters*. Private report, www. shipsquat. com.

[105]Härting, A. Laupichler, A., Reinking, J. (2009): *Considerations on the Squat of Unevenly Trimmed Ships*, Ocean Engineering, Elsevier, 36, str. 193-201.

[106]Uliczka, K., & Kondziella, B. (2006). *Dynamic Response of Very Large Containerships in Extremely Shallow Water*. In Proceedings of the 31st PIANC Congress..

[107]*Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.



Slika 18: Presjeci dvaju osnovnih vrsta ograničenih plovnih putova

Na kraju, mnogi stvarni plovni putovi su kombinacija ovih dvaju plovnih putova jer jedna strana plovnog puta može imati karakteristike neograničenog plovnog puta, a druga strana ograničenog plovnog puta. Većina PIANC-ovih empirijskih izraza se bazira na tome da brodovi plove sredinom simetričnog plovnog puta.

Froudeov broj dubine (Fr_h) je kombinacija karakteristika broda i plovnog puta te je bitan bezdimenzionalni parametar koji predstavlja mjeru otpora broda pri plovidbi u plitkoj vodi i funkcija je brzine broda i dubine vode. Definira se izrazom [5].

Kad Fr_h dosegne jedan, dostignuta je efektivna granica brzine jer je otpor kretanja toliki da brod ne može postići veću brzinu. Općenito, Fr_h iznosi 0,6 za tankere i 0,7 za brodove za prijevoz kontejnera.[108] Utjecaj ruba plovnog puta na Fr_h za plovne putove ograničene dubine i neograničene širine te plovne putove ograničene dubine i širine, može se računati uzimajući u obzir faktor odnosa presjeka *S* i geometriju broda.[109]

Velik broj istraživanja dodatnog zagažaja broda razmatra samo nepromijenjeno stanje gdje je brzina broda konstanta (nema ubrzanja), a plovni put se smatra ravnim bez promjena u konfiguraciji i batimetriji. Ipak, dodatni zagažaj se mijenja pri prijelazu iz dubljeg u plići dio plovnog puta ili kad brod ubrzava ili usporava. Zavojiti dijelovi plovnog puta i blizina ruba plovnog puta povećavaju dodatni zagažaj, dok muljevito dno smanjuje utjecaj dodatnog zagažaja. Drugi brodovi u blizini (pretjecanje ili mimoilaženje) mogu povećati utjecaj dodatnog zagažaja.

Izvještaj PIANC WG 30[110] iz 1997. godine je uključivao šest izraza i jednu grafičku metodu za izračun utjecaja dodatnog zagažaja, koje je predložilo sedam autora za procjenu dodatnog zagažaja. Izrazi su se temeljili na istraživanjima modela i mjerenjima na brodovima, za razne plovne putove i različita stanja nakrcanosti. Razvijen je i računalni program[111] kao dio alata za procjenu dodatnog zagažaja na temelju dimenzija broda, brzine i konfiguracije plovnog puta. U tablici 15 prikazani su autori koji su predložili empirijske izraze za izračun dodatnog zagažaja, te konfiguracije plovnih putova na kojima se mogu primijeniti. Svi izrazi daju vrijednost najvećeg dodatnog zagažaja, većinom za pramac. Samo izrazi autora *Barrassa* i

[108] *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

[109] Eloot, K., Verwilligen, J., Vantorre, M. (2008): *An Overview of Squat Measurements for Container Ships in Restricted Water*. In: International conference on Safety and Operations in Canals and Waterways, Glasgow, UK, Varyani, K. ed. University of Strathclyde Glasgow and University of Glasgow, Sep 15, str. 106-116.

[110] PIANC, A. C. (1997). *A Guide for Design.* Final Report of the Joint PIANCIAPH Working Group II-30 in cooperation with IMPA and IALA, Supplement to Bulletin, (95).

[111] Briggs, M.J., Silver, A. L., Borgman, L. E. (2006): *Risk-Based Predictions for Ship Underkeel Clearance*, ICCE 2006, San Diego.

Romischa daju izričito dodatni zagažaj i za krmu. Svaki izraz ima određena ograničenja koje je potrebno uvažiti pri korištenju, a uobičajeno se temelje na tipu broda i plovnog puta.

Tablica 15: Autori empirijskih izraza predloženih za izračun dodatnog zagažaja na temelju konfiguracije plovnog puta prema PIANC-u

Autor izraza za izračun dodatnog zagažaja broda	Konfiguracija plovnog puta		
	Neograničeni	Ograničeni	Kanal
Tuck (1966)	DA	DA	DA
Huuska/Guliev (1976)	DA	DA	DA
ICORELS (1980)	DA	(DA)	NE
Barrass (2002)	DA	DA	DA
Romisch	DA	DA	DA
Yoshimura (1986)	DA	DA	DA
Samo izrazi autora *Barrassa* i *Romischa* predviđaju dodatni zagažaj na krmi broda.			

(Izvor: PIANC, A. C. (1997). *A Guide for Design*. Final Report of the Joint PIANCIAPH Working Group II-30 in cooperation with IMPA and IALA, Supplement to Bulletin, (95))

3.3.2. Promjena gaza broda zbog djelovanja centrifugalne sile pri zakretanju broda

Općenito, kut nagiba broda pri okretu je funkcija kuta otklona kormila broda, brzine broda i metacentarske visine. U prvoj fazi kruga okreta brod se naginje prema strani otklona kormila zbog nagibnog momenta. U drugoj fazi kruga okreta, taj nagib brzo mijenja smjer na suprotnu stranu zbog djelovanja centrifugalne sile i doseže svoj najveći kut ϕ_{MAX}. Brod u trećoj fazi kruga okreta doseže svoj ustaljeni nagib ϕ_C, koji se može odrediti sljedećim izrazom:[112]

$$\phi_C = \frac{l_R \cdot U_C{}^2}{g \cdot R_C \cdot \overline{M_0 G}}, \qquad [23]$$

gdje su:

$l_R = \overline{KG} - \frac{T}{2}$ – poluga nagibnog momenta zbog okretanja broda (m)

$\overline{M_0 G}$ – početna poprečna metacentarska visina broda (m)

U_C – brzina broda kod ustaljenog radijusa kruga okreta broda (čv)

R_C – radijus ustaljenog kruga okreta broda (milja).

[112] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*.

U slučaju da nisu dostupni točni podatci o poprečnoj stabilnosti za konkretan brod, mogu se koristiti sljedeći izrazi za procjenu vrijednosti traženih podataka.

$\overline{KG}$ se može izraziti:

$$\overline{KG} = \overline{KM}_0 - \overline{M_0G}, \qquad [24]$$

gdje je:

$\overline{KG}$ – visina sustavnog težišta broda iznad kobilice (m)

$\overline{KM}_0$ – visina početnog poprečnog metacentra iznad kobilice (m)

$\overline{M_0G}$ – početna poprečna metacentarska visina broda (m).

Vrijednost $\overline{KM}_0$ se može procijeniti s izrazom:[113]

$$\overline{KM}_0 = T\left(0{,}84 - \frac{0{,}33 \cdot C_B}{0{,}18 + 0{,}87 \cdot C_B}\right). \qquad [25]$$

Vrijednost $\overline{BM}_0$ se može procijeniti koristeći izraz:[114]

$$\overline{BM}_0 = \frac{I_T}{\nabla} = \left(\frac{\pi \cdot Lpp \cdot B^3}{64}\right) \cdot \left(\frac{1}{C_B \cdot Lpp \cdot B \cdot T}\right) = \frac{B^2}{20{,}4 \cdot C_B \cdot T}, \qquad [26]$$

gdje su:

$\overline{BM}_0$ – metacentarski radijus (m)

I_T – moment tromosti površine vodne linije (m^4)

∇ – volumen uronjenog dijela trupa broda (m^3)

Lpp – udaljenost između okomica broda (m)

B – širina broda (m)

T – gaz broda (m)

C_B – koeficijent punoće deplasmana.

Radijus ustaljenog kruga okreta R_C (m) može se odrediti koristeći izraz:[115]

$$R_C = \frac{Lpp}{K_R \cdot \delta_R}, \qquad [27]$$

gdje je:

δ_R – kut otklona kormila u radijanima.

[113] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*.
[114] Ibidem
[115] Ibidem

Vrijednosti bezdimenzionalnog koeficijenta okreta broda $K_{R,}$ prikazani u tablici 16, su dobiveni koristeći matematičke simulacije, za mirno more i uvjete bez vjetra s kutom otklona kormila od 20°.

Najveći kut nagiba broda zbog centrifugalne sile kod okretanja broda ϕ_R može se odrediti koristeći sljedeći izraz:[116]

$$\phi_R = \phi_{MAX} = C_\phi \cdot \phi_C \,, \qquad [28]$$

gdje koeficijent C_ϕ ovisi o kutu otklona kormila te može iznositi od 1,3 do 1,7 za kutove otklona kormila od 10° – 20°.

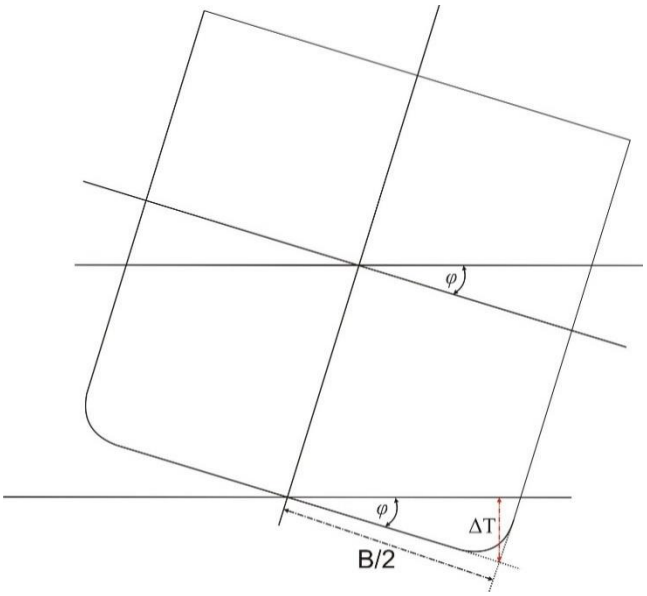
Brodovi s velikom vrijednosti $\overline{KG}$, tj. malom početnom poprečnom metacentarskom visinom $\overline{M_0G}$, kao na primjer brodovi za prijevoz kontejnera i RO-RO brodovi, mogu imati veće kutove nagiba kod okreta broda pogotovo u slučaju djelovanja vjetra.

Tablica 16: Vrijednosti K_R za plitku vodu za odnos h/T = 1,2

Broj	Tip broda	Veličina broda	K_R
1.	Teretni brod	Srednji	0,58
2.	Teretni brod	Mali	0,47
3.	Brod za prijevoz kontejnera	Postpanamax	0,42
4.	Brod za prijevoz kontejnera	Panamax	0,52
5.	Brod za prijevoz rasutog tereta	Veliki	0,52
6.	Brod za prijevoz rasutog tereta	Panamax	0,49
7.	Brod za prijevoz rasutog tereta	Mali	0,62
8.	VLCC tanker		0,62
9.	Tanker	Mali	0,60
10.	LNG tanker		0,75
11.	Brod za prijevoz smrznutog tereta		0,63
12.	Putnički brod		0,66
13.	Trajekt		0,55

(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

[116] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*.



Slika 19: Trigonometrijsko određivanje dodatnog urona broda zbog utjecaja nagiba

Trigonometrijski izraz za izračun dodatnog urona broda (Slika 19), na temelju kuta nagiba broda, glasi:

$$\Delta T = \frac{B}{2} \cdot \sin \varphi \,, \qquad [29]$$

gdje su:

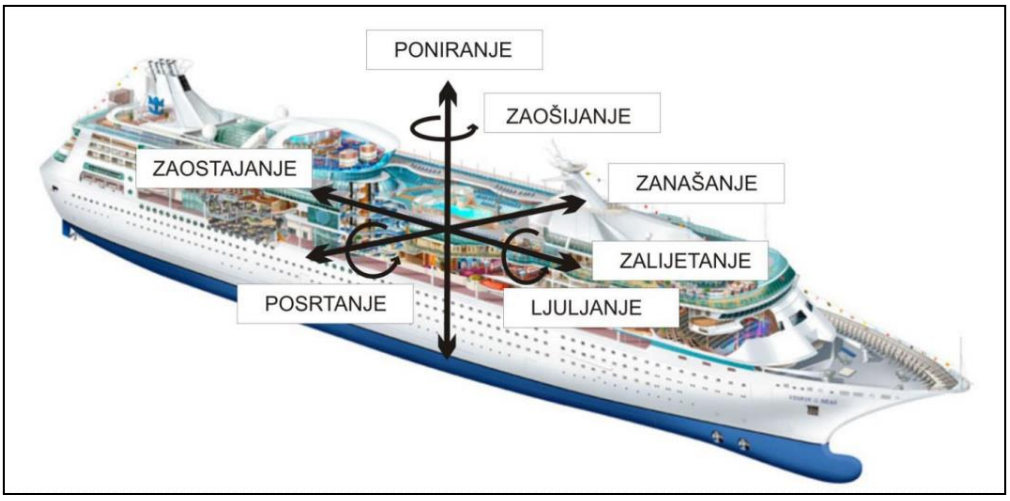
ΔT – dodatno povećanje gaza zbog nagibanja broda (m)

B – širina broda (m)

φ – kut nagiba broda (°).

3.3.3. Promjena gaza zbog utjecaja valova

Gibanje broda može se opisati sa šest stupnjeva slobode (Slika 20). Tri su translacijska (zalijetanje/zaostajanje, zanašanje te poniranje/uzdizanje) i tri su rotacijska (ljuljanje, posrtanje i zaošijanje). Na promjenu gaza broda utječu poniranje, ljuljanje i posrtanje.



Slika 20: Šest stupnjeva slobode gibanja broda

Kod poniranja brod ima tendenciju praćenja vertikalnog kretanja valova, kod ljuljanja brod se naginje lijevo i desno oko uzdužne osi (posebno kod bočnih valova), a posrtanje uvelike ovisi o duljini i brzini broda.

Izraz za određivanje prirodnog perioda broda poniranja može se pisati kao:[117]

$$T_H = 2\pi\sqrt{\frac{m_v}{k_h}}, \qquad [30]$$

gdje su:

m_v – virtualna masa broda (t) = $D + D_H$

D – deplasman broda (t)

D_H – hidrodinamička masa ili masa vode (t)

k_h – hidrodinamička tromost = $\rho_w \cdot g \cdot A_{VL}$ (kN/m)

ρ_w – gustoća vode (t/m^3)

g – ubrzanje sile teže (m/s^2)

A_{VL} – površina vodene linije broda (m^2).

Prilikom poniranja potpuno nakrcanih brodova s paralelnim srednjakom, prirodni period odziva može se odrediti koristeći izraz:[118]

$$T_H = 10\sqrt{\frac{T}{g}}, \qquad [31]$$

gdje je T gaz broda.

Za potrebe određivanja prirodnog perioda odziva broda kod ljuljanja broda može se koristiti izraz:[119]

$$T_\phi = \frac{2.5B}{\sqrt{g(\overline{M_0G})}}. \qquad [32]$$

U slučaju da metacentarska visina nije dostupna za konkretan brod, mogu se koristiti statistički podatci za različite vrste i veličine brodova[120] ili sljedeći pojednostavljeni izraz:[121]

$$\overline{M_0G} = C_n\left(\frac{B}{25}\right), \qquad [33]$$

---

[117] Faltinsen, O. (1993). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures* (Vol. 1). Cambridge University Press.

[118] *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report no. 121-2014

[119] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan* .

[120] Tsugane, M. (2009): *A Statistic Analysis of G_0M and Other Values on Operation of Large Container Ships*. Journal of Japan Institute of Navigation, No.120, Japan Institute of Navigation.

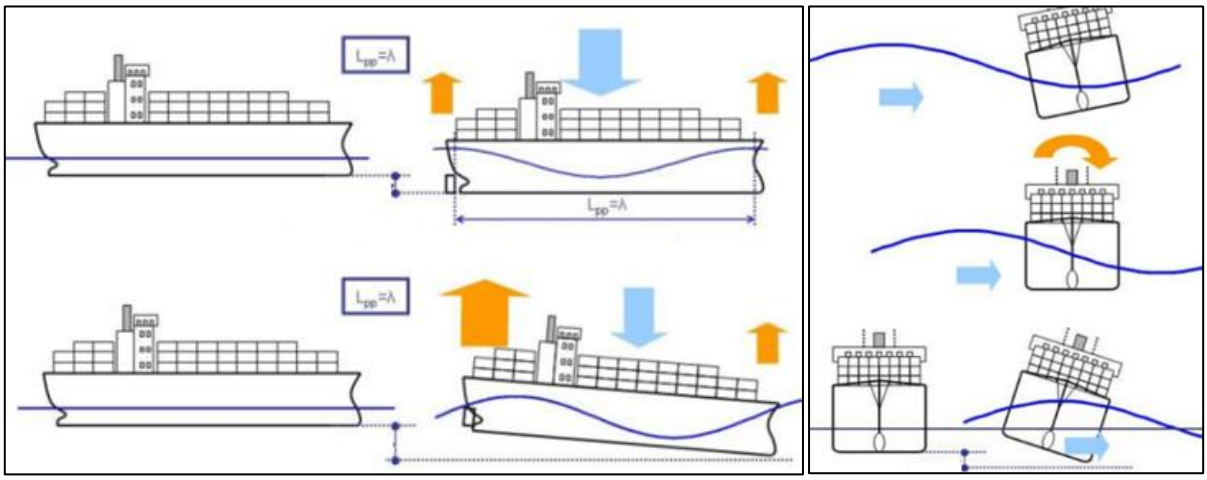
[121] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*.

C_n – konstanta koja ovisi o stanju nakrcanosti broda, može biti između 0,5 i 2.

Tri metode koje su preporučene od strane PIANC-a za proračun pretpostavljenih kretanja broda na valovima pri projektiranju su:

a) Japanska metoda (MLIT) koja se temelji na kombinaciji najvećih kretanja na valovima
b) Španjolska (ROM 3.1) probabilistička metoda u kombinaciji s koeficijentima i
c) Probabilistička metoda koja se temelji na procjeni očekivanih najvećih kretanja broda na valovima.

Japanska metoda (MLIT)[122] koristi pretpostavku da će se najveća kretanja na valovima Z_2 dogoditi na pramcu/krmi (uslijed poniranja i posrtanja) i Z_3 na bokovima (uslijed ljuljanja i posrtanja). Japanski istraživači su predložili postupak za procjenu vertikalnih kretanja Z_2 i Z_3 broda na valovima.[123]



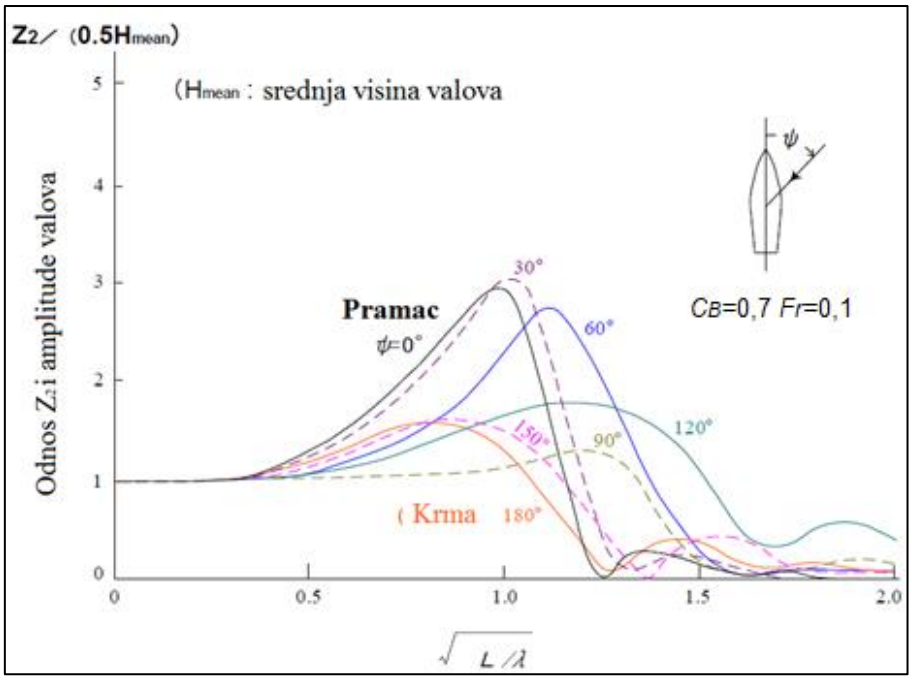
Slika 21: Pretpostavljeno vertikalno kretanje pramca i boka broda na valovima
(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

Prvi korak, kod primjene ove metode, je odabir projektnog tipa broda i prikupljanje podataka o brzini broda *V*, značajnoj visini valova H_s i periodu značajnih valova T_s, dubini plovnog puta *h*, te kutu pod kojim valovi dolaze u odnosu na simetralu broda Ψ.

Drugi korak je proračun vertikalnih kretanja pramca na valovima Z_2. Slika 21 prikazuje pretpostavljeno kretanje pramca Z_2 teretnog broda uslijed poniranja i posrtanja. Kretnje pramca Z_2/a_w (odnos pomaka pramca i amplitude vala) su prikazane funkcijom $\sqrt{Lpp/\lambda}$ za različite smjerove valova Ψ. Uobičajeno, valovi dolaze iz različitih smjerova i imaju različite valne duljine. Radi toga se koriste *Newtonove* jednadžbe za pretpostavljeno kretanje broda, u kombinaciji s hidrodinamičkim silama koje djeluju na trup broda, kao funkcija kružne frekvencije susreta valova ω_E. Iz slike 22 može se vidjeti da za uvijete kad je $Lpp/\lambda = 1$ i $\Psi = 30°$ vertikalni pomak pramca može biti i više od tri puta veći od amplitude valova.

[122] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*.

[123] Ohtsu, K., Yoshimura, Y., Hirano, M., Tsugane, M., Takahashi, H. (2006): *Design Standards for Fairway in Next Generation*. Asia Navigation Conference 2006, No.26.



Slika 22: Odnos amplitude vala i vertikalnog kretanja broda (kod poniranja)
(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

Bez obzira što su rezultati prikazani na slici 22 dobiveni za teretni brod s C_B = 0,7, relativne brzine $Fr_L = V / \sqrt{g \cdot Lpp} = 0{,}1$, slični rezultati mogu se očekivati i za ostale tipove brodova. Podatci prikazani na slici 22 mogu se koristiti za određivanje kretanja Z_2 za uvjete kad je $\sqrt{Lpp / \lambda} < 1{,}5$ ili kad je $\lambda > 0{,}45Lpp$. Također, vertikalna kretanja pramca na valovima prikazana na slici 22 su dobivena za duboku vodu, a smatra se da je kretanje pramca na valovima u plitkoj vodi manje.

Treći korak je procjena vertikalnog kretanja boka broda na valovima zbog poniranja i ljuljanja. Općenito, vrhunac se događa na rezonantnom periodu, gdje je $T_R = T_E$ (prirodni period valjanja broda je jednak periodu valova). U tom slučaju, vertikalni pomak boka broda na valovima Z_3 (m) može se odrediti koristeći izraz:

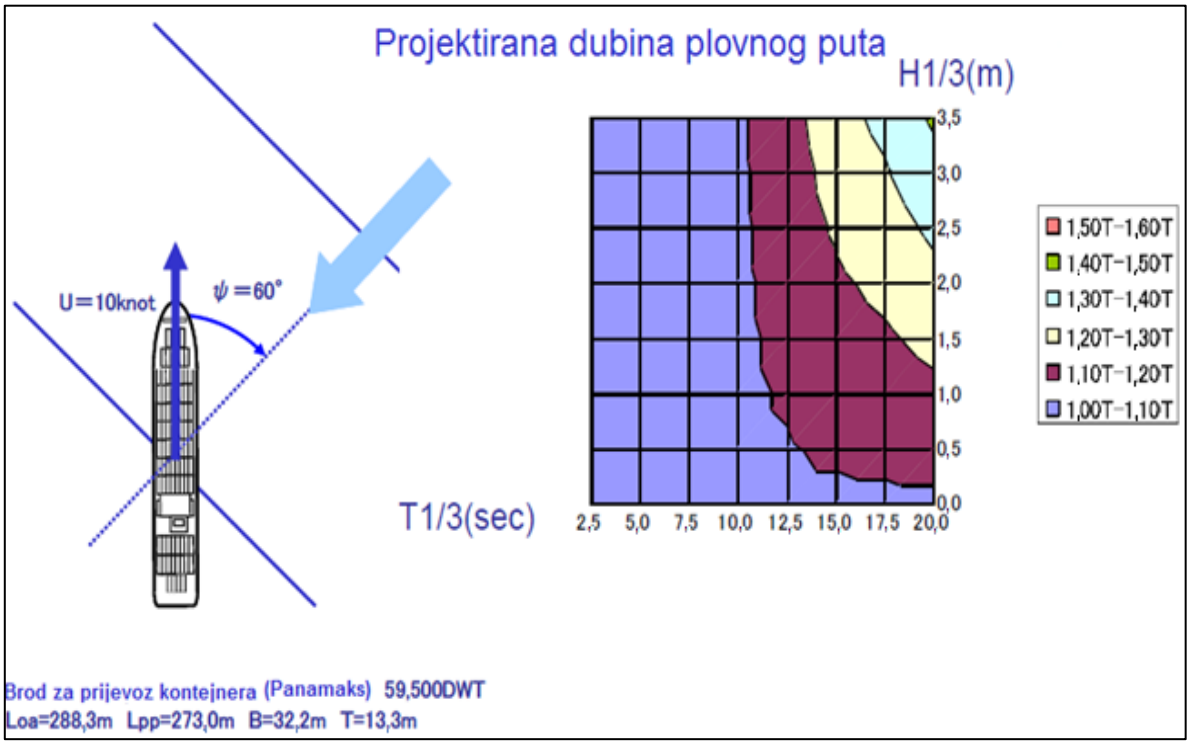
$$Z_3 = 0{,}7 \cdot \frac{H_S}{2} + \frac{B}{2} \cdot \sin \phi_{Max} \cdot \qquad [34]$$

Prilikom proračuna vrijednosti Z_3, vrlo je značajno usporediti prirodni period ljuljanja broda s prirodnim periodom valova, jer se ljuljanje pojača kad se prirodni period ljuljanja broda približi periodu valova. Tipičan primjer određivanja dubine plovnog puta koristeći ovu metodu prikazan je na slici 23 za *Panamax* brod za prijevoz kontejnera, nosivosti približno 59 500 tona. Dubina plovnog puta, prikazana kao odnos *h/T*, dobivena je kao funkcija značajne visine vala i njihovog perioda.

Tablica 17: Ulazni podatci za detaljno određivanje kretanja broda na valovima

Kategorija	Ulazni podatak
Plovni put	Novi plovni put
	Postojeći plovni put
Projektni brod	Tip broda
	Lpp, *Loa* – duljine, *B* – širina, *T* – gaz
	C_B – blok koeficijent
Uvjeti plovidbe	$V_{m/s}$ – brzina broda (m/s)
	H_s i T_s – visina i period signifikantnih valova
	h – dubina plovnog puta
	Ψ – smjer valova u odnosu na simetralu broda

(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)



Slika 23: Prikaz određivanja potrebne dubine plovnog puta projektnog tipa broda koristeći smjer, visinu i period signifikantnih valova

(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

Četvrti i posljednji korak japanske metode je odabir najvećih određenih vrijednosti vertikalnih kretanja pramca i boka broda:

$$Z_{Max2} = Max(Z_2, Z_3). \quad [35]$$

Španjolska[124] probabilistička metoda se dijelom temelji i na korištenjem koeficijenta. Prilikom korištenja navedene metode potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete:

- potpuno nakrcan broda s preko 90 % deplasmana
- brod miruje ili plovi smanjenom brzinom sa $Fr_h \leq 0{,}05$
- odnos dubine i gaza $1{,}05 \leq h/T \leq 1{,}5$ i
- smjer valova paralelan s simetralom broda, s najvećim odstupanjem $\pm 15°$.

Vertikalno kretanje broda na valovima se odredi koristeći izraz:

$$Z_{Max3} = Hs \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \cdot C_6, \quad [36]$$

gdje je *Hs* značajna visina valova ili visina graničnih valova. Umnožak *Hs* i C_1 daje najveću visinu valova $(H_{max})_p$.

Koeficijent C_1 daje najveće visine valova, a određuje se koristeći izraz:

$$C_1 = 0{,}707\sqrt{\ln\left[\frac{N_W}{\ln(1/1-P_m)}\right]}. \quad [37]$$

N_W je broj valova koje će brod susresti u promatranom plovnom putu tijekom planiranog vremena eksploatacije plovnog puta. Tipična vrijednost je 200, dok se najveća vrijednost od 10 000 koristi za sidrišta. Vjerojatnost prekoračenja P_m je funkcija vjerojatnosti prekoračenja tijekom vremena eksploatacije P_{DL} i definira se kao:

$$P_m = 1-(1-P_{DL})^{1/N_{slucajeva}}. \quad [38]$$

$N_{slučajeva}$ je ukupan broj kritičnih slučajeva kad je stanje mora blizu graničnih uvjeta kad brod može premašiti najveći gaz tijekom eksploatacije kanala u vremenskom periodu od 15 do 25 godina. Uobičajene vrijednosti P_{DL} su od 0,05 do 0,50.

Koeficijent C_2 je faktor koji ubraja varijacije u vertikalnom kretanju broda uzrokovanom valovima. Tablica 18 daje vrijednosti za koeficijent C_2 kao funkciju *Hs* i *Lpp*. Općenito, vrijednost koeficijenta C_2 se povećava povećanjem *Hs* i smanjenjem *Lpp*.

[124] Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.

Tablica 18: Koeficijent transformacije valova C_2 za poluprobabilističku metodu

Lpp **(m)**	**Značajna visina valova, *Hs* (m)**							
	0,5	**1,0**	**1,5**	**2,0**	**2,5**	**3,0**	**3,5**	**4,0**
≤ 75	0,20	0,17	0,23	0,29	0,31	0,34	0,37	0,40
100	0,10	0,14	0,19	0,23	0,26	0,29	0,32	0,34
150	0	0,09	0,14	0,17	0,21	0,23	0,25	0,27
200	0	0,05	0,10	0,13	0,16	0,19	0,21	0,23
250	0	0,03	0,07	0,11	0,14	0,16	0,18	0,20
300	0	0	0,05	0,08	0,10	0,13	0,16	0,17
400	0	0	0,03	0,06	0,08	0,11	0,14	0,15

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Tablica 19 daje vrijednosti koeficijenata od C_3 do C_6. Koeficijent C_3 je koeficijent stanja nakrcanosti broda, koji se računa u slučaju da je deplasman manji od pretpostavljenih 90 %. Koeficijent C_4 daje popravku za brzinu broda kao funkciju Fr_h. Koeficijent C_5 daje korekciju za varijacije odnosa dubine i gaza broda. Koeficijent C_6 daje korekciju za smjer valova u odnosu na uzdužnicu broda. Prve dvije vrijednosti se koriste za valove koji dolaze u pramac ili krmu, a treća za valove okomite na uzdužnicu broda.

Tablica 19: Koeficijent od C_3 do C_6 za poluprobabilističku metodu (ROM 3.1-99)

Koeficijent	**Naziv koeficijenta**	**Vrijednost**	**Opis**
C_3	Stanje nakrcanosti broda	1,00	Deplasman ≥ 90%
		1,20	Deplasman 50%
C_4	Brzina broda	1,00	$Fr_h \leq 0{,}05$
		1,25	$Fr_h = 0{,}15$
		1,23	$Fr_h \geq 0{,}25$
C_5	Dubina vode	1,00	$h/T \geq 1{,}50$
		1,10	$h/T \leq 1{,}05$
C_6	Kut valova	1,00	$\psi \leq 15°$
		1,40	$\psi = 35°$
		1,70	$\psi = 90°$

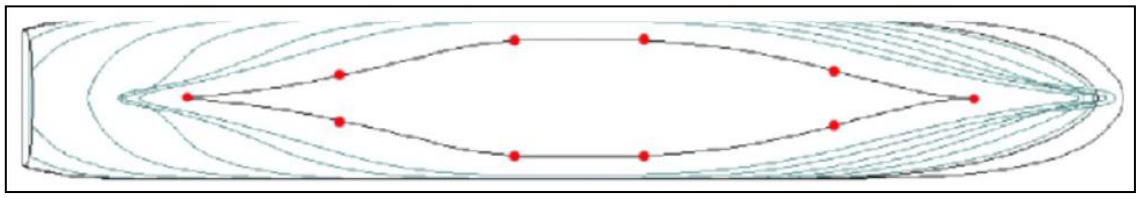
(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Probabilistička metoda[125] (ad. 3) se temelji na procjeni najvećih očekivanih gibanja broda na valovima za određene kritične točke na trupu broda. Po svom kretanju, valovi su stohastičke prirode, a vertikalna gibanja broda također imaju stohastički karakter. Visina valova u valnom

[125] *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

polju (prostorna distribucija) ili nizu valova (slijed zapisan na određenoj poziciji) slijede *Rayleighovu* razdiobu. Ta razdioba omogućuje određivanje prosječne, značajne ili ekstremne vrijednosti visine valova. Ekstremne vrijednosti imaju malu vjerojatnost događaja i koriste se samo u slučajevima nepovoljnog dna (npr. tvrdo dno).

Kako bi se odredio najgori mogući slučaj bez obzira na različita vertikalna kretanja broda tijekom prolaza broda plovnim putem, definira se pet ili više kritičnih točaka na trupu broda (Slika 24).



Slika 24: Uobičajeni raspored kritičnih točaka na trupu broda
(Izvor: Vantorre, M., et al., E. (2008*): Ship Motions in Shallow Water as the Base for a Probabilistic Approach Policy*. Proceedings of the ASME International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2008, June 15-20, Estoril)

Za određivanje gibanja kritičnih točki na trupu broda može se koristiti operator amplitude odziva RAO (*RAO* – engl. *Response Amplitude Operators*)[126, 127, 128] koji predstavlja odnos vertikalnog kretanja određene točke broda u odnosu na visinu valova. Kritična gibanja najčešće podrazumijevaju poniranje, ljuljanje i posrtanje, prilikom čega je potrebno uzeti u obzir i stanje nakrcanosti broda, brzinu broda i dubinu vode, u kombinaciji s brojem susreta valova, te odnosa duljine broda i duljine vala. RAO se može izračunati eksperimentalnim ili numeričkim modelima. Eksperimentalna istraživanja se provode na modelima brodova u bazenima, gdje se dobivaju vrlo točni podatci, posebno za složenije oblike trupa broda i spektar valova. Nedostatak ove metode je dugotrajnost i cijena.

3.3.4. Dodatan uron zbog djelovanja sile vjetra

Prilikom nagiba broda pod utjecajem vjetra dolazi i do urona boka broda. Uron boka broda (Z_{OV}), kao funkcija nagiba zbog utjecaja vjetra, može se odrediti prema izrazu:[129]

$$Z_{OV} = Fk\left(\frac{B}{2}\sin\phi_{WR}\right), \qquad [39]$$

gdje je:

F_k – koeficijent zaobljenosti trupa broda na glavnom rebru

B – širina broda (m).

[126]Huang, Y. (1997). *Nonlinear Ship Motions by a Rankine Panel Method* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

[127]Perez, T., & Blanke, M. (2002). *Simulation of ship motion in seaway*. Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Newcastle, Australia, Tech. Rep. EE02037.

[128]Bunnik, T., & Veldman, A. (2010, January). *Modelling the Effect of Sloshing on Ship Motions*. In ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, str. 279-286.

[129]*Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report no. 121-2014.

U slučaju da metacentarska visina nije dostupna za konkretan brod, mogu se koristiti statistički podatci za različite vrste i veličine brodova[130] ili koristeći izraz [33] izračunati procijenjenu vrijednost.

Nagibni moment sile vjetra M_{Vj} (Nm) može se odrediti izrazom:[131]

$$M_{Vj} = F_{vj} \cdot l_{vj}, \qquad [40]$$

gdje su:

F_{vj} – sila vjetra (kN)

l_{vj} – krak sile vjetra (m).

Krak momenta sile vjetra dobije se izrazom:[132]

$$l_{vj} = h_{vj} - \frac{T}{2}, \qquad [41]$$

gdje su:

h_W – točka težišta nadvodne površine na koju djeluje vjetar, mjereno od kobilice broda (m)

T – gaz broda (m).

Lateralna sila vjetra F_{vjL} (N) koja djeluje na bok broda je definirana kao:[133]

$$F_{vj_L} = p \cdot A, \qquad [42]$$

gdje su:

p – specifični pritisak vjetra (N/m^2)

$A_{V,L}$ – bočna površina nadvodnog dijela broda (m^2).

Specifični pritisak vjetra aproksimira se izrazom:[134]

$$p = C_{vj} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho a \cdot V_{vj}^2, \qquad [43]$$

gdje su:

ρ_a – gustoća zraka (1,25 kg/m^3, na temperaturi od 10° C)

C_{vj} – koeficijent otpora zraka tijela izloženog vjetru

V_{vj} – brzina vjetra (m/s).

Koeficijent otpora zraka tijela izloženog vjetru C_{vj} je najtočniji u slučaju kad je dostupan za određeni brod. Međutim, takvi su podatci dosta rijetki pa se u većini slučajeva koeficijenti sile vjetra procjenjuju na temelju dosadašnjih istraživanja gdje su podatci prikazani tabelarno

[130]Tsugane, M. (2009): *A Statistic Analysis of G_0M and Other Values on Operation of Large Container Ships*. Journal of Japan Institute of Navigation, No.120, Japan Institute of Navigation.

[131]*Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

[132]Ibidem

[133]Mohović, R. (2002), *Model manevriranja brodom u ograničenim plovnim područjima u funkciji sigurnosti i zaštite morskog okoliša*, Doktorska disertacija, Pomorski fakultet Sveučilište u Rijeci.

[134]Ibidem

za određeni tip broda ili se koeficijent sile vjetra procjeni proračunom. Jedan od načina proračuna koeficijenta sile vjetra je:[135]

$$C_{vj} = \sum_{n=1}^{3} C_{Yn} \cdot \sin\left(n\Theta_{WR}\right). \qquad [44]$$

Tri regresijska koeficijenta C_{Yn} za n =1, 2, 3 su:

$$C_{Yn} = C_{Yn0} + C_{Yn1} \cdot \frac{A_{V,L}}{Lpp^2} + C_{Yn2} \cdot \frac{X_L}{Lpp} + C_{Yn3} \cdot \frac{Lpp}{B} + C_{Yn4} \cdot \frac{A_{V,L}}{A_{V,F}}, \qquad n = 1, 2, 3 \qquad [45]$$

gdje su:

$A_{V,F}$ – lateralna površina broda iznad vodne linije na koju djeluje vjetar (m^2)

X_L – udaljenost od okomice do težišta lateralne površine broda $A_{V,L}$ (m)

C_{Yn0} do C_{Yn4} – empirijski koeficijenti za n =*1, 2, 3* (Tablica 21).

U slučaju da nadvodna površina (lateralna $A_{V,L}$ ili frontalna $A_{V,F}$) nije dostupna za određeni brod, one se mogu približno odrediti koristeći koeficijente za određivanje poprečne i uzdužne površine (Tablica 20) koristeći izraz:[136]

$$Y = \alpha \cdot X^{\beta}, \qquad [46]$$

gdje je $Y = A_{V,F}$ ili $A_{V,L}$, a X = ukupna nosivost (DWt) ili bruto tonaža (GT), ovisno o tipu broda. Predloženi koeficijenti temelje se na statističkoj analizi brodova, koju su proveli autori za potpuno nakrcane brodove koristeći *Lloydov* registar brodova.[137]

Tablica 20: Koeficijenti za određivanje frontalne i lateralne površine brodova izloženih djelovanju vjetra izračunati na temelju 95 % signifikantnosti podataka brodova

Tip broda (potpuno nakrcan)	X	Koeficijenti poprečne površine AV,F		Koeficijenti uzdužne površine AV,L	
		α	β	α	β
Teretni brod	DWt	0,592	0,666	3,213	0,616
Brod za prijevoz suhog rasutog tereta	DWt	8,787	0,370	16,518	0,425
Brod za prijevoz kontejnera	DWt	1,369	0,609	2,614	0,703
Tanker	DWt	2,946	0,474	3,598	0,558
RO – RO brod	DWt	10,697	0,435	28,411	0,464
Putnički brod	GT	8,842	0,426	3,888	0,682
Trajekt	GT	5,340	0,473	3,666	0,674
Brod za prijevoz ukapljenog plina	GT	2,649	0,553	5,074	0,613

(Izvor: Akakura, Y., & Takahashi, H. (1998). *Ship Dimensions of Design Ship Under Given confidence Limit*s. Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan)

[135]Yamano, T., & Saito, Y. (1997). *An Estimation Method of Wind Forces Acting on Ships*. Journal-Kansai Society of Naval Architects Japan, str. 91-100.

[136]Akakura, Y., & Takahashi, H. (1998). *Ship Dimensions of Design Ship Under Given Confidence Limits.* Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan.

[137]*Lloyd's Register Fairplay Data* (2006) Lloyd's Register Fairplay Ltd., September.

Tablica 21: $C_{Yn}j$ empirijski koeficijenti za lateralnu silu vjetra

Koeficijent „n“	Koeficijent C_{Ynj} za j = 0 do 4				
	C_{Yn0}	C_{Yn1}	C_{Yn2}	C_{Yn3}	C_{Yn4}
1	0,509	4,904	0	0	0,022
2	0,0208	0,23	-0,075	0	0
3	-0,357	0,943	0	0,0381	0

(Izvor: Yamano, T., & Saito, Y. (1997*). An Estimation Method of Wind Forces Acting on Ships*. Journal-Kansai Society of Naval Architects Japan, str. 91-100)

3.3.5. Neto preostala dubina ispod kobilice broda

Nakon što su uzete u obzir sve dinamičke promjene gaza broda, kod determinističe metode definiranja dubine plovnog puta potrebno je uzeti u obzir i dodatnu marginu sigurnosti izraženu kroz neto UKC. ICORELS[138] definira neto UKC kao minimalnu dubinu koja ostaje ispod kobilice broda prilikom plovidbe, kad se uzmu u obzir svi dinamički utjecaji. Prema tome, zahtijevana veličina neto UKC-a je preostala dubina ispod kobilice nakon što se od dubine vode oduzmu statički gaz broda i dinamičke promjene u gazu broda. Prema ICORELS-u neto UKC se posebno određuje za svaki slučaj uzimajući u obzir tip i veličinu broda, vrstu tereta, vrstu dna, posljedice na okoliš u slučaju dodira s dnom, gustoću prometa, itd. Minimalna preporučena vrijednost neto UKC-a iznosi 0,5 m, koja se može povećati do 1 metar u slučaju tvrđeg dna (npr. kod plovnih putova kamenitog dna).

3.3.6. Manevarska margina

Manevarska margina[139] (vezana uz gaz broda), za razliku od neto UKC-a, predstavlja najmanju prosječnu preostalu dubinu ispod kobilice tijekom plovidbe ograničenim plovnim putom i manevriranja, a da se pritom ne umanje manevarska svojstva broda. Manevarska margina uključuje statički gaz broda i promjene gaza zbog djelovanja sile vjetra i dodatni uron uslijed međudjelovanja trupa broda s dnom, tj. uzimaju se u obzir samo vanjske sile koje dugoročnije djeluju na preostalu dubinu ispod kobilice broda. Granična vrijednost manevarske margine ovisi o tipu broda, dimenzijama i konfiguraciji plovnog puta i prometu (jednosmjerna ili dvosmjerna plovidba). Minimalna vrijednost od 5 % gaza ili 0,6 m, ovisno što je veće, je obično dovoljna vrijednost manevarske margine za većinu brodova različitih vrsta i dimenzija, kao i za različite tipove plovnih putova.

3.4. Određivanje dubine plovnog puta korištenjem metode vjerojatnosti

Osim ranije opisane determinističe metode, prilikom određivanja dubine plovnog puta može se koristiti i probabilistička (vjerojatnosna) metoda. Korištenjem metode vjerojatnosti za određivanje dubine plovnog puta definira se kolika je vjerojatnost da će određeni UKC biti prekoračen, te na kraju je li ta vrijednost prihvatljiva.

[138]ICORELS (International Commission for the Reception of Large Ships). 1980. *Report of Working Group IV*, PIANC Bulletin No. 35, Supplement.

[139]*Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

Jedan od uobičajenih pristupa je definiranje najveće prihvatljive vjerojatnosti nezgode tijekom određenog perioda eksploatacije plovnog puta. Primjer takve metodologije pristupa je plovni put luke Rotterdam, gdje je utvrđena prihvatljiva vjerojatnost od 10 % za dodir broda s dnom bez veće štete za period eksploatacije plovnog puta od 25 godina.[140] Navedena vjerojatnost od 10 % znači prihvaćanje mogućnosti da u razdoblju od 250 godina samo jedan od deset dodira broda s dnom rezultira većom štetom, a u razdoblju od 25 godina prihvatljiv je samo jedan dodir broda s dnom bez ozbiljnijih posljedica. Prihvatljiv kriterij vjerojatnosti dodira broda s dnom donosi odgovorna osoba koji upravlja lučkim područjem. Prema prikazanim podatcima o prometu i prihvatljivim kriterijima u konkretnom slučaju vjerojatnost dodira s dnom pri prolazu lukom iznosi $1{,}6 \cdot 10^{-4}$ po brodu.

Osim kriterija za određenu luku, analizom podataka prometa na određenom području mogu se definirati opće granične vrijednosti prihvatljive vjerojatnosti dodira brod s dnom, poput navedenih:[141]

- nezgoda pri plovidbi u povoljnim vremenskim uvjetima: 10^{-4}
- nezgoda s velikim oštećenjem pri plovidbi u povoljnim vremenskim uvjetima: $2{,}5 \cdot 10^{-7}$
- nezgoda pri plovidbi u nepovoljnim vremenskim uvjetima: 10^{-2}
- nezgoda s velikim oštećenjem pri plovidbi u nepovoljnim vremenskim uvjetima: $5{,}0 \cdot 10^{-4}$.

U slučaju da predložene vjerojatnosti nisu prihvatljive, može se pristupit izračunu pretpostavljenog vertikalnog kretanja broda i vjerojatnosti dodira s dnom. U prvom redu je potrebno odrediti amplitudu vertikalnog kretanja broda A_p za vjerojatnost prekoračenja P_z, koja je bazirana na *Rayleighevoj* razdiobi, a glasi:[142]

$$A_p = A_{m0} \sqrt{\frac{-\ln \cdot P_z}{2}} \,. \qquad [47]$$

A_{m0} predstavlja signifikantnu amplitudu vertikalnog gibanja broda na valovima za sve kritične točke. Vrijednost P_z je definirana kao:[143]

$$P_z = \frac{1}{N_0 \cdot N_{pr} \cdot N_{ye}} \,, \qquad [48]$$

gdje su:

$N_0 = t / T_z$ – broj vertikalnih oscilacija broda ili broj susreta s valovima tijekom prolaska plovnim putem

N_{pr} – prosječan broj prolaza na godinu

N_{ye} – broj godina eksploatacije plovnog puta.

---

[140]Savenije, R. (1996): *Probabilistic Admittance Policy Deep Draught Vessels*. PIANC Bulletin 91, June.

[141]Van De Kaa, E.J. (1984): *Safety Criteria for Channel Depth Design*. Proc. Third Meeting of the U.S. Dutch M.O.U. on Dredging and Dredged Material Disposal, Working Group III: Navigation Channels, Charleston.

[142]*Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

[143]Ibidem

Izračunom vjerojatnost P_{UKC} da će bruto UKC biti premašen tijekom definiranog broja prolaza u uobičajenim uvjetima, može se odrediti *Poissonovom* razdiobom (za dugoročnu vjerojatnost ovih događaja):[144]

$$P_{UKC} = 1 - e^{(-P_p \cdot N_p)}, \qquad [49]$$

gdje su:

$N_p = N_y \cdot Y_L$ – ukupan broj prolaza broda

N_y – broj prolaza broda godišnje

Y_L – broj godina iskorištavanja plovnog puta

P_p – vjerojatnost prekoračenja po prolazu.

Ako je $P_p \cdot N_p < 0{,}01$, onda se izraz može pisati kao:

$$P_{UKC} = P_p \cdot N_p. \qquad [50]$$

Na primjer, ako tijekom 50 godina eksploatacije plovnog puta, projektni brod napravi jedan prolaz mjesečno, tj. $N_p = N_y \cdot Y_L = 12 \cdot 50 = 600$ prolaza ukupno, s vjerojatnošću dodira broda s dnom po prolazu od $P_p = 8{,}3 \cdot 10^{-4}$, vjerojatnost P_{UKC} iznosi:

$$P_{UKC} = 1 - e^{(-P_p \cdot N_p)} = 1 - e^{(-8{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot 600)} = 0{,}39.$$

U ranije opisanom primjeru rezultat $P_{UKC} = 0{,}39$ pokazuje da bi tijekom 50-godišnjeg perioda očekivana najveća vjerojatnost da će brod dotaknuti nominalno dno biti 39 %.

Ako na tom istom primjeru koristi definirana ukupna vjerojatnost dodira broda s dnom od 10 % za luku Rotterdam, tada je prihvatljiva vjerojatnost dodira broda s dnom po prolazu ($P_p \cdot N_p$):

$$P_p \cdot N_p = -\ln(1 - P_{UKC}) = -\ln(1 - 0{,}1) = 0{,}105.$$

Nadalje, ako se za isti primjer, koristeći kriterije za luku Rotterdam, ukupan broj dolazaka broda u luku tijekom istog vremena eksploatacije pretpostavi $N_p = 36\,500$, tada vjerojatnost dodira broda s dnom u jednom prolazu iznosi $P_p = 2{,}88 \cdot 10^{-6}$ (ili jedan dodir s dnom za $N = 1/P_p = 347\,600$ prolaza brodova).

Osim statističkih podataka, za određivanje vjerojatnosti dodira s dnom mogu se koristiti i razdiobe. Autori *Bijker* i *Massie*[145] za određivanje dubine ulaza u luku koriste trenutno vertikalno kretanje broda koje se mjeri u fiksnom intervalu od referentne razine vode (npr. sa standardnim intervalom od 0,5 sekundi za valove, koristeći *Furierovu* razdiobu), za razliku od razina oscilacije koja daje kretanje vala od najniže do najviše točke (prikazano *Rayleighevom* razdiobom). Trenutno vertikalno gibanje broda na valovima može se izraziti *Normalnom* ili *Gaussovom* razdiobom, s varijablama izraženima kroz standardnu devijaciju. Ako su sve komponente vjerojatnosti, koje doprinose potrebnom UKC-u, nezavisne i imaju normalnu

[144]Strating, J. et al. (1982). *Optimization of Depths of Channels*. Delft Hydraulics, Publ. No 278 and Int. Shipbuilding Progress, Vol. 30, No. 342, str. 45-56.

[145]Bijker, A. B., & Massie, W. W. (1978). *Coastal Engineering*, Vol II, Chapter 4: Channel Depth. Coastal Engineering Group.

razdiobu, kombinirana razdioba tih komponenti može se izraziti sumom srednjih vrijednosti i kvadratnim korijenom sume pojedinih standardnih devijacija kao:

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_b^2 + \sigma_w^2 + \ldots}\,, \qquad [51]$$

gdje su:

σ_c – kombinirana standardna devijacija

σ_s – standardna devijacija kretanja broda (=1/2 Am_0)

σ_b – standardna devijacija nepravilnosti morskog dna

σ_w – standardna devijacija razine vode.

Opisani izračuni mogu se koristiti za pojedine sekcije plovnog puta, svaki sa specifičnom valnom klimom, uvjetima morskog dna i varijaciji u razini vode. Izračunata vjerojatnost daje očekivani postotak tijekom vremena trajanja prolaska broda plovnim putem kada može doći do dodira broda s dnom. Ostali kriteriji koji će utjecati na optimizaciju plovnog puta su opisani u setu diskretnih podataka s definiranom vjerojatnošću nastupanja (kao na primjer vremenski uvjeti, stanje mora, morske mijene, …), što omogućuje određivanje mogućih zastoja na analiziranom plovnom putu.

Tablica 22: Broj godina eksploatacije plovnog puta (N_{ye}) povezanih s razinom rizika

Tip plovnog puta		**Tip morskog dna**		
		Tvrdo	**Umjereno**	**Meko**
Opći plovni put (plovni put nije u službi industrijskog postrojenja ili terminala)	E1	50	35	25
	E2	250	150	100
	E3	800	520	400
Posebni plovni put (Plovni put je u službi industrijskog postrojenja ili terminala)	E1	35	25	15
	E2	150	100	50
	E3	500	350	250
E1 – mali rizik za ljudske živote ili morski okoliš u slučaju nezgode E2 – umjeren rizik za ljudske živote ili morski okoliš u slučaju nezgode E3 – visok rizik za ljudske živote ili morski okoliš u slučaju nezgode				

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Prednost korištenja vjerojatnosti kod definiranja dimenzija plovnih putova je i mogućnost optimiziranja rizika. Rizik, kako je već ranije navedeno, je umnožak vjerojatnosti i posljedice događaja. Vjerojatnost se utvrđuje u ranije opisanom postupku, a nakon toga je potrebno utvrditi posljedice nezgode. Pri analizi rizika prilikom nasukanja broda, posljedice su veće za dodir broda s kamenitim dnom u odnosu na muljevito dno, tankere u odnosu na ostale brodove, te za nasukanja koja se dogode unutar osjetljivih ekoloških područja.

Jedan od načina održavanja prihvatljive razine rizika je definiranje odgovarajućeg broja godina eksploatacije plovnog puta (Tablica 22). Na taj se način izravno djeluje na prihvatljivu razinu vjerojatnosti nezgode, jer se definira kroz broj godina u kojem je prihvatljiv jedan dodir broda s dnom, i posljedično na rizik.

Osim računskih metoda i preporuka raznih autora, vjerojatnost prekoračenja pojedinih dimenzija plovnog puta može se izračunati koristeći računalne simulacijske alate. Svaki alat ima svoje prednosti i ograničenja koje je bitno uvažiti pri korištenju, a neki od istaknutijih alata su opisani u nastavku.

Monte Carlo simulacija jedna je od metoda za određivanje vjerojatnosti dodira broda s dnom, koja u opisanom i definiranom plovnom putu simulira plovidbu unaprijed definiranih tipova brodova.[146] Pri tome, bitno je naglasiti da odabir broda značajno utječe na izračunatu vjerojatnost, jer veliki broj brodova malog gaza u simulaciji može umanjiti vjerojatnost dodira broda s dnom. Za mjerodavne i stabilne podatke potrebno je izraditi velik broj simulacija plovidbe u analiziranom plovnom putu. Konačan rezultat daje vjerojatnost dodira broda s dnom u postotku, koja se izračuna kao omjer broja dodira broda s dnom uz ukupnim brojem prolaza brodova.

Jedan od alata koji na sličan način određuje vjerojatnost dodira broda s dnom je i *DUKC*.[147, 148, 149] DUKC je računalni alat koji deterministički određuje preostalu dubinu ispod kobilice broda koristeći stanje nakrcanosti broda, brzinu broda i unaprijed definirane vremenske uvjete. Potom se definira kretanje broda kroz analizirano područje, u končanom vremenu, kako bi se odredila vjerojatnost dodira broda s dnom i kapacitet plovnog puta. Rezultat preostale dubine tijekom simulacija može poslužiti kao statistička baza podataka pri definiranju optimalne dubine plovnog puta. Prednosti ovakvog načina optimiziranja dubine plovnog puta je kombinacija determinističkih metoda i vjerojatnosti, jer se na taj način mogu analizirati različiti faktori koji djeluju na preostalu dubinu ispod kobilice. Također, osim dubine moguće je i optimizirati kapacitet plovnog puta na temelju analizirane dubine i statističkih podataka o broju brodova.

Primjer alata za određivanje dubine plovnog puta koristeći vjerojatnost je program *CADET*.[150, 151, 152, 153] Program predviđa dostupnost plovnog puta za različite prihvatljive razine rizika, ne temelju *Gaussove* i *Rayleigheve* distribucije te *Ochijeve* analize UKC-a. Stanje mora se uobičajeno temelji na povijesnim podatcima lokalne valovne klime. Ti podatci sadrže distribuciju visine valova, perioda i smjera na godišnjoj razini. Dostupnost plovnog puta se određuje proračunom rizika dodira broda s dnom na temelju stanja mora. Predviđanja CADET programa dozvoljavaju odabir dubine sa što većom raspoloživošću za prihvatljivu razinu rizika. Program ne uključuje utjecaj nagiba broda zbog sile vjetra na preostalu dubinu ispod kobilice ili na širinu plovnog puta.

---

[146]Gucma, L., & Schoeneich, M. (2008). P*robabilistic Model of Underkeel Clearance in Decision Making Process of Port Captai*n. TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2(2).

[147]DUKC – *engl. Dynamic Under Keel Clearance*.

[148]Atkinson, E., O'Brien, P. (2008): *DUKC in Channel Design*, 6th IHMA Conference, St. Petersburg.

[149]O'Brien, W.T., O'Brien, P., Hens, C. (2012): *Use of Web-Based Decision Support Technology for In-Transit Under Keel Clearance Management*, 8th IHMA Conference, Cork.

[150]CADET - engl. *Channel Analysis and Design Evaluation Tool*

[151]Briggs, M.J., Silver, A. L., Borgman, L. E. (2006): *Risk-Based Predictions for Ship Underkeel Clearance*, ICCE 2006, San Diego.

[152]Briggs, M.J., Silver, A.L., Kopp, P.J. (2012): Chapter 6: *Risk-Based Channel Depth Design using CADET*, Series on Coastal and Ocean Engineering Practice – Vol. 1 (Editor: Y.C. Kim), World Scientific Publishing Company, Singapore, str. 319-366.

[153]Briggs, M. J., et al. (2013): *Validation of a Risk-Based Numerical Model for Predicting Deep-Draft Underkeel Clearance*, ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 139, No. 4, str. 267-276.

Računalni model *UNDERKEEL* razvijen je za potrebe proučavanja gibanja broda i djelovanja sile valova na brod, posebno u plitkoj vodi.[154] Model primjenjuje standardnu linearnu teoriju valova koja se koristi u frekvencijskoj domeni (pravilnim valovima) radi opisa ponašanja valova i protoka vode u blizini trupa broda. Proračunom je obuhvaćeno svih šest stupnjeva slobode broda na valovima, te sve komponente sila i momenata valova. Jedan od rezultata računalnog modela je procjena vertikalnog kretanja broda pri plovidbi u ograničenom plovnom putu uzrokovano valovima radi utvrđivanja preostale dubine ispod kobilice.

3.5. Promjene u razini dna

Pri projektiranju dubine novog plovnog puta, s aspekta sigurnosti plovidbe, potrebno je definirati sigurnu dubinu za plovidbu projektnog tipa broda. U velikom broju slučajeva, da bi se dobila odgovarajuća dubina, plovni put je potrebno jaružati. Međutim, plovni put se jaruža preko definirane nominalne razine dna, zbog pogreške u mjerenju dubine, zamuljivanja između dvaju jaružanja i pogreške u jaružanju. Svi navedeni dodatni faktori, u slučaju da se plovni put izjaruža do nominalne razine, doveli bi do povećanja nominalne razine dna te posljedično do smanjenja preostale dubine ispod kobilice broda.

[154]Harbour Approach Channels Design Guidelines, PIANC, Report No. 121-2014.

4. ANALIZA ŠIRINE PLOVNOG PUTA

Pri definiranju širine plovnog puta, bilo novog ili postojećeg, raspoloživa dubina je prvi podatak koji bitno utječe na horizontalnu dimenziju plovnog puta. S obzirom kako je produbljivanje plovnog puta dugotrajan i skup proces, stalan porast nosivosti brodova uvelike se očituje kroz povećanje dimenzija širine i duljine broda u odnosu na gaz. Kako bi se osigurala dovoljna razina sigurnost plovidbe, potrebno je potpuno razumjeti sve sile i momente koje djeluju na brod u plovidbi u ograničenom području, te ih pravilno procijeniti kako ne bi došlo do predimenzioniranja novog plovnog puta ili do ograničavanja veličine brodova na postojećem plovnom putu. Razvojem sustava sigurnosti i nadzora plovidbe poput elektroničkih karata, diferencijalnog GPS-a, službe nadzora prometa (VTS[155]) i sustava za automatsku identifikaciju brodova (AIS[156]) omogućeno je održavanje odgovarajuće razine sigurnosti plovidbe. Svi navedeni sustavi pomažu u utvrđivanju točnog položaja broda, rane detekcije zanosa, uočavanju okolnog prometa i stanja na plovnom putu. Opisana metodologija prema PIANC-u, ROM-u i MLIT-u predstavlja najnoviju praksu određivanja sigurne širine plovnog puta, a kombinacijom analiziranih metoda moguće je unaprijediti proces određivanja širine plovnog puta.

4.1. Širina jednosmjernog plovnog puta

Jednosmjerni plovni put se u većini slučajeva koristi na područjima u kojima količina prometa ne zahtijeva veći kapacitet plovnog puta ili kada je potrebno udovoljiti većim zahtjevima sigurnosti plovidbe. Postupak određivanja širine je opisan u nastavku teksta.

4.1.1. Širina jednosmjernog plovnog puta prema PIANC-u

Izraz za izračun ukupne širine ravnog dijela jednosmjernog plovnog puta prema PIANC-u glasi:[157]

$$W = W_{BM} + \sum W_i + W_{BR} + W_{BG}\,, \qquad [52]$$

gdje je:

W_{BM} – osnovna širina plovnog puta (m)

W_i – dodatna širina plovnog puta uslijed utjecaja vanjskih sila (m)

$W_{BR(BG)}$ – dodatna udaljenost zbog sila međudjelovanja broda i obale (lijevo i desno) (m).

Osnovna širina plovnog puta W_{BM} određuje se na temelju manevarskih karakteristika broda (Tablica 23). Uobičajeno se smatra, da je manevrabilnost brodova za prijevoz tekućih tereta u razlivenom stanju (tankeri) i brodova za prijevoz suhog rasutog tereta općenito slabija, brodova za prijevoz kontejnera, te brodova za prijevoz ukapljenih plinova je umjerena, dok je kod brodova s dvama vijcima, trajektima i putničkim brodovima za kružna putovanja dobra. Nakon što se utvrde manevarske karakteristike referentnog broda, dobiveni koeficijent se množi sa širinom broda da se dobije osnovna širina plovnog puta.

Tablica 23: Širina osnovne plovidbene trake, W_{BM}

Manevrabilnost broda	Dobre	Umjerene	Slabe
Osnovna plovidbena traka, W_{BM}	1,3 B	1,5 B	1,8 B

(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

[155]VTS – engl. *Vessel Traffic Service*

[156]AIS – engl. *Automatic Identification System*

[157]*Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

Tablica 24: Dodatna širina plovnog puta prema PIANC-u

Širina, W_i	Brzina broda	Vanjski plovni put		Unutarnji plovni put	
Brzina broda u čvorovima (kroz vodu)					
$V_{čv} \geq 12$ čv	Velika	0,1 *B*			
8 čv $\leq V_{čv} <$ 12 čv	Umjerena	0,0			
5 čv $\leq V_{čv} <$ 8 čv	Mala	0,0			
Prevladavajući bočni vjetar *Vvj* (čvorovi)					
Slabi	Velika	0,1 *B*			
Vvj < 15 čv	Umjerena	0,2 *B*			
(< 4 Bf)	Mala	0,3 *B*			
Umjereni	Velika	0,3 *B*			
15 čv $\leq$ *Vvj* < *33* čv	Umjerena	0,4 *B*			
*(*od 4 do 7 *Bf)*	Mala	0,6 *B*			
Jaki	Velika	0,5 *B*			
33 čv $\leq Vv_j <$ *48* čv	Umjerena	0,7 *B*			
*(*od 7 do 9 *Bf)*	Mala	1,1 *B*			
Prevladavajuća poprečna morska struja *Vstrj* (čvorovi)					
Zanemariva	Sve	0,0		0,0	
Vstrj < 0,2 čv					
	Velika	0,2 *B*		0,1 *B*	
Slaba	Umjerena	0,25*B*		0,2 *B*	
0,2 čv $\leq$ *Vstrj* < *0,5* čv	Mala	0,3 *B*		0,3 *B*	
	Velika	0,5 *B*		0,4 *B*	
Umjerena	Umjerena	0,7 *B*		0,6 *B*	
0,5 čv $\leq$ *Vstrj* < *1,5* čv	Mala	1,0 *B*		0,8 *B*	
Jaka	Velika	1,0 *B*		-	
1,5 čv $\leq$ *Vstrj* < *2,0* čv	Umjerena	1,2 *B*		-	
	Mala	1,6 *B*		-	
Prevladavajuća uzdužna morska struja *Vstrj* (čvorovi)					
Slaba	Sve	0,0			
*Vstrj < 1,5*čv					
	Velika	0,0			
Umjerena	Umjerena	0,1 *B*			
1,5 čv $\leq$ *Vstrj* < *3,0* čv	Mala	0,2 *B*			
Jaka	Velika	0,1 *B*			
Vstrj $\geq$ *3,0* čv	Umjerena	0,2 *B*			
	Mala	0,4 *B*			
Visina valova s boka i u krmu *Hs* (m)					
Hs $\leq$ 1,0 m	Sve	0,0		0,0	
1 m < *Hs* < 3 m	Sve	$\approx$ 0,5		-	
Hs $\geq$ 3 m	Sve	$\approx$ 1,0 *B*		-	
Oprema za pomoć pri navigaciji					
Odlična		0,0			
Dobra		0,2 *B*			
Umjerena		0,4 *B*			
Morsko dno					
Dubina h $\geq$ 1,5 *T*		0,0			
Dubina h < 1,5 *T*					
meko i ravno dno		0,1 *B*			
kamenito i neravno dno		0,2 *B*			
Dubina plovnog puta		*h* $\geq$ 1,50 *T*	0,0	*h* $\geq$ 1,50 *T*	0,0
		1,5 *T* > *h* $\geq$ 1,25 *T*	0,1 *B*	1,5 *T* > *h* $\geq$ 1,15 *T*	0,2 *B*
		h < 1,25 *T*	0,2 *B*	*h* < 1,25 *T*	0,4 *B*

(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

Dodatna širina plovnog puta W_i određuje se kao funkcija brzine broda, vjetra, struje, valova, opreme za pomoć pri navigaciji, tipa morskog dna i odnosa dubine plovnog puta i gaza broda. Dodatna širina uključuje faktor brzine broda, djelovanje vanjskih sila vjetra, struja i valova, raspoloživu opremu za pomoć pri navigaciji, tip morskog dna i dubinu plovnog puta. Podatci su prikazani u tablici 24, a konačna dodatna širina predstavlja sumu faktora dodatne širine.

Širinu plovnog puta, prema analiziranoj metodologiji, čini i dodatna širina na lijevoj *(W_{BR})* i desnoj (W_{BG}) strani plovnog puta koju treba uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja broda i obale. Razlog zbog kojeg je potrebno uvažiti dodatnu širinu s obje strane plovnog puta je taj što se kod opisane metode kreće od pretpostavke da brod plovi uvijek u sredini simetričnog plovnog puta. Dodatna širina se određuje na temelju vrste pokosa plovnog puta i brzine broda (Tablica 25).

Tablica 25: Dodatna širina plovnog puta zbog sila međudjelovanja između broda i obale

Dodatna širina od ruba plovnog puta (lijevo i desno)	Brzina broda	Vanjski plovni put	Unutarnji plovni put
Blagi pokos ruba plovnog puta	Velika	0,2 *B*	0,2 *B*
	Umjerena	0,1 *B*	0,1 *B*
	Mala	0,0 *B*	0,0 *B*
Umjereni pokos ruba plovnog puta	Velika	0,7 *B*	0,7 *B*
	Umjerena	0,5 *B*	0,5 *B*
	Mala	0,3 *B*	0,3 *B*
Strmi i okomiti rubovi plovnog puta	Velika	1,3 *B*	1,3 *B*
	Umjerena	1,0 *B*	1,0 *B*
	Mala	0,5 *B*	0,5 *B*

(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

4.1.2. Širina jednosmjernog plovnog puta prema ROM-u

Izraz za izračun ukupne širina ravnog dijela jednosmjernog plovnog puta prema ROM-u glasi:[158]

$$W = B + b_d + 2(b_e + b_r + b_b) + \left(rh_{sm} + rh_{sd}\right)_i + \left(rh_{sm} + rh_{sd}\right)_d , \qquad [53]$$

gdje su:

B – širina broda (m)

b_d – dodatna širina uslijed zaošijanja i zanosa uzrokovano vanjskim silama (m)

b_e – dodatna širina uslijed pogreške određivanja pozicije broda (m)

b_r – dodatna širina uslijed vremena reakcije (m)

b_b – dodatna širina uslijed pogreške koju mogu uzrokovati oznake plovnog puta (m)

[158]Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.

rh_{sm} – dodatna sigurnosna udaljenost kako ne bi došlo do međudjelovanja između broda i obale (m)

rh_{sd} – dodatna sigurnosna margina između broda i obale (m).

Za razliku od ranije opisane metode, u ovom slučaju osnovna širina plovnog puta je jednaka širini broda *B,* na koju se dodaju ostale dodatne širine.

Dodatna širina b_d uzima u obzir djelovanje vanjskih sila vjetra, struja, valova i djelovanja tegljača. Na temelju zanosa i zaošijanja koje uzrokuju navedene vanjske sile određuje se dodatna širina ograničenog plovnog puta. Izraz za određivanje dodatne širine ograničenog plovnog puta zbog djelovanja vanjskih sila glasi:

$$b_d = Lpp \cdot \sin \beta \qquad [54]$$

$$\beta = \beta_{vjetar} + \beta_{struje} + \beta_{valovi} + \beta_{tegljače}, \qquad [55]$$

gdje su:

Lpp – duljina broda između okomica (m)

β – kut zanosa broda (°).

Svaki analizirani kut zanosa može se izračunati pojedinačno. Zanos koji uzrokuje sile vjetra može se odrediti koristeći izraz:

$$\beta = \arcsin \frac{Kv \cdot Cv \cdot Vvj \cdot \sin \alpha_{vj}}{Vr}, \qquad [56]$$

gdje su:

Vvj – brzina vjetra (m/s)

$V_{m/s}$ – brzina broda kroz vodu (m/s)

α_{vj} – kut nailaska vjetra u odnosu na simetralu broda (°)

Cv – koeficijent koji ovisi o obliku trupa, omjeru dubine vode i gaza broda (*h/T*), i kutu djelovanja vjera u odnosu na simetralu broda (α_{vj}). Vrijednosti koeficijenta *Cv* se može odrediti koristeći tablicu 26.

Tablica 26: Koeficijent sile vjetra *Cv* koji djeluje na trup broda

h/T	***Cv***			
	$\alpha_{vj} \leq 10°$	$\alpha_{vj} = 30°$	$\alpha_{vj} = 60°$	$\alpha_{vj} = 90°$
Konvencionalni pramac				
≤ 1,20	0,0243	0,0161	0,0130	0,0121
2,00	0,0255	0,0168	0,0136	0,0127
≥ 5,00	0,0259	0,0171	0,0139	0,0129
Pramac s bulbom				
≤ 1,20	0,0343	0,0227	0,0184	0,0172
2,00	0,0402	0,0266	0,0216	0,0201
≥ 5,00	0,0423	0,0280	0,0227	0,0211

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Koeficijent K_v, korišten u izrazu [57], predstavlja omjer bočne nadvodne površine broda (A_{LV}) i bočne podvodne površine broda (A_{LC}), a određuje se koristeći izraz:

$$K_v = \left(\frac{A_{LV}}{A_{LC}} \right)^{0,5} . \qquad [57]$$

Kut zanosa koji uzrokuje struja može se odrediti koristeći izraz:

$$\beta = arctg \frac{V_{strj} \cdot \sin \alpha_{strj}}{V + V_{strj} \cdot \cos \alpha_{strj}}, \qquad [58]$$

gdje su:

V_{strj} – apsolutna brzina struje (m/s)

$V_{m/s}$ – brzina broda preko dna (m/s), (preporučena granična brzina broda nalazi se u tablici 27)

α_{strj} – kut između smjera djelovanja struje i simetrale broda (°).

Tablica 27: Preporuka brzine broda preko dna za različita područja plovidbe

Područje plovidbe	**Apsolutna brzina broda**	
	(m/s)	**(čv)**
Plovni put izložen vanjskim silama		
Prilazni plovni put luci		
Duži	4 – 7,5	8 – 15
Kraći	4 – 6	8 – 12
Sidrište	1 – 1,5	2 – 3
Područje za manevriranje	2 – 3	4 – 6
Prilaz vezu	1 – 1,5	2 – 3
Ulaz u luku	2 – 4	4 – 8
Zaštićena lučka područja		
Sidrište	1 – 1,5	2 – 3
Plovni put	3 – 5	6 – 10
Područja za manevriranje	2 – 3	4 – 6
Lučki bazeni	1 – 1,5	2 – 3

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Zanos ili zaošijanje koje uzrokuju valovi može se odrediti koristeći izraz:

$$\beta = \arcsin \left[C_{val} \cdot \left(\frac{g}{T} \right)^{0,5} \cdot \frac{Hs}{V} \right], \qquad [59]$$

gdje su:

g – ubrzanje sile teže (m/s^2)

T – gaz broda (m)

Hs – značajna visina valova (m)

C_{val} – koeficijent koji se određuje na temelju oblika trupa broda, odnosa dubine vode i gaza broda (h/T) i kuta djelovanja valova u odnosu na simetralu broda α_{val}. Pri aproksimaciji koeficijenta ne uzima se u obzir period i duljina valova. Podatci su prikazani u tablici 28.

Tablica 28: Koeficijent sile valova C_{val} koji djeluju na trup broda

h/T	C_{val}						
	$\alpha_{val} \leq 10°$	$\alpha_{val} = 30°$	$\alpha_{val} = 60°$	$\alpha_{val} = 90°$	$\alpha_{val} = 120°$	$\alpha_{val} = 150°$	$\alpha_{val} \geq 170°$
Konvencionalni pramac							
≤ 1,2	0,0296	0,0512	0,1067	0,1323	0,1183	0,0725	0,0418
2,0	0,0310	0,0537	0,118	0,1387	0,1240	0,0760	0,0439
≥ 5,0	0,0315	0,0546	0,1137	0,1410	0,1261	0,0772	0,0446
Pramac s bulbom							
≤ 1,2	0,0418	0,0725	0,1508	0,1871	0,1673	0,1025	0,0592
2,0	0,0490	0,0849	0,1768	0,2193	0,1961	0,1201	0,0693
≥ 5,0	0,0515	0,0892	0,1857	0,2303	0,2060	0,1261	0,0728

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Zanos koji uzrokuje djelovanje tegljača može se odrediti koristeći izraz:

$$\beta = \arcsin\left[Cr\left(\frac{g \cdot F_{TR}}{A_{LC} \cdot \rho_w \cdot g} \right)^{0,5} \cdot \frac{1,0}{Vr} \right], \qquad [60]$$

gdje su:

F_{TR} – sila kojom tegljač djeluje na brod (t)

A_{LC} – uzdužna podvodna površina broda (m^2)

ρ_w – gustoća vode (t/m^3)

Vr – brzina broda kroz vodu (m/s)

Cr – koeficijent koji se određuje na temelju oblika trupa broda i odnosa dubine vode i gaza broda (h/T). Podatci su prikazani u tablici 29.

Tablica 29: Koeficijent sile tegljača Cr koji djeluje na brod

h/T	*Cr*	
	Pramac s bulbom	**Konvencionalni pramac**
≤ 1,2	0,63	0,45
2,0	0,74	0,47
≥ 5,0	0,78	0,48

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Dodatna širina plovnog puta zbog pogreške određivanja pozicije broda b_e određuje se na temelju raspoložive elektroničke opreme i vizualnih pomagala, te iskustva peljara ili zapovjednika broda. Preporuke dodatnih širina plovnog puta zbog pogreške određivanja pozicije prikazane su u tablici 30. Vrijednosti u tablici izražene u metrima predstavljaju dodatnu širinu plovnog puta, dok vrijednosti u stupnjevima predstavljaju ulazni podatak za izračun dodatne širine. Dodatna širina se dobije kao umnožak udaljenosti broda od objekta od kojeg se mjeri kut i sinusa kuta.

Tablica 30: Dodatna širina plovnog puta zbog pogreške određivanja pozicije broda b_e

Način određivanja pozicije broda	**Neiskusni peljar/zapovjednik**	**Iskusni peljar/zapovjednik**
Vizualno određivanje pozicije broda		
Široki plovni putovi, bez navigacijskih oznaka	100 m	50 m
Prilazni plovni put označen plutačama ili svjetionicima	50 m	25 m
Plovni put označen plutačama i svjetionicima	20 m	10 m
Pokriveni smjerovi	0,5°	0,5°
Elektronički uređaji		
Radar, S Band	1,5°	1,5°
Radar, X Band	1°	1°
GPS	100 m	100 m
DGPS	10 m	10 m

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Dodatna širina plovnog puta zbog vremena reakcije b_r podrazumijeva potrebno vrijeme reakcije broda na otklon kormila, a određuje se kao funkcija manevarskih karakteristika broda, širine broda (B), odnosa dubine vode i gaza broda (h/T), te najvećeg dopuštenog rizika tijekom vremena korištenja plovnog puta (E_{max}), koristeći izraz:

$$b_r = (1{,}50 - E_{\max}) \cdot b_r \,, \qquad [61]$$

gdje su:

E_{max} – najveći prihvatljivi rizik (Tablica 31)

b_{ro} – dodatna širina plovnog puta zbog vremena reakcije (m) (Tablica 32).

Tablica 31: Najveći prihvatljivi rizik E_{max}

ŠTETE		**Vjerojatnost gubitka ljudskih života**	
		Smanjena	**Očekivana**
Ekonomske posljedice u slučaju nezgode:	NISKE	0,50	0,30
	SREDNJE	0,30	0,20
	VISOKE	0,25	0,15
POTPUNI GUBITAK		**Vjerojatnost gubitka ljudskih života**	
		Smanjena	**Očekivana**
Ekonomske posljedice u slučaju nezgode:	NISKE	0,20	0,15
	SREDNJE	0,15	0,10
	VISOKE	0,10	0,05

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

U tablici 31 vjerojatnost gubitka ljudskih života je smanjena kad se ne očekuje gubitak ljudskih života u slučaju nezgode, i očekivana kad se očekuje gubitak ljudskih života u slučaju nezgode.

Tablica 32: Određivanje dodatne širine plovnog puta zbog vremena reakcije na temelju manevarskih karakteristika broda

Manevrabilnost broda	b_{ro}	
	$h/T \leq 1{,}20$	$h/T \geq 1{,}50$
Dobra	0,10 *B*	0,10 *B*
Umjerena	0,20 *B*	0,15 *B*
Loša	0,30 *B*	0,20 *B*

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

U tablici 32 brodovima dobrih manevarskih karakteristika se smatraju trajekti, RO-RO brodovi, te manji ribarski brodovi i brodovi nautičkog turizma. Brodovima umjerenih manevarskih karakteristika se smatraju tankeri za prijevoz tekućih tereta u razlivenom stanju, brodovi za prijevoz generalnih tereta, brodovi za prijevoz suhih rasutih tereta, brodovi za prijevoz ukapljenih plinova, putnički brodovi. Međutim, ova grupa brodova može se smatrati brodovima dobrih karakteristika u slučaju da ne koriste više od 50 % teretnog kapaciteta. Brodovima loših manevarskih karakteristika se smatraju loše održavani brodovi i brodovi ograničenih manevarskih sposobnosti.

Dodatna širina plovnog puta zbog pogreške koju mogu uzrokovati oznake plovnog puta b_b predstavljaju najveći pomak plutače od pozicije označene na karti, a koja je određena na temelju graničnih vremenskih uvjeta i morskih mijena za konkretno područje. Također je potrebno odrediti vjerojatnost većeg odstupanja položaja plutače.

U slučaju da se koriste pokriveni smjerovi, najveća dopuštena pogreška iznosi 0,5°. Tada se dodatna širina plovnog puta, za najveću pogrešku pokrivenog smjera od 0,5°, odredi kao umnožak udaljenosti broda od oznake pokrivenog smjera i sinusa kuta pogreške (0,5°).

Na kraju se određuje dodatna sigurnosna širina koja se dodaje na obje strane plovnog puta, iz razloga da se izbjegne utjecaj međudjelovanja između broda i obale. Ta dodatna širina se određuje posebno za desnu stranu plovnog puta i posebno za lijevu stranu plovnog puta, na temelju izgleda pokosa ruba plovnog puta. Dodatna sigurnosna širina od ruba plovnog puta dijeli se na dvije udaljenosti: širinu da se izbjegne utjecaj međudjelovanja između broda i obale (rh_{sm}) i dodatnu sigurnosnu širinu koja uvijek mora biti raspoloživa (rh_{sd}). Podatci o dodatnoj širini plovnog puta zbog sile međudjelovanja prikazani su u tablici 33.

Tablica 33: Preporučene dodatne širine plovnog puta zbog sile međudjelovanja između broda i obale

Plovni put	rh_{sm}	rh_{sd}	rh_{sd+} rh_{sd}
Plovni put s pokosom 1:3 (omjer visine obale i duljine pokosa)			
Apsolutna brzina broda ≥ 3 čv	0,6 *B*	0,1 *B*	0,7 *B*
Apsolutna brzina broda između 2 i 3 čv	0,4 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*
Apsolutna brzina broda ≤ 2 čv	0,2 *B*	0,1 *B*	0,3 *B*
Plovni put s pokosom manjim 1:2 ili okomitog obalnog ruba			
Apsolutna brzina broda ≥ 3 čv	1,2 *B*	0,2 *B*	1,4 *B*
Apsolutna brzina broda između 2 i 3 čv	0,8 *B*	0,2 *B*	1,0 *B*
Apsolutna brzina broda ≤ 2 čv	0,4 *B*	0,2 *B*	0,6 *B*

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

4.1.3. Širina jednosmjernog plovnog puta prema MLIT-u

Izraz za izračun ukupne širina ravnog dijela jednosmjernog plovnog puta prema MLIT-u glasi:[159]

$$W = (W_{BM} + W_{IF}) \cdot C_{FS} \qquad [62]$$

gdje su:

W_{BM} – osnovna širina plovnog puta (m)

W_{IF} – dodatna širina plovnog puta uslijed sila međudjelovanja

C_{FS} – faktor sigurnosti (izračunat na temelju procjene rizika).

U ovoj metodologiji osnovna širina plovidbene trake, za razliku od ranije analiziranih, ne sadrži širinu broda već dodatne širine zbog djelovanja vanjskih sila, tj. zanosa i zaošijavanja koje uzrokuju te vanjske sile. Osnovna širina se određuje koristeći izraz:

$$W_{BM} = a(W_{vj} + W_{strj} + W_z + W_{dz}), \qquad [63]$$

[159]Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan* .

gdje su:

a – koeficijent organizacije prometa plovnog puta
(a = 1 za jednosmjernu plovidbu, a = 2 za dvosmjernu plovidbu)

W_{vj} – dodatna širina uslijed djelovanja sile vjetra (m)

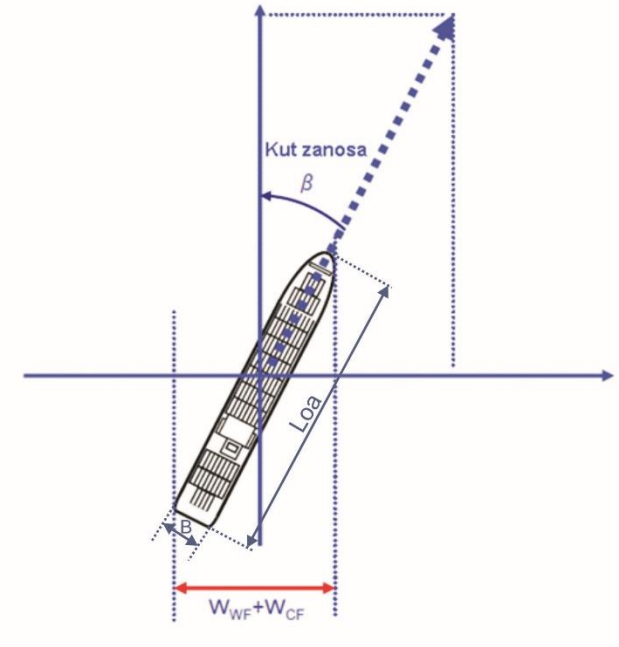
W_{strj} – dodatna širina uslijed djelovanja sile struja (m)

W_z – dodatna širi uslijed zaošijanja (m)

W_{dz} – dodatna širina uslijed detekcije zanosa (m).

Dodatna širina plovnog puta uslijed djelovanja sile vjetra i struja ($W_{vj} + W_{strj}$) može se izračunati na temelju kuta zanosa broda β (Slika 25), a izraz glasi:

$$W_{vj} + W_{strj} = Loa \cdot \sin\beta + B \cdot \cos\beta \,. \qquad [64]$$



Slika 25: Dodatna širina plovnog puta zbog djelovanja sile vjetra i valova
(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

Kut zanosa od utjecaja vjetra β_1 i odgovarajući kut otklona kormila koji je potreban da bi se kompenzirao utjecaj zanosa od vjetra δ_1 je određen za petnaest vrsta brodova, za plitku vodu (h/T = 1,2) (Tablica 34). Međutim, podatci u tablici su izračunati kad je brzina broda jednaka brzini vjetra , tj. omjer brzine vjetra i brzine broda K je jednak jedan.

$$K = \frac{V_{vj}}{V}\,, \qquad [65]$$

gdje su:

V_{vj} – brzina vjetra (m/s)

$V_{m/s}$ – brzina broda (m/s).

Kuta zanosa vjetra β_1 i odgovarajućeg kut otklona kormila da bi se kompenzirao utjecaj zanosa vjetra δ_1 za različitu vrijednost K se korigira koristeći izraze:

$$\beta_1(K) = K^2 \cdot \beta \qquad [66]$$

$$\delta_1(K) = K^2 \cdot \delta\,, \qquad [67]$$

gdje je:

β – vrijednost kuta zanosa broda uslijed djelovanja sile vjetra iz tablice 34

δ – vrijednost kuta otklona kormila da bi se kompenzirao utjecaj zanosa iz tablice 34.

Tablica 34: Kut zanosa β_1 i odgovarajući kut otklona kormila da bi se kompenzirao utjecaj zanosa δ_1 uslijed djelovanja sile vjetra

Tip broda		Relativni smjer puhanja vjetra (°)												
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	168	180
Brod za prijevoz generalnog tereta	β_1(°)	0,000	0,003	0,007	0,011	0,014	0,017	0,017	0,015	0,011	0,007	0,003	0,001	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,017	0,049	0,102	0,169	0,233	0,276	0,284	0,257	0,204	0,138	0,068	0,001
Manji teretni brod	β_1(°)	0,000	0,006	0,011	0,017	0,021	0,024	0,024	0,021	0,016	0,011	0,006	0,003	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,028	0,069	0,128	0,199	0,267	0,313	0,325	0,300	0,245	0,170	0,087	0,001
Brod za prijevoz kontejnera (Postpanamax)	β_1(°)	0,000	0,015	0,029	0,038	0,042	0,043	0,040	0,036	0,030	0,023	0,016	0,008	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,070	0,143	0,220	0,303	0,387	0,461	0,510	0,517	0,468	0,357	0,195	0,002
Brod za prijevoz kontejnera (Panamax)	β_1(°)	0,000	0,015	0,029	0,038	0,042	0,043	0,040	0,036	0,030	0,023	0,016	0,008	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,070	0,143	0,220	0,303	0,387	0,461	0,510	0,517	0,468	0,357	0,195	0,002
Brod za prijevoz rasutog tereta (Postpanamax)	β_1(°)	0,000	0,002	0,005	0,008	0,010	0,012	0,012	0,010	0,008	0,005	0,003	0,001	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,015	0,039	0,077	0,124	0,169	0,199	0,206	0,189	0,153	0,105	0,053	0,000
Brod za prijevoz rasutog treta (Panamax)	β_1(°)	0,000	0,002	0,004	0,006	0,008	0,009	0,009	0,008	0,006	0,004	0,002	0,001	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,015	0,036	0,067	0,104	0,139	0,162	0,167	0,153	0,124	0,085	0,043	0,000
Brod za prijevoz rasutog treta (Handysize)	β_1(°)	0,000	0,006	0,012	0,018	0,024	0,027	0,026	0,023	0,018	0,012	0,006	0,003	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,027	0,070	0,135	0,217	0,296	0,351	0,367	0,340	0,278	0,194	0,099	0,001
Tanker (VLCC)	β_1(°)	0,000	0,002	0,005	0,008	0,011	0,013	0,013	0,011	0,008	0,005	0,002	0,001	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,008	0,027	0,059	0,102	0,143	0,170	0,174	0,157	0,123	0,082	0,040	0,000
Tanker (razvoz)	β_1(°)	0,000	0,003	0,007	0,011	0,014	0,017	0,017	0,015	0,011	0,007	0,003	0,001	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,015	0,044	0,095	0,016	0,223	0,264	0,272	0,245	0,193	0,129	0,064	0,001
Brod za prijevoz automobila (Postpanamax)	β_1(°)	0,000	0,041	0,076	0,103	0,118	0,122	0,115	0,100	0,080	0,059	0,038	0,019	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,159	0,340	0,556	0,806	1,067	1,298	1,450	1,470	1,324	1,006	0,546	0,005
Brod za prijevoz automobila	β_1(°)	0,000	0,051	0,097	0,132	0,152	0,158	0,149	0,130	0,104	0,076	0,048	0,024	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,161	0,353	0,593	0,877	1,176	1,440	1,609	1,626	1,458	1,104	0,598	0,006
Brod za prijevoz ukapljenih plinova (LNG)	β_1(°)	0,000	0,033	0,063	0,087	0,103	0,109	0,105	0,091	0,072	0,052	0,032	0,015	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,092	0,211	0,374	0,573	0,780	0,952	1,049	1,040	0,914	0,680	0,364	0,003
Brod za prijevoz hlađenog tereta	β_1(°)	0,000	0,008	0,015	0,023	0,028	0,032	0,031	0,028	0,022	0,015	0,008	0,004	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,036	0,089	0,164	0,255	0,342	0,405	0,425	0,397	0,328	0,231	0,119	0,001
Putnički brod	β_1(°)	0,000	0,008	0,015	0,023	0,028	0,032	0,031	0,028	0,022	0,015	0,008	0,004	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,174	0,363	0,578	0,826	1,097	1,361	1,561	1,629	1,507	1,169	0,643	0,006
Trajekt	β_1(°)	0,000	0,053	0,100	0,136	0,158	0,164	0,155	0,135	0,108	0,078	0,050	0,024	0,000
	δ_1(°)	0,000	0,113	0,253	0,438	0,662	0,900	1,111	1,244	1,257	1,126	0,851	0,460	0,004

(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

Kut zanosa uslijed djelovanja sile struje β_2 može se izračunati koristeći izraz:

$$\beta_2 = arctg\left(\frac{V_{strj}}{V}\right), \qquad [68]$$

gdje su:

V_{strj} – brzina struje (m/s)

$V_{m/s}$ – brzina broda (m/s).

Uslijed djelovanja vanjskih sila, koje uzrokuju zaošijanje broda, potrebno je odrediti dodatnu širinu zbog zaošijavanja broda W_z koristeći izraz:

$$W_z = \frac{1}{2} \cdot V \cdot T_z \cdot \sin \psi_z , \qquad [69]$$

gdje su:

$V_{m/s}$ – brzina broda (m/s)

T_z – period zaošijavanja (s)

ψ_z – kut zaošijaja (°).

Najveći zanos do kojeg može doći, a koji će časnik primijetiti vizualno osmatrajući plutače (Slika 26) na plovnom putu može se odrediti koristeći izraz:

$$W_{dz} = 2L_F \cdot tg\alpha_{MAX} , \qquad [70]$$

gdje su:

W_{dz} – dodatna širina plovnog puta zbog zakašnjele reakcije (m)

L_F – horizontalna udaljenost osmatrača od plutače (m)

α_{MAX} – kut koji zatvara položaj osmatrača i sredina plovnog puta (°).

Ako se pretpostavi da vrijednost horizontalne udaljenosti osmatrača od plutače (L_F), za jednosmjerne plovne putove iznosi 3,5 duljine broda, a za dvosmjerne 7 duljina broda, tada izraz za kut koji zatvara položaj osmatrača i sredina plovnog puta α_{MAX} glasi:

$$\alpha_{MAX} = 0{,}00176 \cdot \theta^2 + 0{,}00080 \cdot \theta + 2{,}21372 \quad , \qquad [71]$$

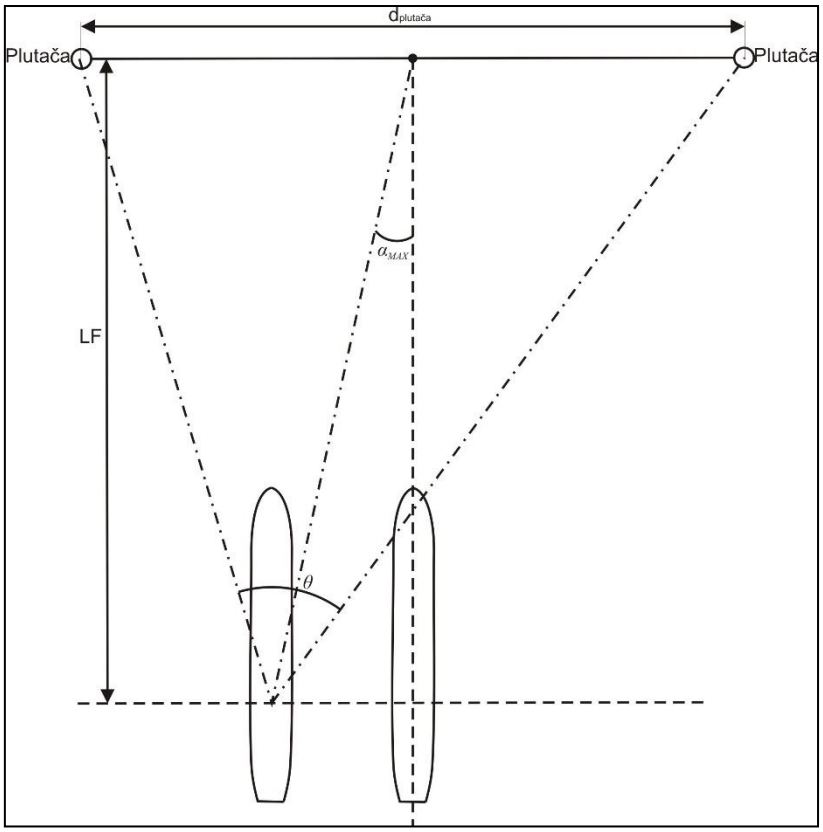
gdje je:

θ – kut koji zatvara pravac između osmatrača i plutače s obje strane plovnog puta.

Kut koji zatvara pravac između osmatrača i plutače s obje strane plovnog puta može se odrediti izrazom:

$$\theta = 2\text{arctg}\left(\frac{d_{plutaca}}{2L_F} \right), \qquad [72]$$

gdje je $d_{plutača}$ horizontalna udaljenost između dviju plutača na suprotnim stranama plovnog puta.



Slika 26: Vizualno određivanje zanosa broda
(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

Najveći zanos do kojeg može doći, a za koji će časnik primijetiti osmatrajući plutače koristeći radarski uređaj na plovnom putu može se odrediti koristeći izraz:

$$Max_{Zanos2} = 2\left(\frac{d_{plutaca}}{\sin\theta}\right)\cdot\sin\gamma\,, \qquad [73]$$

gdje je:

γ – pogreška u mjerenju horizontalnog kuta (°).

Ako pretpostavimo da pogreška u mjerenju kuta (γ) može biti 1 ili 2 stupnja, tada se najveći zanos može odrediti koristeći izraze:

$$Max_{Zanos2} = 0{,}0698\frac{d_{Plutaca}}{\sin\theta} \text{ za } \gamma = 1° \qquad [74]$$

$$Max_{Zanos2} = 0{,}0349\frac{d_{Plutaca}}{\sin\theta} \text{ za } \gamma = 2°\,. \qquad [75]$$

Brodovi danas posjeduju GPS (DGPS) i prikazivač pomorskih karata s informacijskim sustavom koji omogućuju puno točniju i bržu detekcija zanosa. Pretpostavlja se da greška percepcije broda na zaslonu iznosi pola širine broda, a greška GPS uređaja ne prelazi 30 metara, dok se za DGPS uređaj smatra da nema značajnije pogreške u poziciji te se može pisati:

$$Max_{Zanos3} = B + 60\text{, za GPS} \qquad [76]$$

$$Max_{Zanos3} = B\text{, za DGPS.} \qquad [77]$$

Faktor sigurnosti C_{FS} se izračunava na temelju procjene rizika. Razina rizika, niska, umjerena ili visoka, se određuje na temelju podataka o brzini broda, tipu tereta, gustoći prometa i faktora nesigurnosti (Tablica 35). Vrijednosti za gustoću prometa su funkcija udaljenost između brodova, dok se faktor nesigurnosti određuje na temelju subjektivnog pristupa.

Tablica 35: Tablica za procjenu razine rizika

Faktori procjene	**Razina rizika**		
	Niska	**Umjerena**	**Visoka**
Brzina broda	V_{kn}< 7,5 čv	7,5 čv ≤ V_{kn} < 12,5 čv	V_{kn} ≥ 12,5 čv
	0	0	1
Vrsta tereta	Rasuti	Putnici	Ugljikovodici
	Generalni teret	….	LPG
	Kontejneri		LNG
	….		Kemikalije
			….
	0	1	3
Gustoća prometa (IB – Interval broda, udaljenost između dvaju uzastopnih brodova)	10 Loa ≤ *IB*	6 Loa ≤ *IB* < 10 Loa	4 Loa ≤ *IB* < 6 Loa
	0	2	5
Faktor nesigurnosti	0	1	3

(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

Temeljem rezultata procjene razine rizika, prema predloženoj tablici (Tablica 36) može se odrediti vrijednost faktor sigurnost C_{FS}.

Tablica 36: Tablica predloženih rezultata procjene razine rizika koji se koristi za određivanje faktora sigurnosti C_{FS}

Rezultat procjene rizika	C_{FS}
0 ~ 2	1,0
3 ~ 6	1,1
7 ~ 9	1,2
10 ~12	1,3

(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

4.2. Dvosmjerna plovidba

Na organizaciju prometa plovnog puta utječe raspoloživa dubina i širina. U slučaju da je raspoloživa dubina i širina dovoljna, te je postignut odgovarajući faktor razine sigurnosti, organizacija prometa plovnog puta može biti dvosmjerna. Dvosmjerna organizacija prometa je najčešće potrebna u slučaju dužeg plovnog puta i u slučajevima kada se zahtijeva veći kapacitet plovnog puta. Postupak određivanja širine dvosmjernog puta opisan je u nastavku teksta.

4.2.1. Širina dvosmjernog plovnog puta prema PIANC-u

Izraz za izračun ukupne širine ravnog dijela dvosmjernog plovnog puta prema PIANC-u glasi:[160]

$$W = 2W_{BM} + \sum W_i + W_{BR} + W_{BG} + \sum W_p \qquad [78]$$

gdje su:

W_{BM} – osnovna širina plovnog puta (m)

W_i – dodatna širina plovnog puta zbog utjecaja vanjskih sila (m)

$W_{BR(BG)}$ – dodatna udaljenost zbog sila međudjelovanja broda i obale (lijevo i desno) (m)

W_p – dodatna širina mimoilaženja brodova (m).

Prilikom određivanja dodatne širine mimoilaženja brodova W_p bitni podatci su širina najšireg broda i brzina broda. Podatci u tablici 37 prikazuju udaljenosti između plovidbenih traka. U slučaju gušćeg prometa (više od 3 broda na dan), vrijednosti u tablici 37 trebaju se uvećati za 0,5.

Tablica 37: Dodatna širina mimoilaženja brodova W_p

Udaljenost između plovidbenih traka W_p	Vanjski (izloženi) plovni put	Unutarnji (zaklonjeni) plovni put
Brzina broda $V_{čv}$		
Velika: $V_{čv} > 12$	2,0 B	1,8 B
Umjerena: $8 \leq V_{čv} < 12$	1,6 B	1,4 B
Mala: $5 \leq V_{čv} < 8$	1,2 B	1,0 B

(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

4.2.2. Širina dvosmjernog plovnog puta prema ROM-u

Izraz za izračun ukupne širina ravnog dijela dvosmjernog plovnog puta prema ROM-u glasi:[161]

$$W = 2\left[B + b_d + 2(b_e + b_r + b_b)\right] + bs + \left(rh_{sm} + rh_{sd}\right)_i + \left(rh_{sm} + rh_{sd}\right)_d , \qquad [79]$$

[160] *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

[161] Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.

gdje su:

B – širina broda (m)

b_d – dodatna širina koju treba uzeti u obzir uslijed djelovanja zanosa uslijed djelovanja vanjskih sila (m)

b_e – dodatna širina uslijed pogreške određivanja pozicije broda (m)

b_r – dodatna širina uslijed vremena reakcije (m)

b_b – dodatna širina uslijed pogreške koju može uzrokovati balisaža plovnog puta (m)

b_s – udaljenost između dvije plovidbene trake (m)

rh_{sm} – dodatna sigurnosna udaljenost kako ne bi došlo do međudjelovanja između broda i obale (m)

rh_{sd} – dodatna sigurnosna margina između broda i obale (m).

Udaljenost između dviju plovidbenih traka b_s određuje se na temelju dvaju faktora: prvi je brzina plovidbe, a drugi gustoća prometa. Podatci o dodatnoj širini između dviju plovidbenih traka prikazani su u tablici 38, te se odnose na dvosmjerne plovne putove u kojima nije dozvoljeno pretjecanje. U slučaju da je pretjecanje dozvoljeno preporučenu udaljenost potrebno je uvećati za 50 %.

Tablica 38: Preporučene minimalne udaljenosti između plovidbenih traka kod dvosmjerne plovidbe

	b_s	
	Plovni put izložen vanjskim silama	**Zaštićeni plovni put**
Prvi faktor: Brzina broda		
Veća od 3 čv	2,0 *B*	-
Između 2 i 3 čv	1,6 *B*	1,4 *B*
Manja od 2 čv	1,2 *B*	1,0 *B*
Drugi faktor. gustoća prometa		
od 0 do 1 brod na sat	0,0 *B*	0,0 *B*
od 1 do 3 broda na sat	0,2 *B*	0,2 *B*
više od 3 broda na sat	0,5 *B*	0,4 *B*

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

U slučaju da se dvosmjerni plovni put dimenzionira za brodove velikog deplasmana, te da je njima dozvoljeno pretjecanje manjih brodova, tada se širina plovnog puta određuje koristeći izraz:[162]

$$W = 2\left[B + b_d + 2(b_e + b_r + b_b)\right]_{brod1} + bs_{brod1} + \left[B + b_d + 2(b_e + b_r + b_b\right]_{brod2} + \left[\left(rh_{sm} + rh_{sd}\right)_i + \left(rh_{sm} + rh_{sd}\right)_d\right]_{brod1\&2} . \quad [80]$$

[162] $Brod_1$ – brod većeg deplasmana, $Brod_2$ – manji brod kojeg je dozvoljeno pretjecati.

4.2.3. Širina dvosmjernog plovnog puta prema MLIT-u

Pri definiranju parametara dvosmjernog plovnog puta, koristeći MLIT metodologiju, širina plovidbene trake, za svaki smjer plovidbe, određuje se koristeći izraz [62]. Međutim, udaljenosti između plovidbenih traka se definira na temelju vrste i dimenzije brodova koji će taj plovni put koristiti. Podatci o preporučenim udaljenostima između plovidbenih traka za dvosmjerni plovni put prikazani su u tablici 39.

Tablica 39: Udaljenost mimoilaženja između brodova W_c

Tip broda	*Lpp* (m)	*B* (m)	*Wc* (m)	W_c/B
Brod za prijevoz generalnog tereta	103	20	32,6	1,63
Manji teretni brod	60,4	11,2	17,6	1,57
Brod za prijevoz kontejnera (Postpanamax)	283,8	40	105,0	2,63
Brod za prijevoz kontejnera (Panamax)	273	32,2	103,6	3,22
Brod za prijevoz rasutog tereta (Postpanamax)	279	45	98,8	2,20
Brod za prijevoz rasutog tereta (Panamax)	216	32,2	79,0	2,45
Brod za prijevoz rasutog tereta (Handysize)	119	21,5	38,2	1,77
Tanker (VLCC)	316	60	91,0	1,52
Tanker (za razvoz)	92	20	25,2	1,26
Brod za prijevoz automobila	190	32,2	64,6	2,01
Brod za prijevoz automobila	180	32,2	58,4	1,81
Brod za prijevoz ukapljenih plinova (LNG)	270	44,8	90,7	2,03
Brod za prijevoz hlađenog tereta	144	23,5	50,5	2,15
Putnički brod	160	24,7	47,7	1,93
Trajekt	181	29,4	57,1	1,94

(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

4.3. Dodatna širina zavojitih dijelova plovnog puta

Pri određivanju dodatne širina kod zavojitih dijelova plovnog puta potrebno je uzeti u obzir dodatnu širinu zbog zanošenja broda pri okretu, koje se javlja zbog plovidbe broda pod određenim kutom zanosa te dodatnu širinu zbog vremena reakcije.

Prema PIANC-u dodatna širina zavojitog dijela plovnog puta uslijed zanosa može se odrediti koristeći izraz:[163]

$$\Delta W_{DA} = \frac{L_{OA}{}^2}{a \cdot R_c}, \qquad [81]$$

gdje su:

ΔW_{DA} – dodatna širina u zavojitom dijelu plovnog puta uslijed zanosa (m)

[163] *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

R_c – radijus zavojitog dijela plovnog puta (m)

Loa – duljina broda preko svega (m)

a – faktor koji ovisi o tipu broda (*a* = 8 za teretne brodove, *a* = 4,5 za velike brodove s $C_B \geq 0{,}8$).

Osim zanosa, potrebno je uzeti u obzir i dodatnu širinu plovnog puta zbog vremena reakcije i stabiliziranja broda u traženom kursu koja iznosi 0,4 *B*.

Prema ROM-u dodatna širina zavojitog dijela puta sastoji se od zanošenja broda koje nastaje uslijed promjene kursa b_{dc}, a može se procijeniti koristeći izraz:[164]

$$b_{dc} = \sqrt{\left(R + \frac{B}{2}\right)^2 + (K \cdot Loa)^2} - \left(R + \frac{B}{2}\right), \qquad [82]$$

ili koristeći pojednostavljeni izraz:

$$b_{dc} = \frac{K^2 \cdot loa}{2R_c}, \qquad [83]$$

gdje su:

R_c – radijus zavojitog dijela plovnog puta (m)

K – udaljenost točke okreta od krme broda (izraženo u postotcima kroz omjer *Loa* i položaja točke okreta od krmene okomice).

Za brodove kojima je točka okreta na pola dužine broda (*K* = 0,5), dodatno zanošenje broda koje nastaje pri promjeni kursa b_{dc} može se procijeniti koristeći izraz:

$$b_{dc} = \frac{Loa^2}{8R}. \qquad [84]$$

Za brodove većeg deplasmana i paralelnim srednjakom, *K* iznosi 0,5 ako je odnos dubine vode i gaza broda *h/T* manji ili jednak 1,2. Međutim, ako je odnos dubine vode i gaza broda *h/T* veći ili jednak 1,5 tada je *K* = 2/3, a izraz se mijenja:

$$b_{dc} = \frac{2Loa^2}{9R}. \qquad [85]$$

Za brze brodice je *K* = 1 te se koristi sljedeći izraz:

$$b_{dc} = \frac{Loa^2}{2R}. \qquad [86]$$

Dodatna širina plovnog puta zbog vremena reakcije broda (b_{rc}) se za ravne plovne putove određuje na temelju vremena potrebnog da brod reagira na promjenu kursa i/ili brzine. To dodatno zakašnjenje iskusni pomorci mogu predvidjeti i često znaju koliko iznosi.

U slučaju izostanka takvog podatka, dodatna širina se može odrediti na temelju širine broda i najvećeg prihvatljivog rizika tijekom vremena korištenja plovnog puta (E_{max}), te

[164]Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.

manevarskih karakteristika broda (Tablica 40). Manevrabilnost broda se aproksimira na isti način kao i u tablici 32.

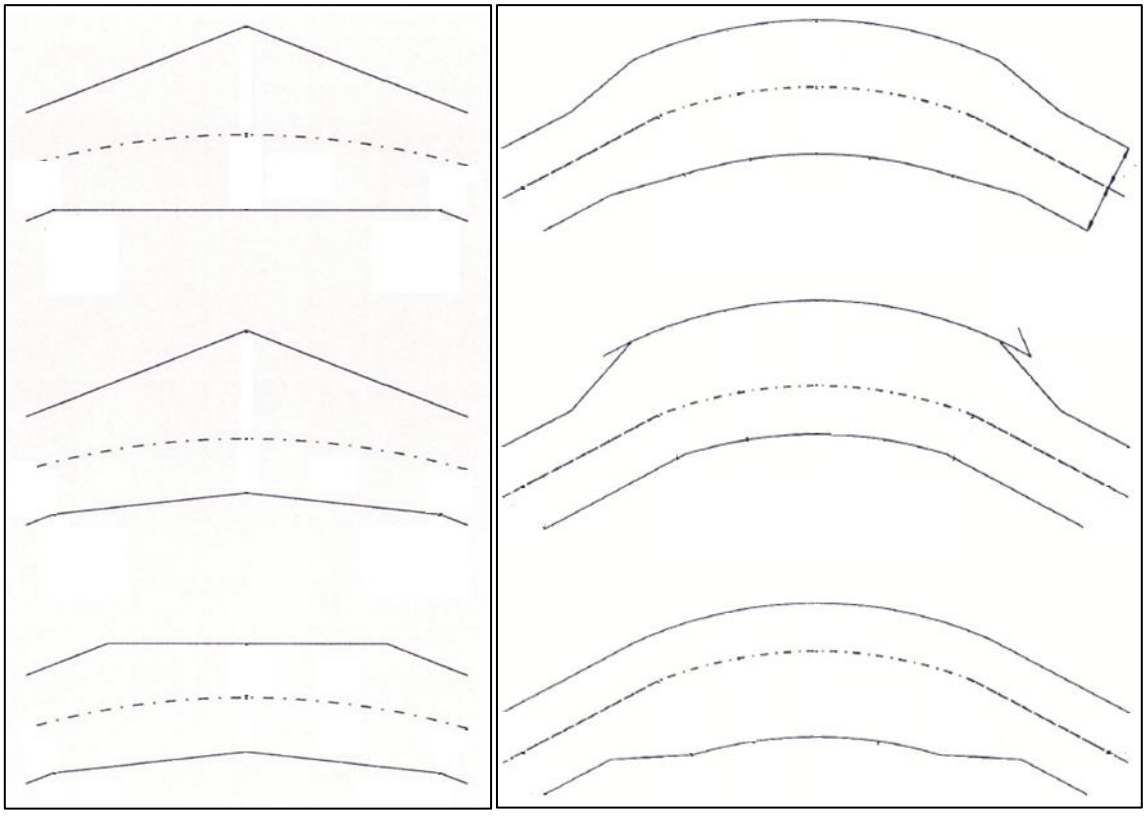
Tablica 40: Dodatna širina plovnog puta zbog vremena reakcije na temelju manevarskih karakteristika broda

Manevarske karakteristike broda	b_{rc}
Dobre	0,20 (1,50 - E_{max}) B
Umjerene	0,40 (1,50 - E_{max}) B
Slabe	0,80 (1,50 - E_{max}) B

(Izvor: Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX)

Nakon što se odredi konačna širina ravnog i zavojitog dijela plovnog puta, potrebno je definirati opći izgled zavojitog dijela plovnog puta. Zavojiti dio plovnog puta može pravilno spajati dva ravna dijela plovnog puta ili se sastojati od više manjih ravnih dijelova koji prate oblik zavojitog dijela plovnog puta.

U slučaju da se zavojiti dio plovnog puta sastoji od više manjih ravnih dijelova koji prate oblik zavojitog dijela plovnog puta (Slika 27) tada se u tom dijelu mogu javiti dodatne struje. Međutim, omogućavaju lakše označavanje i jaružanje. U slučaju da je plovni put pravilno zakrivljen (Slika 27), tada se dodatna širina može nalaziti u unutarnjem dijelu ili vanjskom dijelu radijusa zakrivljenog plovnog puta. Preporuka je da se ta dodatna širina nalazi unutar radijusa zakrivljeno plovnog puta, jer obično se taj dio koristi kao referenca pri okretu.



Slika 27: Dva tipa geometrije zavojitog dijela plovnog puta
(Izvor: *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.)

4.4. Analiza preporuka za određivanje potrebne širine plovnog puta

Iz predloženih preporuka vidljivo je da se analizirane metode određivanja širine plovnog puta uvelike razlikuju po metodologiji određivanja potrebne širine.

Od svih analiziranih metoda, PIANC-ova metoda je najjednostavnija za korištenje, jer je velika većina vrijednosti unaprijed određena, ali se stoga u najmanjoj mjeri može prilagođavati specifičnim potrebama korisnika. Jednostavnost korištenja može dovesti do predimenzioniranih veličina, te je u potpunosti prilagođena konceptualnoj fazi određivanja dimenzija plovnog puta.

ROM 3.1 metodologija, predstavlja kompromis između metoda konceptualne i detaljne faze određivanja dimenzija plovnih putova. Za razliku od ranije opisane metode PIANC-a, većina podataka ove metode može se proračunati, tj. u većoj mjeri prilagoditi potrebnoj situaciji korisnika. Predloženi deterministički izrazi predstavljaju jednostavne metode izračuna potrebne širine plovnog puta, koji u konačnici daju konačnu širinu plovnog puta. Međutim, pojedini dijelovi analizirane metodologije su unaprijed određeni i ne mogu se modificirati, a rezultati dobiveni predloženim izrazima su također generalizirani i ne odražavaju u svim situacijama realno stanje. Ova metoda, je konkretnija i detaljnija, te se može koristiti i u konceptualnoj i detaljnoj fazi određivanja dimenzija plovnih putova.

Metodologija određivanja dimenzija plovnog puta, MLIT, je od svih analiziranih metoda najdetaljnija, stoga se u najvećoj mjerni može prilagođavati potrebama korisnika. Međutim, pojedini dijelovi su također unaprijed određeni te generalizirani. Ova se metoda također može koristiti u konceptualnoj i detaljnoj fazi određivanja dimenzija plovnih putova.

Kombinirajući sve tri analizirane metode, koristeći dijelove koji se dobivaju računski, može se doći do konačne metodologije koja bi se u svim dijelovima mogla prilagođavati korisniku. Analizirajući sve tri metode, dodatna širina zbog sile međudjelovanja broda i obale je unaprijed određena, te se ne može prilagoditi korisniku. U konačnici, kad bi kombinacijom triju metoda došli do najtočnije determinističke metode određivanja širine plovnog puta, vrijednost dodatne širine zbog sile međudjelovanja ne bi predstavljala analiziranu situaciju i mogla bi dovesti do predimenzioniranja širine plovnog puta ili do ugrožavanja sigurnosti plovidbe. Radi poboljšanja determinističkih metoda određivanja širine plovnog puta, bilo u konceptualnog ili detaljnoj fazi projektiranja, pristupilo se izradi modela dodatne širine ograničenog plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog utjecaja sila međudjelovanja broda i ruba plovnog puta.

5. MODEL ODREĐIVANJA POTREBNE ŠIRINE PLOVNOG PUTA

U ovome poglavlju, korištenjem specifičnog modela, utvrdit će se dodatna širina ograničenog plovnog puta koju je pri definiranju širine plovnog puta potrebno uzeti u obzir zbog utjecaja sila međudjelovanja koje se javljaju između broda i ruba plovnog puta. Pod sigurnom širinom ograničenog plovnog puta podrazumijeva se plovni put dovoljne širine i dubine, kako ni u kojem slučaju, ne bi došlo do kontakta između broda i ruba plovnog puta. Dodatna širina plovnog puta, u ovom konkretnom slučaju, definira se koristeći model kojim se određuje najveće zaošijanje i zanos broda koji uzrokuje sila međudjelovanja broda i obale, tj. najveći pomak broda od prvotne trajektorije.

U konkretnom modelu određivanja potrebne dodatne širine plovnog puta zbog utjecaja sila međudjelovanja broda i ruba plovnog puta ne uzimaju se u obzir vanjski utjecaji, a jedina sila koja se javlja, uz silu međudjelovanja broda i ruba plovnog puta je sila međudjelovanja broda i dna. U modelu se ne uzimaju u obzir vanjski utjecaji (vjetra, valova i struja) kako bi se izolirao samo utjecaj međudjelovanja trupa broda i ruba plovnog puta što je osnovni cilj ovog istraživanja. Kako bi ostvarili zacrtane ciljeve, za istraživanje je korišten navigacijski simulator „Transas NaviSailor NTPro 5000“ na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Navigacijski simulator i odgovarajući programski paketi omogućavaju kreiranje testnog područja i scenarija bez djelovanja vanjskih sila te kreiranje konfiguracije plovnog puta prema potrebi. Na taj način se mogu istražiti utjecaji različitih konfiguracija ruba plovnog puta na gibanje broda te same manevarske karakteristike broda. Uzimajući u obzir navedene faktore, može se definirati model kojim se određuje dodatna širina plovnog puta, na koju utječu sama konfiguracija plovnog puta i manevarske karakteristike broda.

Valja naglasiti da navigacijski simulator koristi vjerodostojne i provjerene matematičke i hidrodinamičke modele,[165] koji izračunavaju vrijednosti sila i momenata koje djeluju na brod.

5.1. Priprema modela za izračun potrebne širine plovnog puta

Prilikom istraživanja sila međudjelovanja broda i obale mogu se koristiti tri metode:

1. „in situ“ istraživanja
2. testiranja modela brodova u bazenima
3. istraživanja koristeći navigacijske simulatore.

„In situ“ istraživanja i istraživanja modela brodova u bazenima zahtijevaju znatna materijalna sredstva i popratnu infrastrukturu. Također, od same pripreme do provođenja istraživanja su vremenski dugotrajnija. U navedenom slučaju to konkretno znači da je potrebno izraditi plovni put s različitim pokosima u stvarnosti ili u bazenu, što iziskuje velika ulaganja (izrada stvarnog plovnog puta ili prilagođavanje bazena pravilnog oblika) i mnogo vremena. Iz navedenih razloga, istraživanje koristeći navigacijske simulatore predstavlja najpovoljniju opciju reprodukcije uvjeta i dobivanja vjerodostojnih podataka pri plovidbi broda ograničenim plovnim putom.

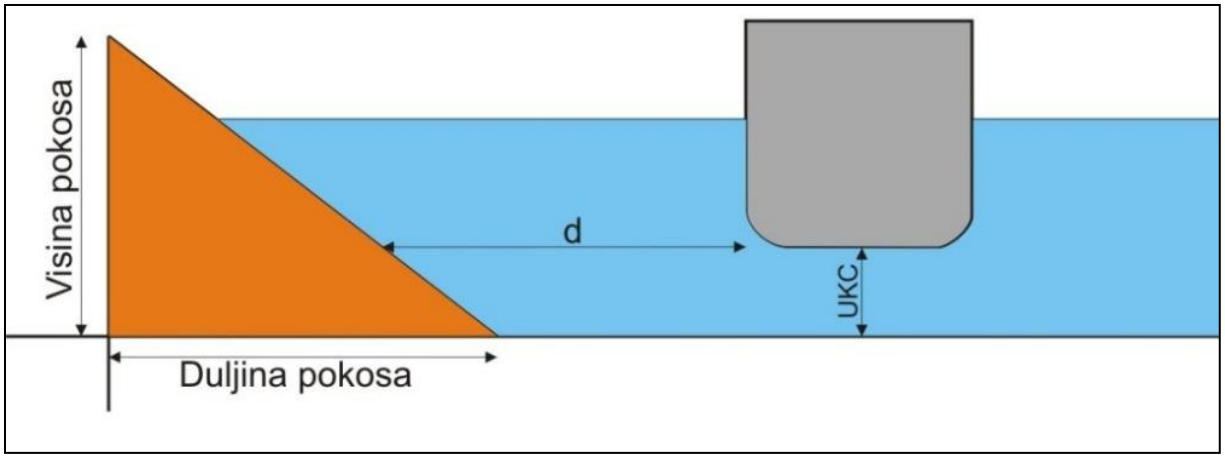
[165] *DNV Statement of Compliance*. Statement number: 002/121218, Bridge Operation Simulator, Navi-Trainer NTPro 5000, Class A Standard for Certification of Maritime Simulators No. 2. Sandefjord, 2012.

Svi modeli brodova su testirani i provjereni od strane proizvođača i nadležne ustanove, a za potrebe ovog istraživanja, uzimajući u obzir broj raspoloživih modela, odabrano je šest modela brodova (brodovi su na ravnoj kobilici) čiji u podatci prikazani u tablici 41.

Tablica 41: Referentni modeli brodova korištenih u simulacijama

Ime modela broda	Deplasman (t)	Ukupna nosivost (t)	Duljina preko svega (m)	Širina (m)	Gaz broda (m)	Koeficijent punoće deplasmana	Forma broda
Oil tanker	77100	67980	242,8	32,2	12,5	0,82	Brod punije forme
VLCC 2	321260	279400	332	58	20,82	0,81	
VLCC 4	137092	116000	249,9	44	15,4	0,83	
Container 4	132540	104696	346,98	42,8	14	0,65	Brod finije forme
Container 5	86900	63440	299	37,1	13	0,62	
PCC 4	24186	-	196,4	31,1	7,4	0,55	

Plovni put je kreiran koristeći programski paket „Transas Model Wizard“, koji je kompatibilan s navigacijskim simulatorom te daje mogućnost kreiranja različitih konfiguracija plovnih putova. Konkretno, kreirana su tri plovna puta, duljine 2 nautičke milje i pokosima: plovni put s okomitim rubom plovnog puta, plovni put s pokosom u omjeru visine i duljine pokosa 1:2 i plovni put s pokosom u omjeru visine i duljine pokosa 1:4 (Slika 28). Dubina plovnog puta je prilagođena svakom modelu broda, a za svaki model broda kreirana su dva plovna puta ograničene dubine, za odnos dubine i gaza broda h/T = 1,2 i za odnos dubine i gaza broda h/T = 1,5. Tako modelirani plovni put pruža mogućnost istraživanja ponašanja broda u različitim konfiguracijama plovnog puta, te određivanja putanje broda u zadanim kontroliranim uvjetima.



Slika 28: Poprečni presjek pokosa plovnog puta

Simulacije su se provodile za tri različita pokosa plovnog puta (okomiti, 1:2 i 1:4), za različite udaljenosti od pokosa *d* (10, 20, 30, 40 i 50 metara) i za tri različite brzine (5, 7,5 i 10 čvorova). Udaljenost broda od ruba plovnog puta je mjerena od boka broda do točke nasukanja, tj. gdje je dubina plovnog puta jednaka najvećem gazu broda u plovidbi (Slika 28). Najveća udaljenost od 50 metara odabrana je iz razloga što su ranija istraživanja pokazala da na većim

udaljenostima utjecaja ruba plovnog puta nema ili ne djeluje značajnije. U tablici 42 prikazane su japanske preporuke za određivanje najmanje udaljenosti od ruba plovnog puta, za različite vrste brodova, na kojima sile međudjelovanja broda i obale ne utječu na plovidbu broda.

Tablica 42: Preporuke prema MLIT-u za projektiranje luka i plovnih putova, određivanje najmanje udaljenosti plovidbe broda od ruba plovnog puta

Brod	Udaljenost broda od ruba plovnog puta (m)
Brod za prijevoz kontejnera („*Suezmax*“ i veći)	55,5
Brod za prijevoz kontejnera („*Panamax*“)	55,2
VLCC	49,7
Brod za prijevoz automobila	31,2
Putnički brodovi	25,9

(Izvor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*)

Kako bi u svim simulacijama uvjeti upravljanja brodom bili istovjetni, za kormilarenje brodom korišten je sustav automatskog kormilarenja (autopilot). Sustav autopilota na odabranim modelima brodova koristi kompenzaciju vanjskih sila po principu pravila PID (Proporcionalni – Integracijski – Derivacijski).

Proporcionalni regulator je jednostavan i stabilan, a odstupanja stvarne veličine od željene iskazuje kao preostalu stacionarnu pogrešku pri odzivu sustava. Integracijski regulator ne uzrokuje odstupanje u sustavu, ali prijelazna karakteristika integracijskog sustava se ne smiruje, tj. oscilira oko željene vrijednosti. Derivacijski regulator se suprotstavlja djelovanju poremećaja brzim odzivom u obliku valovitog skoka koji prelazi u uzlazno klizanje vođene veličine. Na taj način sustav postaje nestabilan. Proporcionalni sklop mu omogućava stabilnost, integracijski sklop otklanja odstupanje, a derivacijski sklop poboljšava brzinu odziva i prigušuje sklonost sustava k osciliranju.

Rad autopilota može biti podešen na dva načina: praćenje zadanog kursa (*engl. head control*) ili praćenje zadane trajektorije (*engl. track control*). Kod postavke autopilota na praćenje zadanog kursa autopilot kao referencu uzima podatak o kursu sa žiro kompasa (u stupnjevima na jednu decimalu) i podatak o zadanom kursu. Kod postavke autopilota na praćenje zadane rute autopilot prima podatke od elektroničkih uređaja za određivanje pozicije broda ili od prikazivača pomorskih karata s informacijskim sustavom. Za potrebe istraživanja autopilot je kod simuliranja podešen na način da reagira trenutno, bez ograničenja otklona kuta kormila, a kormilarski uređaj je bio postavljen na manevarskom načinu rada.

Kako je cilj ovoga rada istraživanje međudjelovanja broda i obale, radi eliminacije ostalih vanjskih sila koji su već na ranije opisani način uključene u dodatnu širinu plovnog puta, te mogu negativno djelovati na rezultat simulacija, simulacija vremenskih uvjeta je podešena na stanje bez vjetra, struja i valova.

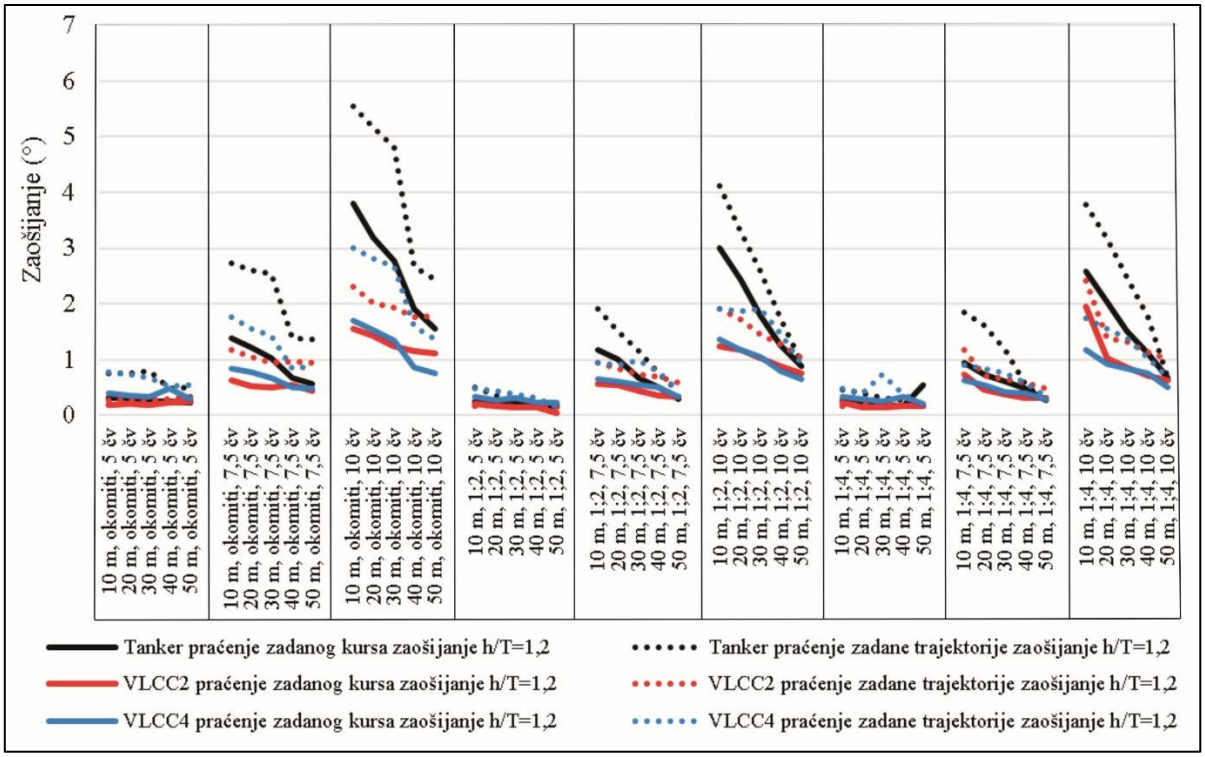
Prilikom izvođenja simulacija mjerene su sljedeće vrijednosti:

- poprečna sila (kN)
- preostala dubina ispod kobilice na pramcu i krmi (m)
- horizontalni pomak broda od zadanog kursa (m)
- zaošijavanje (°)
- brzina broda (čv).

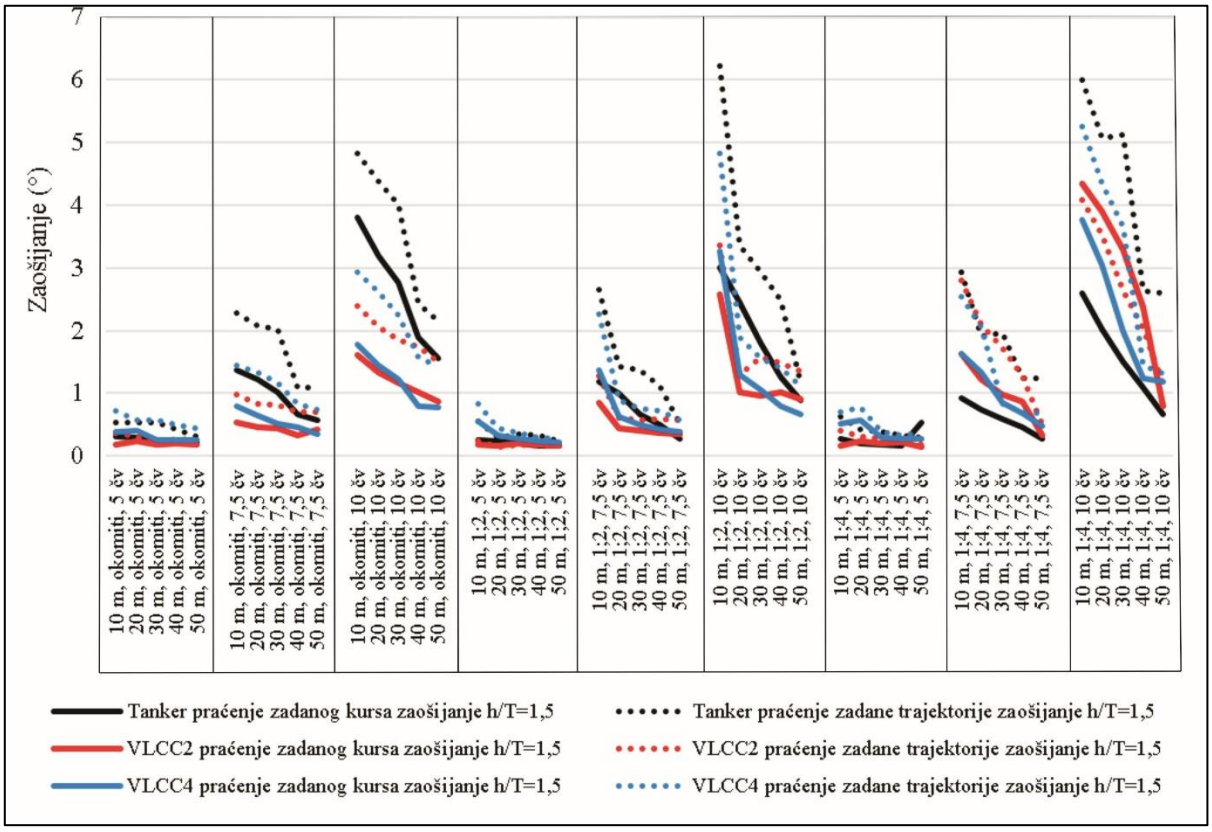
Tijekom istraživanja je provedeno 1080 simulacija, odnosno 180 simulacija po odabranom modelu broda. Svaki scenarij se izvodio u stvarnom vremenu, s opisanim postavkama. Istraživanje, za sve navedene scenarije, ukupno je trajalo 540 sati.

5.2. Analiza kormilarenja broda

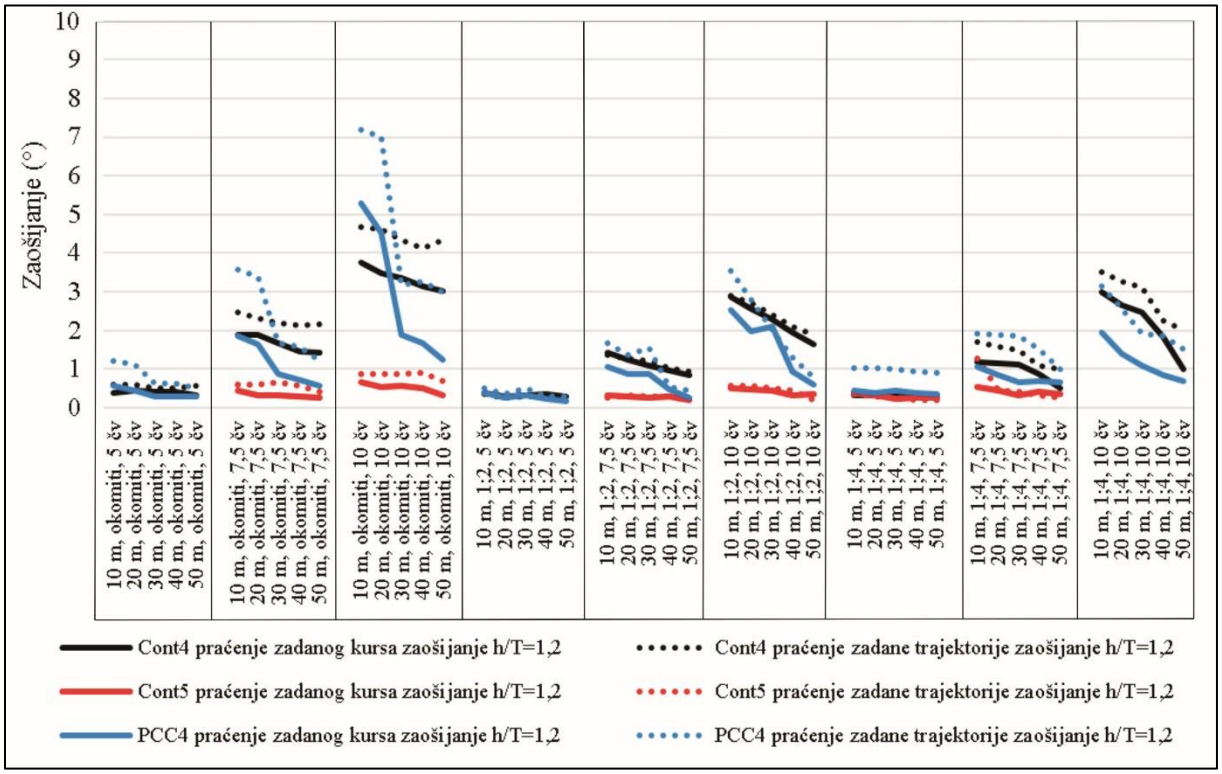
Analizom podataka utvrđeno je različito kretanje broda kod plovidbe s autopilotom podešenim na praćenje kursa (*head control*) od plovidbe kod praćenja zadane trajektorije (*track control*). Kod postavke autopilota u kojem brod prati zadani kurs došlo je do paralelnog pomaka broda od početne trajektorije kretanja, što predstavlja samo zanos broda. Kod postavke autopilota u kojem brod prati zadanu trajektoriju došlo je do većih oscilacija kretanja broda, što u ovom slučaju uključuje zanos i zaošijanje broda.



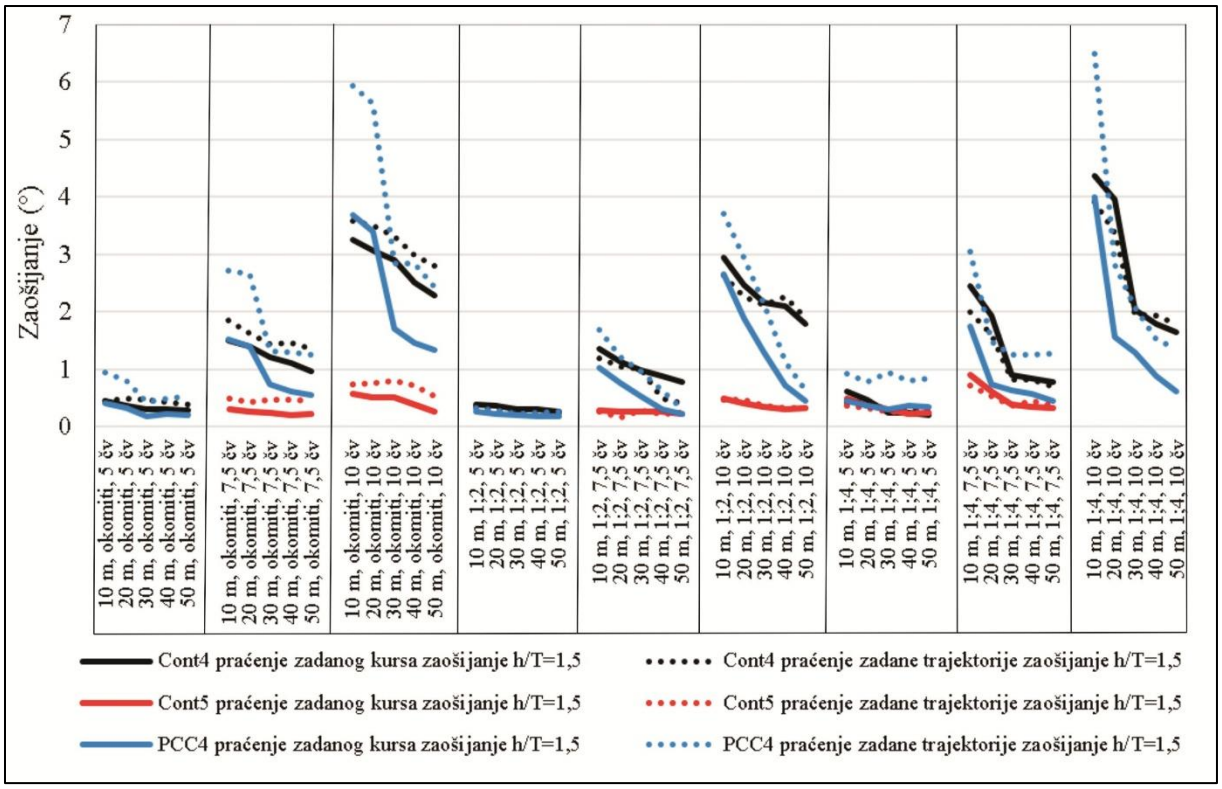
Grafikon 4: Odnos zaošijanja brodova punije forme kod postavke autopilota na praćenje zadanog kursa (*head*) i praćenja zadane trajektorije (*track*) za odnos *h/T* = 1,2



Grafikon 5: Odnos zaošijanja brodova punije forme kod postavke autopilota na praćenje zadanog kursa (*head*) i praćenja zadane trajektorije (*track*) za odnos *h/T* = 1,5



Grafikon 6: Odnos zaošijanja brodova finije forme kod postavke autopilota na praćenje zadanog kursa (*head*) i praćenja zadane trajektorije (*track*) za odnos *h/T* = 1,2



Grafikon 7: Odnos zaošijanja brodova finije forme kod postavke autopilota na praćenje zadanog kursa (*head*) i praćenja zadane trajektorije (*track*) za odnos *h/T* = 1,5

Analizirajući dobivene podatke, došlo se do zaključka da je upravljanje brodom s postavkom autopilota na praćenje zadane rute najsličnije ručnom kormilarenju. Također, analiza je pokazala da do najvećeg pomaka broda dolazi u početnoj fazi utjecaja sile međudjelovanja, a da su kasniji pomaci broda manji. Kako se u praksi kormilarenje u ograničenim plovnim putovima vrši ručno, a u simulacijama je korišten autopilot bez ograničenja u kutu otklona kormila, može se zaključiti da su reakcije na početni utjecaj sile vrlo slične, tj. došlo bi do istog pomaka broda od prvotne rute u početnoj fazi. Razlika je uočljivija u kasnijoj fazi kormilarenja, tj. stabiliziranja broda u željenom kursu, što nije predmet ovog rada, te nije dalje analizirano.

Na temelju dobivenih podataka moguće je analizirati utjecaj zanosa i zaošijanja broda, što u konačnici daje potpunu sliku kretanja broda, tj. pomaka broda zbog poprečne sile i momenta koji djeluje na broda prilikom plovidbe u blizini ruba plovnog puta. Na grafikonu 4 i 5 je prikazana usporedba zaošijavanja za brodove punije forme, a na grafikonu 6 i 7 za brodove finije forme, gdje pune linije predstavljaju najveće zaošijanje za postavku autopilota na praćenje kursa, a iscrtane linije najveće zaošijanje za postavku autopilota na praćenje zadane trajektorije.

Promatrajući grafikone može se uvidjeti da je u svim pokosima, brzinama i udaljenostima od obale zaošijanje kod postavke autopilota na praćenje zadane trajektorije veće od zaošijanja kod postavke autopilota na praćenje zadanog kursa. Za oba tipa broda veće zaošijanje se javilo kod odnosa dubine i gaza broda *h/T* = 1,5. Kad je odnos dubine vode i gaza broda manji, brod bolje drži zadani kurs, a slabije mijenja smjer, dok kod većeg odnosa dubine vode i gaza broda, brod slabije održava zadani kurs, a bolje mijenja smjer. Ta se tvrdnja može potkrijepiti podatcima iz tablice 43 u kojoj je vidljivo da je radijus kruga okreta broda veći kod manjeg odnosa dubine vode i gaza.

Tablica 43: Povećanje radijusa kruga okreta broda prema veličini odnosa dubine vode i gaza broda

Odnos dubine vode i gaza broda (*h/T*)	Radijus kruga okreta
2,50	1,05 do 1,10 radijusa kruga okreta u dubokoj vodi
1,25	1,60 do 2,00 radijusa kruga okreta u dubokoj vodi

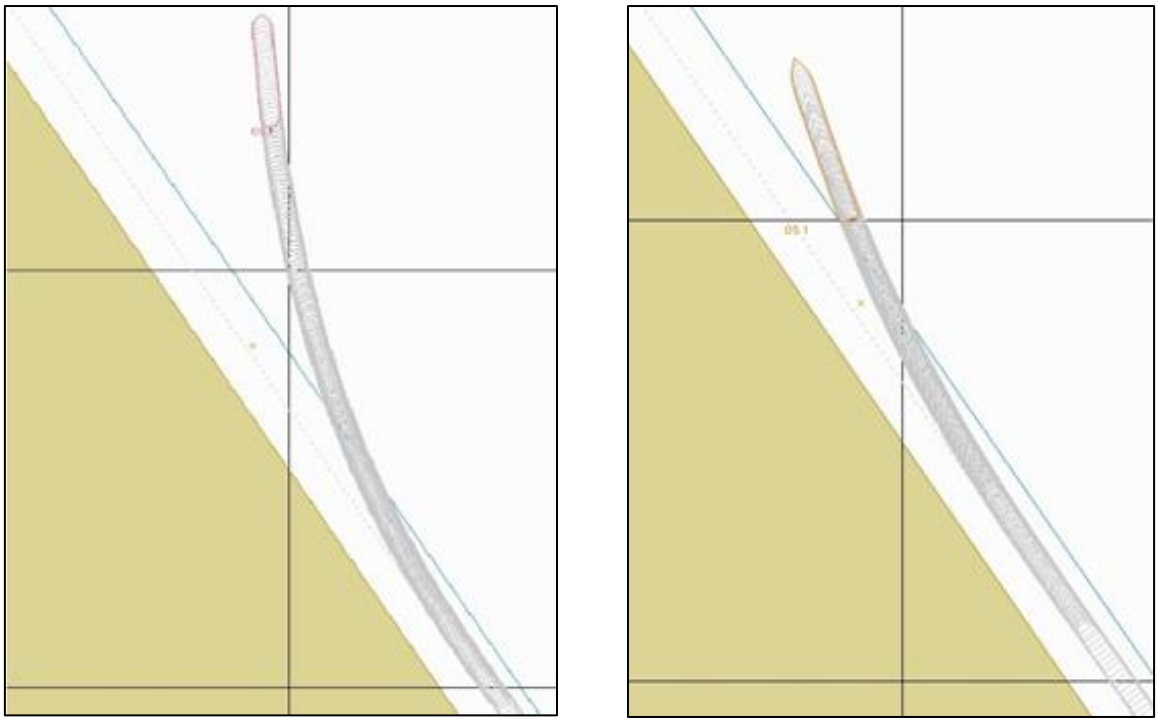
(Izvor: Crane, C. L. (1979). *Maneuvering Trials of 278 000 DWT Tanker in Shallow and Deep Waters*. SNAME Transactions, 87, str. 251-283.)

Na veličinu zaošijanja djeluju brzina i pokos. Najveće zaošijanje se javlja kod okomitog pokosa, međutim i kod ostalih dvaju analiziranih pokosa ne dolazi do značajnije razlike. To se može pripisati presjeku plovnog puta, jer kad brod plovi u blizinu ruba plovnog puta s pokosom dolazi do smanjenja površine presjeka plovnog puta kao što je prikazano na slici 32.

Kako bi se dobila potpuna slika o utjecaju sila međudjelovanja broda i ruba plovnog puta na kretanje broda, provedena su dva dodatna testa. Dodatni testovi su provedeni na odabranom broju relevantnih scenarija, od kojih je prvi scenarij obuhvatio slučaj kada se kormilo maksimalno zakrene u stranu suprotno od ruba plovnog puta, a drugi scenarij slučaj kada se kormilo zadrži u sredini.

U prvom slučaju dodatnih testiranja istraživala se reakcija suprotna ustaljenoj praksi i preporukama koja predstavlja najgori slučaj reagiranja. Do takve reakcije može doći u situaciji da se brod pokuša što prije odmaknuti od ruba plovnog puta prema sredini plovnog puta, te se nesvjesno povećava učinak međudjelovanja broda i ruba plovnog puta. U analiziranim situacijama, došlo je do najvećeg pomaka broda od prvotne trajektorije, iz razloga što utjecaj kormila na zakretanje broda dodatno povećava pomak krme prema obali. Analizom dobivenih podataka, u slučaju kada se kormilo maksimalno zakrene u stranu suprotnu od ruba plovnog puta, došlo se do zaključka da je za brodove finije forme najveći pomak iz prvotne trajektorije prosječno veći za 16 % nego u slučaju kad se kormilo zakrene prema rubu plovnog puta kako je to simulirano u istraživanjima. Za brodove punije forme taj pomak je prosječno 30 % veći nego u slučaju kad se kormilo zakrene prema rubu plovnog puta. Kako je već ranije naglašeno, brodovi finije forme puno bolje zadržavaju smjer od brodova punije forme, što dokazuje i dobiveni rezultat. S ciljem povećanja sigurnosti plovidbe i nemogućnosti predviđanja ljudske reakcije, te uzimajući u obzir dobivene podatke, preporuča se da se podatci dobiveni predloženim modelom, koji predstavlja preporučenu reakciju, u konačnici uvećaju 16 % za brodove finije forme i 30 % za brodove punije forme.

Testiranja u drugom slučaju, kada je kormilo zadržano u sredini, provedena su s ciljem da se dobije potpuna slika kretanja broda u blizini ruba plovnog puta, kao i radi potvrđivanja rezultata prethodnih istraživanja. Kako je prikazano na slici 29, za brodove finije i punije forme, dolazi do odmicanja pramca broda od ruba plovnog puta.



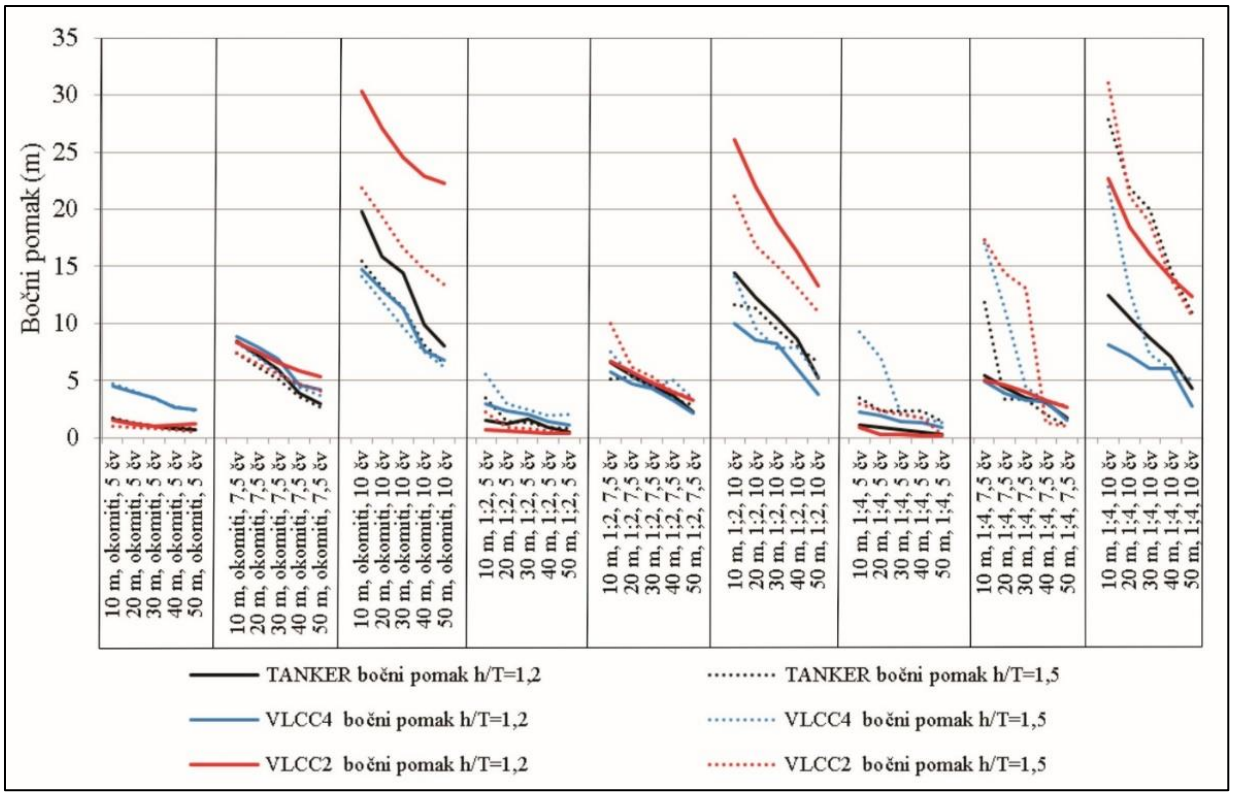
(a) (b)

Slika 29: Primjer trajektorije broda u slučaju kad je pokos ruba plovnog puta 1:4, udaljenost od izobate nasukanja 10 metara te kormilo u sredini, (a) brod punije forme, (b) brod finije forme

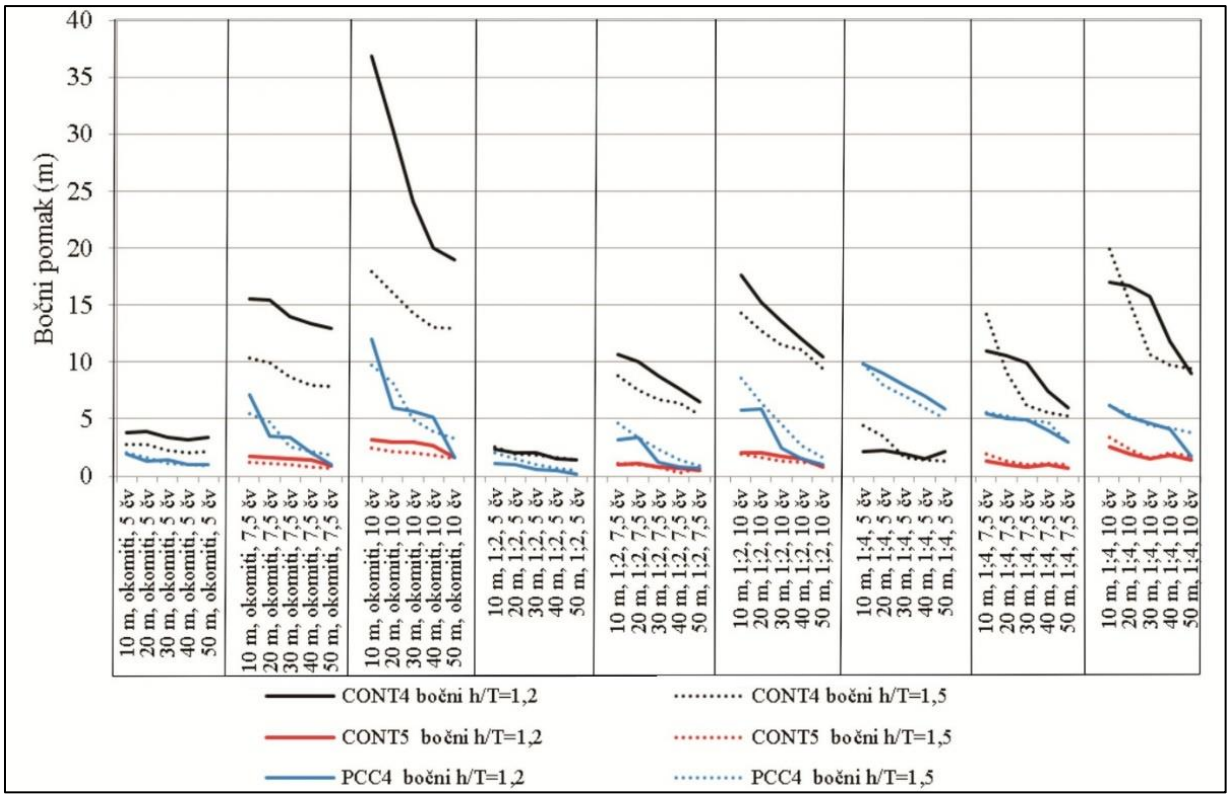
U ovom testiranju, došlo je do većeg pomaka broda nego u slučaju kad se kormilo zakrene prema rubu plovnog puta kako bi se smanjilo odmicanje pramca od obale i privlačenje krme prema obali, odnosno manjeg nego u slučaju da se kormilo zakrene suprotno od ruba plovnog puta. Kad nema reakcije s kormilom, krma broda se počinje približavati prema obali do trenutka, kada se brod zbog kuta zaošijanja, počne udaljavati od ruba plovnog puta. Taj pomak, zato što izostaje reakcija kormilom, prikazuje djelovanje sila na kretanje broda te pokazuje da je pomak krme broda prema obali najznačajniji za određivanje dodatne širine plovnog puta zbog utjecaja sila međudjelovanja broda i ruba plovnog puta.

5.3. Analiza trajektorije broda uslijed utjecaja sile međudjelovanja

Važan faktor sigurnosti plovidbe na ograničenom plovnom putu te prilikom definiranja modela, je pomak broda uzrokovan silom međudjelovanja. Prilikom plovidbe broda u blizini ruba plovnog puta dolazi do pojave sile međudjelovanja. Sila međudjelovanja djeluje na brod na način da zakreće pramac od obale, te istovremeno dolazi do zanošenja broda. Najveći pomak je zabilježen u trenutku kada sila međudjelovanja počne djelovati na brod, a nakon toga kormilar zakretanjem kormila anulira djelovanje te sile, te brod stabilizira svoju putanju kretanja. Zakretanje broda, nastalo utjecajem sila međudjelovanja, rezultira pomakom krme prema obali i predstavlja najveći pomak broda zbog utjecaja sile međudjelovanja. Pomak broda, zbog utjecaja sile međudjelovanja, prikazano je u grafikonu 8 za brodove punije forme i grafikonu 9 za brodove finije forme.



Grafikon 8: Bočni pomak brodova za brodove punije forme

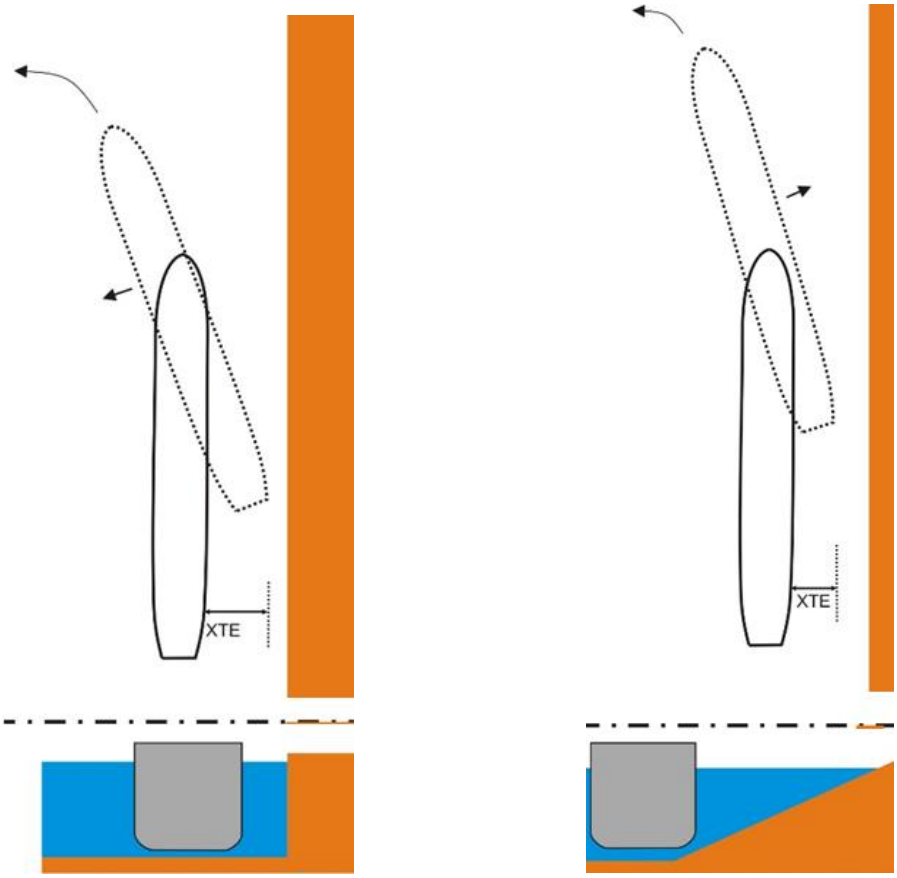


Grafikon 9: Bočni pomak brodova za brodove finije forme

Najveći pomak, kod brodova punije forme zabilježen je pri brzini od 10 čvorova, za sve tipove pokosa. Međutim, za pokos 1:4, za sve tipove brodova, i za sve brzine plovidbe, pomak

je izraženiji kod omjera dubine i gaza broda h/T = 1,5. Prilikom plovidbe plovnim putom manjeg pokosa, brod može doći iznad pokosa plovnog puta, prikazano na slici 32, što uzrokuje smanjenje poprečnog presjeka S, te posljedično većih sila međudjelovanja broda i obale. Primjećuje se također, da su ti pomaci izraženiji u odnosu na okomiti plovni put, jer je kod manjeg pokosa zabilježen zanos prema obali, dok je kod okomitijeg ruba plovnog puta zabilježen zanos od obale (Slika 30).

Ako se usporede pomaci brodova finije forme u odnosu na brodove punije forme, oni su nešto manji. Brodovi finije forme, zbog svojeg odnosa dulji i širine, imaju tendenciju zadržavanja kursa. Međutim, kod većih brzina dolazi i do pojave većih sila, te je za najveći model broda „Container 4“ kod okomitog plovnog puta zabilježen i najveći pomak. Kod brodova finije forme je zabilježen nešto izraženiji pomak kod manjeg pokosa plovnog puta, međutim za razliku od brodova punije forme, nije toliko izražen. To se također može pripisati formi broda. Naime, ukoliko se usporede koeficijenti punoće deplasmana može se zaključiti da će ovaj tip broda i kada plovi iznad pokosa uzrokovati puno manje smanjenje poprečnog presjeka S u odnosu na brodove punije forme.



Slika 30: Pomak broda uslijed sile međudjelovanja broda i ruba plovnog puta kod različitog pokosa

Prema dobivenim rezultatima, prilikom plovidbe uz okomiti rub plovnog puta, doći će do većeg zaošijanja broda, međutim raspored sila oko trupa broda dovodi do bočnog zanosa i pomicanja broda od obale. Ujedno, prilikom plovidbe uz rub plovnog puta s pokosom dolazi do manjeg zaošijanja, ali i do zanosa broda prema obali. Prema svemu navedenom, uviđa se da prilikom plovidbe broda u blizini pokosa ruba plovnog puta dolazi do značajnijeg pomaka broda

prema obali, što zahtijeva dodatan oprez i dodatnu širinu plovnog puta zbog utjecaja međudjelovanja trupa broda i ruba plovnog puta.

5.4. Analiza preostale dubine ispod kobilice

Prilikom definiranja potrebne širine plovnog puta neophodno je uzeti u obzir i sigurnu dubinu koja utječe na potrebnu širinu plovnog puta. Sigurna dubina pri projektiranju novog plovnog puta definira se kao vertikalna udaljenost od referentne razine vode do dna, uzimajući u obzir statički gaz broda, dinamičku promjenu gaza broda i moguće promjene u razini dna. Statički gaz broda predstavlja najuronjeniju točku broda, koja se određuje na temelju stanja nakrcanosti broda, gustoće vode te bočnog i uzdužnog nagiba. Dinamička promjena gaza broda može se promatrati kroz dva rotacijska gibanja broda (ljuljanje i posrtanje) te jedno translacijsko gibanje broda (poniranje). Opisana gibanja mogu uzrokovati valovi, međudjelovanje s dnom (dodatan zagažaj i promjena trima broda), sila vjetra i centrifugalna sila uslijed okretanja broda. Moguće promjene u razini dna mogu nastati uslijed zamuljivanja između dvaju jaružanja, pogreške u jaružanju i pogreške u mjerenju dubine.

Prilikom određivanja sigurne dubine plovnog puta u eksploataciji, pri definiranju razine vode, treba uzeti u obzir moguće promjene uzrokovane morskim mijenama, atmosferskim tlakom, te drugim nepovoljnim meteorološkim i oceanološkim čimbenicima. Pritom se ne uzimaju u obzir moguće promjene u razini dna jer su u eksploataciji referentne dubine prikazane na navigacijskoj karti mjerene od hidrografske nule.

U konkretnom slučaju razmatra se plovidba broda u mirnim vremenskim uvjetima, te na povećanje gaza u plovidbi djeluje samo međudjelovanje broda s dnom.

Jedan od podataka koji je bilježen tijekom simulacija je i preostala dubina ispod kobilice na pramcu i krmi broda. Na taj način je moguće dobiti dodatni zagažaj i promjenu dinamičkog trima broda. Analizirajući izraze za izračun dodatnog zagažaja, izraz [20] autora *Barrassa* daje vrijednosti koje su najsličnije podatcima iz simulacija. U simulacijama je mjerena preostala dubina broda ispod kobilice (UKC) na pramcu i krmi, što omogućuje da se utvrdi gdje dolazi do najvećeg dodatnog zagažaja broda i koliko on iznosi. U tablici 44 prikazani su podatci koji su dobiveni simulacijama te usporedba dodatnog zagažaja s empirijskim izrazom.

Dodatni zagažaj brodova za prijevoz kontejnera i tankera za prijevoz sirove nafte te usporedba s empirijskim izrazima analizirana je u publikaciji Preporuke za projektiranje pristupnih plovnih putova.[166] Testirana su četiri broda za prijevoz kontejnera (veličine Panamax i Postpanamax) pri plovidbi u neograničenim i ograničenim plovnim putovima, te tanker (veličine Suezmax) u Sueskom kanalu. Prema podatcima, jedan od empirijskih izraza koji je bio najtočniji je izraz autora *Barrassa*.

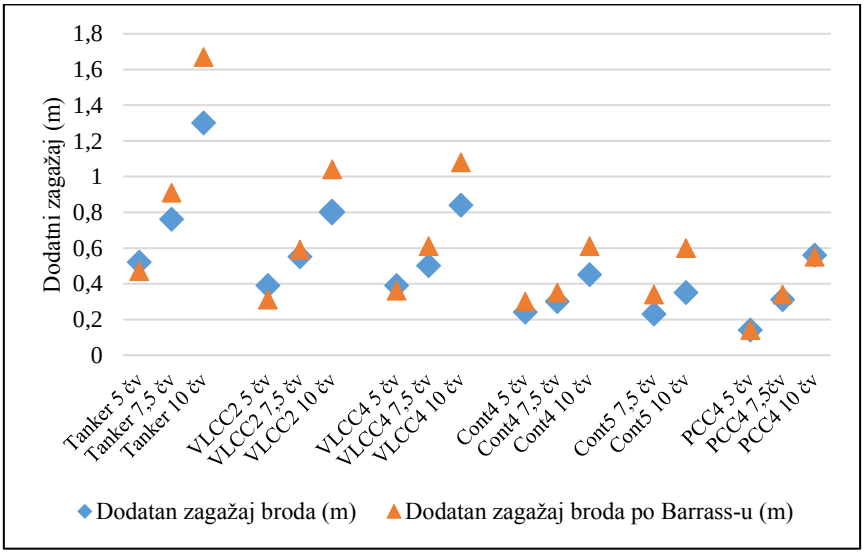
Također, dobivenim rezultatima je potvrđena tvrdnja da brodovi kojima je koeficijent punoće deplasmana veći od 0,7 imaju izražen dodatni zagažaj na pramcu, a brodovi koji imaju koeficijent punoće deplasmana manji od 0,7 imaju izražen dodatni zagažaj na krmi broda. Usporedbom podataka dodatnog zagažaja nije primijećena značajnija razlika u rezultatima za različite pokose. To je iz razloga, što na dodatni zagažaj, kako je navedeno ranije, utječe niz drugih značajnijih faktora.

[166] *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

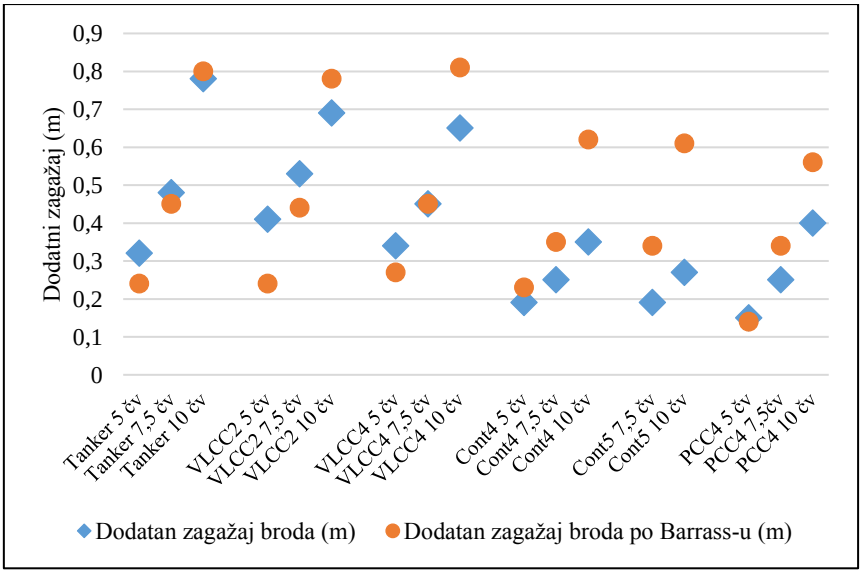
Tablica 44: Dodatni zagažaj broda – usporedba podataka dobivenih simulacijama i izraza prema *Barrassu*

Odnos *h/T* = 1,2					
Model broda	**Brzina broda (čv)**	**UKC pramac (m)**	**UKC krma (m)**	**Dodatni zagažaj broda (m)**	**Dodatni zagažaj broda prema *Barrassu* (m)**
Tanker	5,35	2,29	2,19	0,52	0,47
	7,45	2,18	2,06	0,76	0,91
	10,10	1,88	1,82	1,30	1,67
VLCC2	5,40	3,96	3,98	0,39	0,31
	7,40	3,87	3,91	0,55	0,59
	9,80	3,72	3,81	0,80	1,04
VLCC4	5,70	2,86	2,91	0,39	0,36
	7,40	2,80	2,86	0,50	0,61
	9,90	2,56	2,76	0,84	1,08
Cont4	5,90	2,73	2,63	0,24	0,30
	7,30	2,72	2,58	0,30	0,35
	9,72	2,66	2,49	0,45	0,61
Cont5	7,40	2,52	2,45	0,23	0,34
	9,80	2,47	2,38	0,35	0,60
PCC4	5,13	1,44	1,38	0,14	0,14
	7,82	1,35	1,30	0,31	0,34
	10,00	1,22	1,18	0,56	0,55
Odnos *h/T* = 1,5					
Model broda	**Brzina broda (čv)**	**UKC pramac (m)**	**UKC krma (m)**	**Dodatni zagažaj broda (m)**	**Dodatni zagažaj broda prema *Barrassu* (m)**
Tanker	5,40	6,14	6,04	0,32	0,24
	7,40	6,07	5,95	0,48	0,45
	9,85	5,91	5,81	0,78	0,80
VLCC2	5,40	10,20	10,21	0,41	0,24
	7,40	10,14	10,15	0,53	0,44
	9,80	10,05	10,08	0,69	0,78
VLCC4	5,70	7,51	7,55	0,34	0,27
	7,40	7,45	7,50	0,45	0,45
	9,90	7,32	7,43	0,65	0,81
Cont4	5,90	6,95	6,86	0,19	0,23
	7,32	6,93	6,82	0,25	0,35
	9,75	6,90	6,75	0,35	0,62
Cont5	7,40	6,44	6,37	0,19	0,34
	9,90	6,40	6,33	0,27	0,61
PCC4	5,13	3,65	3,60	0,15	0,14
	7,90	3,60	3,55	0,25	0,34
	10,1	3,52	3,48	0,40	0,56

U grafikonima 10 i 11, prikazana je razlika između vrijednosti dodatnog zagažaja dobivenog simulacijama i proračunatog empirijskim izrazom prema *Barrassu*.



Grafikon 10: Prikaz odnosa dodatnog zagažaja dobivenog simulacijama i izrazom prema *Barrassu* za *h/T* = 1,2



Grafikon 11: Prikaz odnosa dodatnog zagažaja dobivenog simulacijama i izrazom prema *Barrassu* za *h/T* = 1,5

Najveća razlika nastaje pri brzinama od 10 čvorova, što predstavlja graničnu brzinu sigurne plovidbe u ograničenim plovnim putovima, gdje empirijski izraz daje veće rezultate. Prema svim podatcima, izraz autora *Barrassa* pruža dovoljan stupanj sigurnosti i točnosti za procjenu dodatnog zagažaja broda, a u slučaju da su potrebni točniji podatci preporuča se upotreba simulacija i dinamičkih računalnih modela.

5.5. Razvoj modela određivanja dodatne širine plovnog puta

Cilj ovog rada je definiranje modela određivanja dodatne širine ograničenih plovnih putova, a sve kako bi se povećao stupanj sigurnosti plovidbe. Kako je u istraživanjima utvrđeno da je kretanje broda nelinearno, za izradu modela odabrana je višestruka polinomijalna

regresija.[167] Model se može definirati korištenjem odabrane metode, koja uključuje sve bitne parametre plovnog puta poput vrste pokosa, dubine i udaljenosti trajektorije plovidbe broda od ruba plovnog puta, te dodatno karakteristike broda koje utječu na putanju poput brzine plovidbe, deplasmana, duljine i koeficijenata brodske forme. Kod odabrane metode kriterij za određivanje nepoznati regresijskih koeficijenata, je bestežinska metoda najmanjih kvadrata. Opravdanost primjene metode bestežinskih najmanjih kvadrata očituje se kroz prilagodbu fluktuacija regresijske plohe s promjenama argumenata.[168]

Rezultat izrade modela je izračunati poprečni pomak broda od prvotne trajektorije. Nezavisne varijable u modelu su udaljenost broda od ruba plovnog puta, omjer dubine plovnog puta i gaza broda, brzina broda, vrsta pokosa plovnog puta (definiran kao odnos visine i duljine pokosa) te omjer osnovnih brodskih dimenzija (duljina preko svega i širina), kao i deplasmana i koeficijenta punoće deplasmana Uzimajući u obzir opisane parametre, izraz modela višestruke polinomijalne regresije je sljedeći:

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^{5} a_j x_j + \sum_{1\le j,k\le 5} a_{jk} x_j x_k + \sum_{1\le j,k,l\le 5} a_{jkl} x_j x_k x_l + \sum_{1\le j,k,l,m\le 5} a_{jklm} x_j x_k x_l x_m + \sum_{1\le j,k,l,m,n\le 5} a_{jklmn} x_j x_k x_l x_m x_n \text{ , [87]}$$

gdje su:

y – poprečni pomak od prvotne trajektorije broda (m)

x_j – nezavisna ulazna varijabla konkretnoga modela (udaljenost broda od točke nasukanja) (m)

x_k – nezavisna ulazna varijabla konkretnoga modela (pokos ruba plovnog puta)

x_l – nezavisna ulazna varijabla konkretnoga modela (brzina broda) (čv)

x_m – nezavisna ulazna varijabla konkretnoga modela (odnos dubine vode i gaza broda)

x_n – nezavisna ulazna varijabla konkretnoga modela (omjer brodskih dimenzija).

Rješavanje problema svodi se na određivanje nepoznatih vrijednosti parametara a_0, a_j, a_{jk}, a_{jkl}, a_{jklm}, a_{jklmn} za $1 \le j,k,l,m,n \le 5$, točnije određuju se njihove procijenjene vrijednosti $\hat{a}_0, \hat{a}_j, \hat{a}_{jk}, \hat{a}_{jkl}, \hat{a}_{jklm}, \hat{a}_{jklmn}$ koristeći metodu najmanjih kvadrata.

Odabrana metoda koristi zbroj kvadrata odstupanja izmjerenih vrijednosti modela od dobivenih regresijskih vrijednosti, koji su na čitavoj domeni mjerenja minimalni na parametarskom prostoru Λ. U konkretnom modelu procjena koeficijenata $\hat{a}$ određuje se na način da vrijedi sljedeći izraz:

$$\varepsilon(a) = \sum_{1\le j,k,l,m,n\le 5} (y_1 - y_{j,k,l,m,n})^2 = \min_{\Lambda}. \qquad [88]$$

Sve se svodi na sustav jednostavnih parcijalnih derivacija:

$$\frac{\partial\varepsilon(a)}{\partial a_0} = \frac{\partial\varepsilon(a)}{\partial a_j} = \frac{\partial\varepsilon(a)}{\partial a_{jk}} = \frac{\partial\varepsilon(a)}{\partial a_{jkl}} = \frac{\partial\varepsilon(a)}{\partial a_{jklm}} = \frac{\partial\varepsilon(a)}{\partial a_{jklmn}} = 0 \qquad 1 \le j,k,l,m,n \le 5. \qquad [89]$$

[167]Peckov, A. (2012). *A Machine Learning Approach to Polynomial Regression* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Jozef Stefan International Postgraduate School, Ljubljana).

[168]Orović, J. (2012). *The Optimisation of Propulsion Plants for Liquefied Natural Gas Carriers* (Doctoral dissertation, Faculty of maritime studies, University of Rijeka).

Prije same izrade modela potrebno je analizirati i protumačiti podatke dobivene simulacijama. Iz tog razloga brodovi su podijeljeni u dvije grupe:

- brodovi punije forme
- brodovi finije forme.

U konačnici su dobivena dva modela, za brodove punije i finije forme. Za analizu podataka koristio se statistički program „R“ i programski paket „Rattle“, a za samu izradu modela program „Matlab“.[169]

Validacija modela procjenjuje se korištenjem koeficijenta determinacije:

$$R^2 = 1 - \frac{(y_1 - \hat{y}_1)^2}{(y_1 - \bar{y}_1)^2}. \qquad [90]$$

Vrijednost $\bar{y}_1$ predstavlja aritmetičku sredinu zavisnih varijabli poprečnog pomaka broda. U slučaju da koeficijent determinacije iznosi 1, tada bi sve originalne vrijednosti zavisne varijable bile jednake vrijednostima regresijske zavisne varijable. U slučaju da koeficijent determinacije iznosi 0, tada ne postoji funkcionalna veza između varijabli. Međutim, uvođenje nove varijable u regresijsku jednadžbu povećava vrijednost koeficijenta determinacije, te je teško protumačiti predstavlja li povećanje pozitivni utjecaj na rezultat. Zato se, kao analitički pokazatelj, u prosudbi koristi korigirani koeficijent determinacije. Korigirani koeficijent determinacije definiran je izrazom:

$$R^2_{kor} = 1 - \frac{(y_1 - \hat{y}_1)^2}{(y_1 - \bar{y}_1)^2} \cdot \frac{n-1}{n-k-1}, \qquad [91]$$

gdje su:

n – opseg uzorka

k – broj regresijskih koeficijenta.

Korigirani koeficijent determinacije je jednak ili manji od koeficijenta determinacije.

5.5.1. Analiza modela za brodove punije forme

Pri definiranju modela poprečnog pomaka broda od prvotne trajektorije za grupu brodova punije forme, potrebno je identificirati utjecajne čimbenike. Jedan od načina analize velikog broja podataka dobivenih simulacijama je i korelacijska analiza. Korelacijskom analizom se utvrđuje koje su pojave i čimbenici uzajamno povezani. Korelacija može biti pozitivna i negativna, pozitivna je kad rast (ili pad) jedne varijable prati rast (ili pad) druge varijable, a negativna kad rast jedne varijable prati pad druge varijable i obratno.

Ulazne varijable dobivene simulacijom plovidbe brodova punije forme uzete u obzir pri izradi modela su:

y – poprečni pomak (m)

x_j – udaljenost plovidbe od točke nasukanja (m)

[169] Program *Matlab R2009b*, licenca Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci.

x_k – pokos ruba plovnog puta

x_l – brzina broda (čv)

x_m – odnos dubine vode i gaza broda

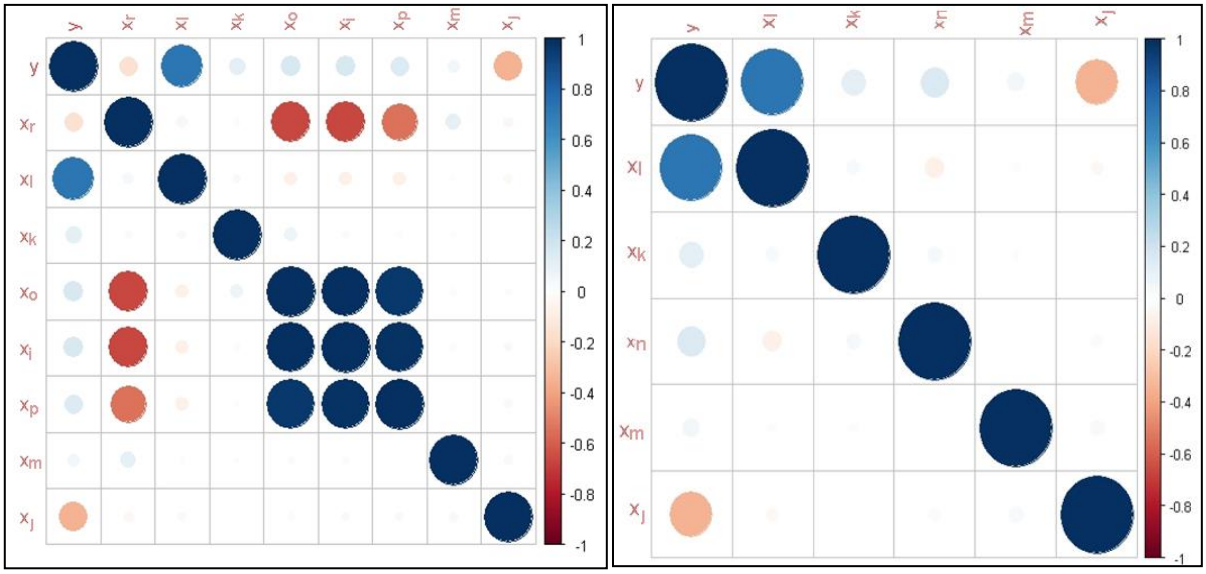
x_n – omjer deplasmana broda i duljine preko svega

x_i – deplasman broda (t)

x_o – duljina broda preko svega (m)

x_p – širina broda (m) i

x_r – koeficijent punoće deplasmana.

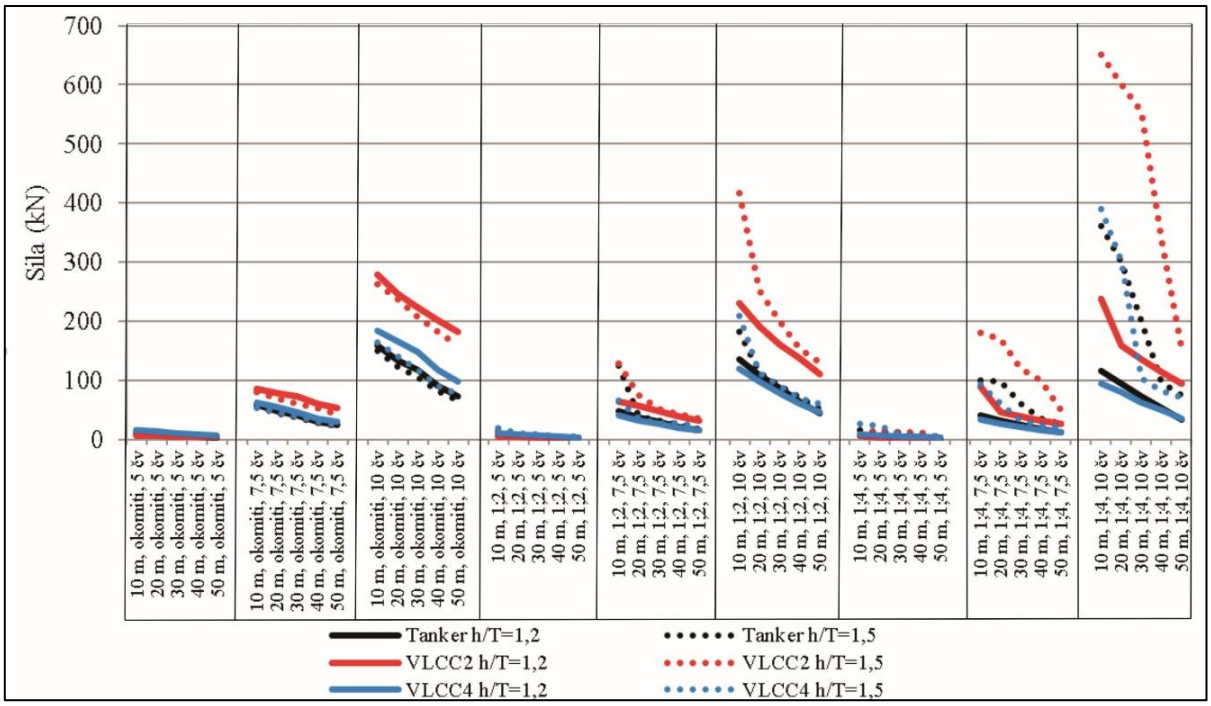


Slika 31: Dijagram korelacije (*Pearson*) parametara dobivenih simulacijama (lijevo) i parametara uzetih u obzir kod izrade modela zanosa (desno) za zaošijanje brodova punije forme

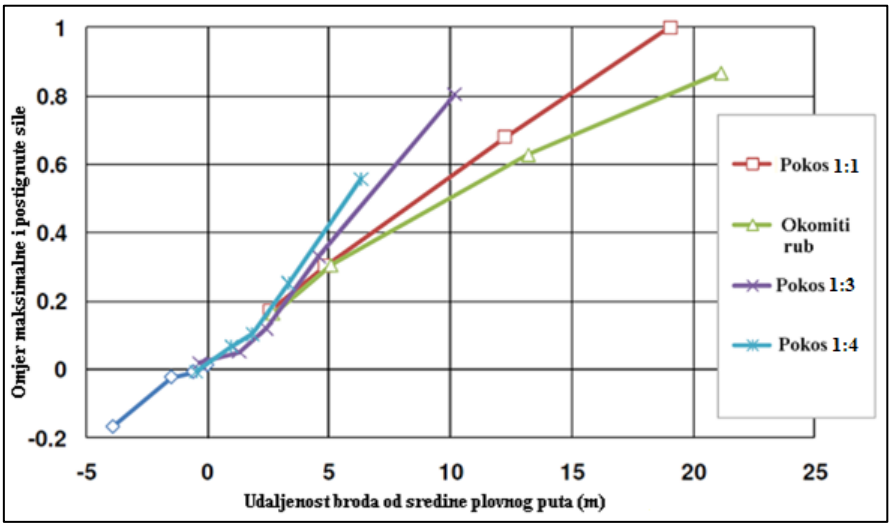
Prilikom izrade modela višestruke polinomijalne regresije potrebno je obratiti pozornost na međusobnu korelaciju korištenih parametara. Koristeći *Pearsonovu* korelaciju elemenata uočena je korelacija između parametara x_i, x_o, x_p *i* x_r. Pozitivna korelacija je izražena plavom bojom, a negativna crvenom. Veličina i boja točke odražava veličinu korelacije, tj. što je veća točka i izraženija boja veća je i korelacija između čimbenika. Rješavanju problema kolinearnosti pristupilo se na način da je dobivena nova varijabla x_n. Nova varijabla je dobivena omjerom deplasmana broda i duljine preko svega. Na slici 31 je prikazana korelacija elemenata prije i nakon transformacija parametara.

Na grafikonu 12 prikazana je prosječna poprečna sila međudjelovanja u pojedinom scenariju, a za postavku autopilota na praćenje zadane trajektorije. Vrijednosti u dijagramu su izražene u kN. U svim analiziranim scenarijima, prosječna sila je pozitivna. Također, za odnos gaza i dubine h/T = 1,2 najveća sila se javlja kod okomitog ruba plovnog puta. Međutim, za odnos gaza i dubine h/T = 1,5 najveća sila se javlja kod najmanjeg pokosa. U tim uvjetima, u usporedbi s manjim gazom ispod kobilice, brod je u većoj mjeri iznad samog pokosa, čime se smanjuje vrijednost S te se javljaju najveće sile.

Dobiveni rezultati mogu se potvrditi usporedbom s istraživanjima u bazenima koristeći modele brodova[170] te plovne putove različitih pokosa, koja su pokazala da s povećanjem dubine ispod kobilice i smanjenjem pokosa dolazi do značajnijeg porasta poprečne sile.



Grafikon 12: Poprečna sila međudjelovanja brodova punije forme za postavku autopilota na praćenje zadane trajektorije



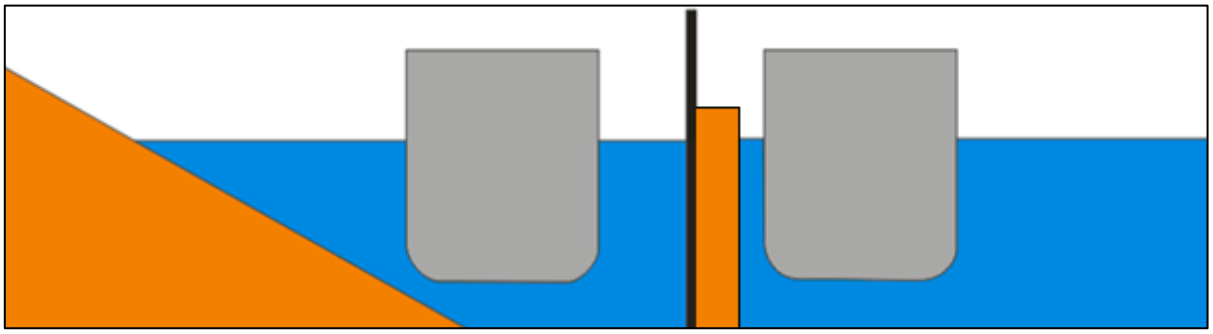
Grafikon 13: Vrijednosti sila dobivenih istraživanjima modela brodova punije forme u bazenima

(Izvor: Eloot, K., & Vantorre, M. (2011*). Ship Behaviour in Shallow and Confined Water: an Overview of Hydrodynamic Effects Through EFD*)

[170]Eloot, K., & Vantorre, M. (2011). *Ship Behaviour in Shallow and Confined Water:* An Overview of Hydrodynamic Effects Through EFD, RTO-AVT Specialists' Meeting on Assessment of Stability and Control Prediction Methods for Air and Sea Vehicle, Portsdown.

Na grafikonu 13 prikazane su vrijednosti sila dobivene testiranjem modela punije forme u bazenu. Udaljenost je mjerena od sredine plovnog puta, gdje vrijednost 0 predstavlja sredinu plovnog puta. Vrijednost sile je prikazana kao omjer maksimalne i postignute sile za određeni položaj broda na plovnom putu. Iz grafikona je vidljivo da se s približavanjem rubu plovnog puta javlja najveći rast kod najmanjeg pokosa ruba plovnog puta. U navedenim istraživanjima brod se približavao do početka pokosa, te nije dolazio iznad njega. Međutim projekcijom sila koje bi nastale kad bi brod došao iznad pokosa dolazi se do zaključka da odgovaraju rezultatima dobivenim na simulatoru.

Povećanje sile pri plovidbi u blizini pokosa 1:4 (0,25), kod odnosa dubine vode i gaza broda h/T = 1,5, može se objasniti i time što je brod na tim udaljenostima iznad samog pokosa (Slika 32), te je smanjen poprečni presjek između broda i obale, uslijed čega dolazi do značajnijeg pada tlaka između broda i obale, koji djeluje na način da privlači brod k obali.



Slika 32: Odnos poprečnog presjeka plovnog puta s pokosom omjera visine i duljine 1:4 i okomitog plovnog puta iste dubine

Nakon analize podataka pristupilo se izradi modela, gdje je najbolje rezultate, s obzirom na broj regresijskih koeficijenata i točnost, pokazao model višestruke polinomijalne regresije četvrtog stupnja. Nakon razrade usvojen je sljedeći izraz za određivanje zanosa brodova punije forme:

$$y_{punija\,forma} = a_0 + \sum_{j=1}^{5} a_j x_j + \sum_{1\le j,k\le 5} a_{jk} x_j x_k + \sum_{1\le j,k,l\le 5} a_{jkl} x_j x_k x_l + \sum_{1\le j,k,l,m\le 5} a_{jklm} x_j x_k x_l x_m + \sum_{1\le j,k,l,m,n\le 5} a_{jklmn} x_j x_k x_l x_m x_n \quad [92]$$

Točnost modela, izražena koeficijentom determinacije, iznosi 0,9746 i ukupnom srednjom vrijednosti apsolutnog odstupanja[171] MAE_{uk} = 0,4387. Model se sastoji od devedeset dva regresijska koeficijenta, koji su prikazani u tablici 45.

[171]MAEuk – engl. *Total Mean Absolute Error*, ukupna srednja vrijednost apsolutnog odstupanja izračunata tijekom unakrsne-validacije (engl. *cross-validation*) koja je napravljena po pristupu *"Leave-one-out cross-validation"* (LOOCV)'. LOOCV izdvaja jedno promatranje za validaciju (*j*-to), a sva ostala promatranja unutar uzorka koristi za treniranje modela. Ovaj se postupak ponavlja *n* puta za svaki od ukupno *n* promatranja, pri čemu se svaki put izračuna sljedeći MAE_j a na kraju i MAE_{uk}. Primjena ovog usporednog pokazatelja se u strojnom učenju pokazala posebno pouzdanom jer je isti ponajmanje osjetljiv na tzv. 'over-fitting' koji se u polinomijalnoj regresiji može izravno povezati s povećanjem stupnja polinoma.

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). *Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) Over the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Average Model Performance*. Climate Research, 30(1), str. 79-82.

Tablica 45: Dobiveni regresijski koeficijenti modela za brodove punije forme

Koeficijent	Parametar	Koeficijent	Parametar	Koeficijent	Parametar
0,024402	x_5	0,006373	$x_2^2 \cdot x_4 \cdot x_5$	0,026644	x_1^2
0,000344	x_5^2	0,005647	$x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_5$	-4,2E-06	$x_1^2 \cdot x_5$
1,31E-06	x_5^3	16,8648	$x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4$	-9,2E-09	$x_1^2 \cdot x_5^2$
1,9E-07	$x_4 \cdot x_5^3$	0,069487	$x_2^2 \cdot x_3^2$	-6,3E-06	$x_1^2 \cdot x_4 \cdot x_5$
-0,00011	$x_4^2 \cdot x_5^2$	0,00695	$x_2^3 \cdot x_5$	0,007746	$x_1^2 \cdot x_4^2$
-0,01388	$x_4^3 \cdot x_5$	-12,6231	$x_2^3 \cdot x_3$	-9,8E-05	$x_1^2 \cdot x_3$
-0,14579	$x_3 \cdot x_5$	-4,05975	x_1	1,59E-06	$x_1^2 \cdot x_3 \cdot x_5$
-0,00013	$x_3 \cdot x_5^2$	0,00252	$x_1 \cdot x_5$	0,001548	$x_1^2 \cdot x_3 \cdot x_4$
7,15E-08	$x_3 \cdot x_5^3$	-4,3E-06	$x_1 \cdot x_5^2$	-4,8E-05	$x_1^2 \cdot x_3^2$
-2E-06	$x_3 \cdot x_4 \cdot x_5^2$	3,13E-09	$x_1 \cdot x_5^3$	7,71E-05	$x_1^2 \cdot x_2$
0,022265	$x_3 \cdot x_4^2 \cdot x_5$	1,05E-06	$x_1 \cdot x_4 \cdot x_5^2$	5,66E-06	$x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_5$
1,45423	$x_3 \cdot x_4^3$	-0,00033	$x_1 \cdot x_4^2 \cdot x_5$	-0,02071	$x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_4$
2,70643	x_3^2	-0,05466	$x_1 \cdot x_4^3$	-0,00055	$x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3$
0,027704	$x_3^2 \cdot x_5$	1,53416	$x_1 \cdot x_3$	0,006247	$x_1^2 \cdot x_2^2$
2,06E-06	$x_3^2 \cdot x_5^2$	-0,00011	$x_1 \cdot x_3 \cdot x_5$	-0,00068	x_1^3
-0,00431	$x_3^2 \cdot x_4 \cdot x_5$	-1,7E-07	$x_1 \cdot x_3 \cdot x_5^2$	1,05E-07	$x_1^3 \cdot x_5$
-0,01511	$x_3^2 \cdot x_4^2$	-2,9E-05	$x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5$	-9,5E-05	$x_1^3 \cdot x_4$
-0,62305	x_3^3	-0,18211	$x_1 \cdot x_3 \cdot x_4^2$	-1,7E-05	$x_1^3 \cdot x_3$
-0,00109	$x_3^3 \cdot x_5$	-0,20365	$x_1 \cdot x_3^2$	0,000198	$x_1^3 \cdot x_2$
0,062794	$x_3^3 \cdot x_4$	1,25E-05	$x_1 \cdot x_3^2 \cdot x_5$	5,98E-06	x_1^4
0,308328	$x_2 \cdot x_5$	0,019368	$x_1 \cdot x_3^2 \cdot x_4$	0,029463	x_3^4
-0,00078	$x_2 \cdot x_5^2$	0,007728	$x_1 \cdot x_3^3$	-1,4E-09	x_5^4
6,61E-07	$x_2 \cdot x_5^3$	-0,84438	$x_1 \cdot x_2$		
-0,00012	$x_2 \cdot x_4 \cdot x_5^2$	-0,00049	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_5$		
0,047223	$x_2 \cdot x_4^2 \cdot x_5$	-8,7E-07	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_5^2$		
1,57476	$x_2 \cdot x_4^3$	7,73E-05	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5$		
-0,00624	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_5$	1,69476	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_4^2$		
-1,2E-05	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_5^2$	0,045821	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$		
0,002451	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5$	8,14E-05	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_5$		
-13,9057	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_4^2$	0,1671	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$		
0,890972	$x_2 \cdot x_3^2$	-0,00588	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3^2$		
0,00088	$x_2 \cdot x_3^2 \cdot x_5$	0,0007	$x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_5$		
0,107543	$x_2 \cdot x_3^2 \cdot x_4$	-3,00076	$x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_4$		
-0,0527	$x_2 \cdot x_3^3$	-0,15011	$x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3$		
-5,4E-05	$x_2^2 \cdot x_5^2$	2,22515	$x_1 \cdot x_2^3$		

5.5.2. Analiza modela brodova finije forme

Ulazni podatci modela poprečnog pomaka broda od prvotne trajektorije za grupu brodova finije forme, će se i u ovome slučaju analizirati koristeći korelacijsku analizu. To će nam omogućiti uočavanje posebnosti pojava i čimbenika koji su vezani za analiziranu grupu brodova te doprinijeti pravilnom tumačenju podataka i samoj izradi modela.

Pri izradi modela brodova finije forme, korištene su sljedeće ulazne varijable:

y – poprečni pomak (m)

x_j – udaljenost plovidbe od točke nasukanja (m)

x_k – pokos ruba plovnog puta

x_l – brzina broda (čv)

x_m – odnos dubine vode i gaza broda

x_n – omjer duljine broda preko svega i širine broda

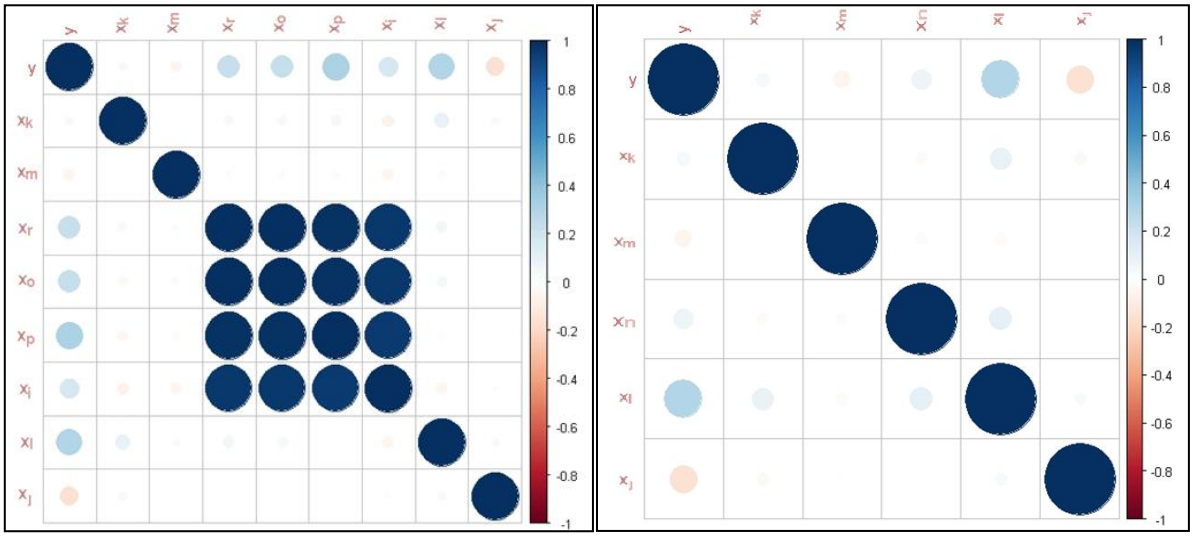
x_i – deplasman broda (t)

x_o – duljina broda preko svega (m)

x_p – širina broda (m) i

x_r – koeficijent punoće deplasmana.

Kako bi se eliminirala kolinearnost, ulazne varijable za brodove finije forme, su također analizirane koristeći *Pearsonovu* korelacijsku matricu. Na slici 33 (lijevo) je prikazana analiza parametra dobivenih na simulatoru, gdje je vidljiva izražena korelacija između parametara x_i, x_o, x_p *i* x_r. Da bi dobili vjerodostojan model potrebno je eliminirati kolinearnost između parametara, te je za potrebe izrade modela određena nova varijabla x_n. Nova varijabla dobivena je omjerom duljine broda preko svega i širine broda.

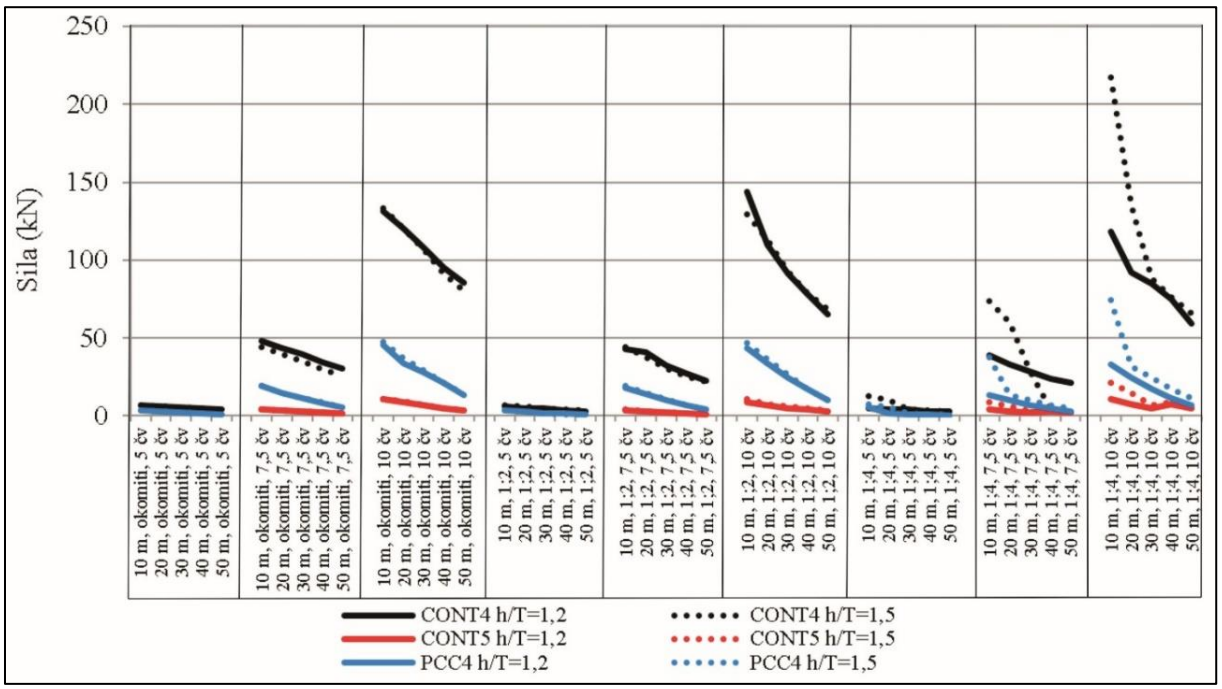


Slika 33: Dijagram korelacije (*Pearson*) parametara dobivenih simulacijama (lijevo) i parametara uzetih u obzir kod izrade modela zanosa (desno) za zaošijanje brodova finije forme

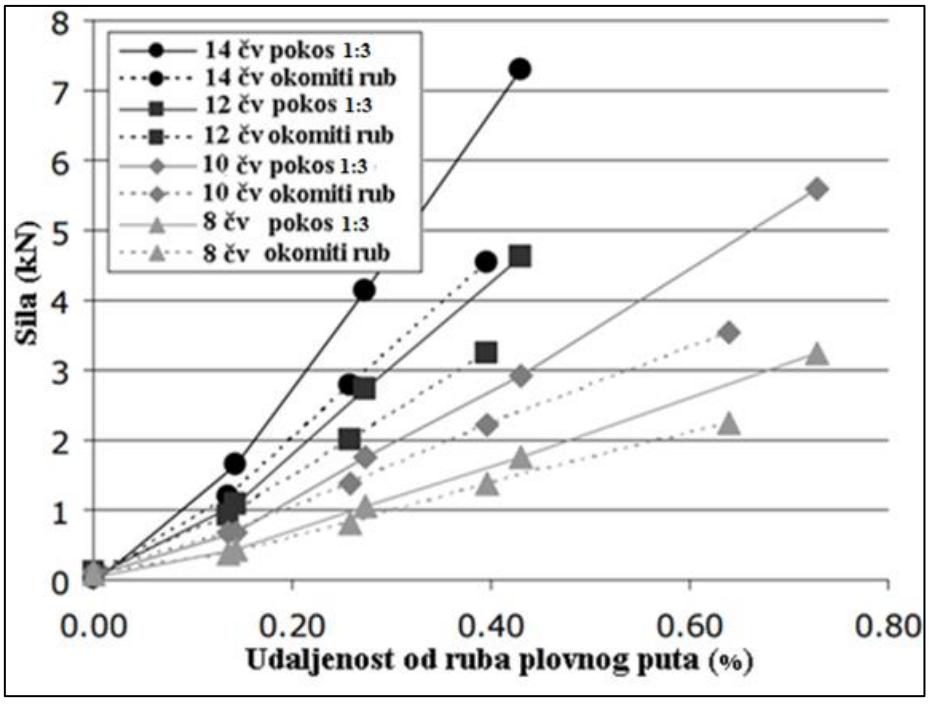
Na grafikonu 14 prikazana je prosječna poprečna sila međudjelovanja u pojedinom scenariju, a za postavku autopilota na praćenje zadane trajektorije. Vrijednosti u dijagramu su izražene u kN. Opći uzorak sila međudjelovanja brodova finije forme je sličan kao i kod brodova punije forme, što potvrđuje ranije opisanu teoriju. Sile koje se javljaju su višestruko manje, što se može pripisati formi broda. Vjerodostojnost podataka dobivenih simulacijama može se potvrditi usporedbom s istraživanjima provedenim na modelima brodova u bazenima.[172] U navedenom istraživanju analizirao se utjecaj pokosa ruba plovnog puta na brod u plovidbi, te su dobivene vrijednosti sila na brod za prijevoz kontejnera dimenzija *Loa* = 350 m, *B* = 42,90 m, *T* = 14,5 m i C_B = 0,66. Na grafikonu 15 prikazane su vrijednosti dobivenih sila za plovni put s pokosom 1:3 i za okomiti rub plovnog puta. Udaljenost broda od ruba plovnog puta prikazana je u postotku, pa vrijednost 0,00 predstavlja sredinu plovnog puta, a vrijednost 1 sam rub plovnog puta. Prema prikazanim podatcima, vidljivo je da se vrijednosti

[172]Lataire, E., et al. (2007, June). *Navigation in Confined Waters: Influence of Bank Characteristics on Ship-Bank Interaction*. In International Conference on Marine Research and Transportation, ICMRT.

sila u pojedinim uvjetima ne smanjuju značajnije s povećanjem omjera pokosa ruba plovnog puta. I u ovom slučaju, brod nije prelazio iznad samog pokosa, međutim tendencija rasta sila odgovara podatcima prikazanima u grafikonu 14.



Grafikon 14: Poprečne sila međudjelovanja brodova finije forme za postavku autopilota na praćenje zadane trajektorije



Grafikon 15: Vrijednosti sila dobivenih istraživanjima modela brodova finije forme u bazenima

(Izvor: Lataire, E., et al. (2007, June). *Navigation in Confined Waters: Influence of Bank Characteristics On Ship-Bank Interaction*. In International Conference on Marine Research and Transportation, ICMRT)

I u ovom slučaju je za izradu modela korištena višestruka polinomijalna regresija četvrtog stupnja, a usvojen je sljedeći izraz za određivanje zaošijanja brodova finije forme:

$$y_{finija_forma} = a_0 + \sum_{j=1}^{5} a_j x_j + \sum_{1\le j,k\le 5} a_{jk} x_j x_k + \sum_{1\le j,k,l\le 5} a_{jkl} x_j x_k x_l + \sum_{1\le j,k,l,m\le 5} a_{jklm} x_j x_k x_l x_m + \sum_{1\le j,k,l,m,n\le 5} a_{jklmn} x_j x_k x_l x_m x_n . \quad [93]$$

Točnost modela izražena koeficijentom determinacije iznosi 0,9775 i ukupnom srednjom vrijednosti apsolutnog odstupanja MAEuk = 0,3531. Model se sastoji od devedeset dva regresijska koeficijenta koji su prikazani u tablici 46.

Tablica 46: Dobiveni regresijski koeficijenti modela za brodove finije forme

Koeficijent	Parametar	Koeficijent	Parametar	Koeficijent	Parametar
-35,4534	x_2^2	-23,7441	$x_2^2 \cdot x_4^2$	-0,42348	$x_1^2 \cdot x_5$
95,46056	x_5^3	-19,9209	$x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_5$	0,029108	$x_1^2 \cdot x_5^2$
69,30564	$x_4 \cdot x_5^3$	-1,07331	$x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4$	0,003346	$x_1^2 \cdot x_4 \cdot x_5$
-375,815	$x_4^2 \cdot x_5^2$	-1,85261	$x_2^2 \cdot x_3^2$	0,003822	$x_1^2 \cdot x_4^2$
696,603	$x_4^3 \cdot x_5$	-1308,59	$x_2^3 \cdot x_5$	-0,00073	$x_1^2 \cdot x_3$
-250,632	$x_3 \cdot x_5^2$	112,0148	$x_2^3 \cdot x_3$	5,97E-05	$x_1^2 \cdot x_3 \cdot x_5$
22,85761	$x_3 \cdot x_5^3$	5,313264	$x_1 \cdot x_5$	4,71E-05	$x_1^2 \cdot x_3 \cdot x_4$
-58,6194	$x_3 \cdot x_4 \cdot x_5^2$	-1,50799	$x_1 \cdot x_5^2$	-2,3E-05	$x_1^2 \cdot x_3^2$
310,3324	$x_3 \cdot x_4^2 \cdot x_5$	0,119845	$x_1 \cdot x_5^3$	0,013683	$x_1^2 \cdot x_2$
-627,802	$x_3 \cdot x_4^3$	-0,20836	$x_1 \cdot x_4 \cdot x_5^2$	-0,00199	$x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_5$
160,5534	x_3^2	0,828765	$x_1 \cdot x_4^2 \cdot x_5$	-0,01217	$x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_4$
195,2771	$x_3^2 \cdot x_5$	-1,1686	$x_1 \cdot x_4^3$	0,000366	$x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3$
-8,44065	$x_3^2 \cdot x_5^2$	-19,125	$x_1 \cdot x_3$	0,009964	$x_1^2 \cdot x_2^2$
0,370984	$x_3^2 \cdot x_4 \cdot x_5$	5,535624	$x_1 \cdot x_3 \cdot x_5$	0,0006	x_1^3
24,56299	$x_3^2 \cdot x_4^2$	-0,38851	$x_1 \cdot x_3 \cdot x_5^2$	6,85E-06	$x_1^3 \cdot x_5$
-75,5639	x_3^3	0,030241	$x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5$	-0,00029	$x_1^3 \cdot x_4$
-3,03067	$x_3^3 \cdot x_5$	-0,07416	$x_1 \cdot x_3 \cdot x_4^2$	9,9E-06	$x_1^3 \cdot x_3$
-3,08832	$x_3^3 \cdot x_4$	-0,0654	$x_1 \cdot x_3^2$	2,87E-05	$x_1^3 \cdot x_2$
6487,883	$x_2 \cdot x_5$	0,002193	$x_1 \cdot x_3^2 \cdot x_5$	-2,5E-06	x_1^4
-1566,25	$x_2 \cdot x_5^2$	-0,0073	$x_1 \cdot x_3^2 \cdot x_4$	3329,981	x_2^4
115,3906	$x_2 \cdot x_5^3$	0,002534	$x_1 \cdot x_3^3$	3,253059	x_3^4
-356,738	$x_2 \cdot x_4 \cdot x_5^2$	-64,0654	$x_1 \cdot x_2$	-12,5578	x_5^4
1906,749	$x_2 \cdot x_4^2 \cdot x_5$	17,84891	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_5$		
-3274,72	$x_2 \cdot x_4^3$	-1,22606	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_5^2$		
-6546,59	$x_2 \cdot x_3$	0,419285	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5$		
1322,725	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_5$	-0,94762	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_4^2$		
-87,0782	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_5^2$	-0,1619	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$		
-4,29589	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5$	-0,02491	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_5$		
-22,5476	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_4^2$	0,191917	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$		
244,8969	$x_2 \cdot x_3^2$	0,003363	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3^2$		
-2,82568	$x_2 \cdot x_3^2 \cdot x_5$	-0,28825	$x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_5$		
5,811904	$x_2 \cdot x_3^2 \cdot x_4$	-0,68413	$x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_4$		
-9,9661	$x_2 \cdot x_3^3$	-0,02037	$x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3$		
168,6777	$x_2^2 \cdot x_5^2$	1,570203	$x_1 \cdot x_2^3$		
10,99754	$x_2^2 \cdot x_4 \cdot x_5$	1,468566	x_1^2		

5.6. Ocjena valjanosti modela određivanja potrebne širine plovnog puta

Nakon izrade modela pristupilo se ocjeni valjanosti podataka, tj. provjeri točnosti modela usporedbom podataka dobivenih uz pomoć modela i podataka dobivenih simulatorom za istu vrstu broda. Ocjena valjanosti se izvodila na način da je proračunata vrijednost poprečnog pomaka broda zbog utjecaja zaošijanja korištenjem modela uspoređena s vrijednosti poprečnog pomaka zbog utjecaja zaošijanja dobivenih simulacijama. Vrijednost poprečnog pomaka, dobivena modelom, predstavlja dodatnu širinu plovnog puta u kojoj brod može sigurno ploviti bez dodira ruba plovnog puta.

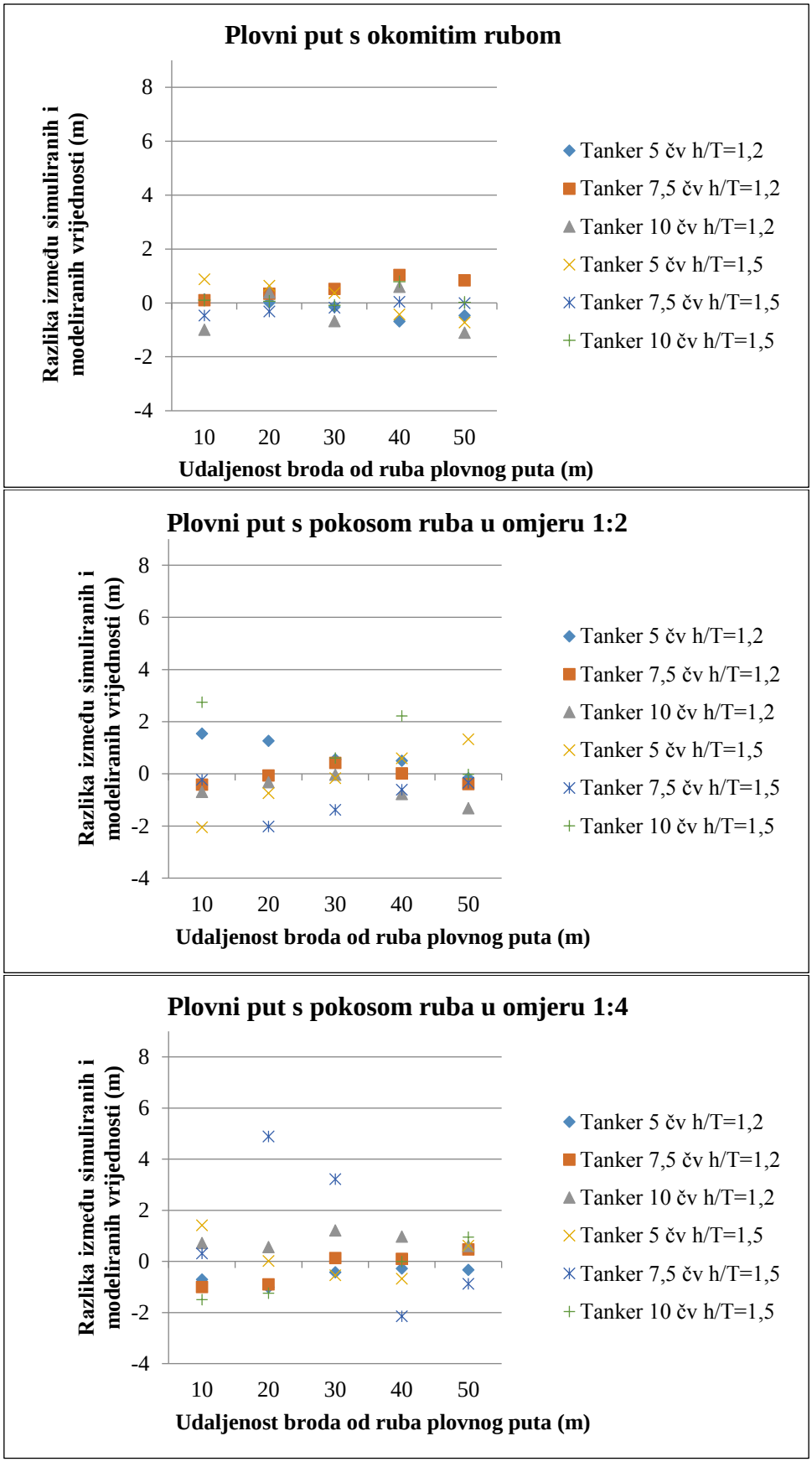
U grafikonima 16, 17, 18 je prikazana usporedba poprečnog pomaka modela brodova punije forme „Tanker“, „VLCC2“ i „VLCC4“ dobivenih na simulatoru i vrijednosti izračunatih modelom. Na grafikonima je prikazano odstupanje između modeliranih i podataka dobivenih simulacijama.

Cilj ocjene valjanosti je potvrđivanje točnosti modela za korištene modele brodova. Za model broda tanker, u prosjeku odstupanje iznosi 2 metra. Valja naglasiti da model u nekim dijelovima pokazuje i veće odstupanje, ali to odstupanje ni u jednom trenu nije veće od 5 metara.

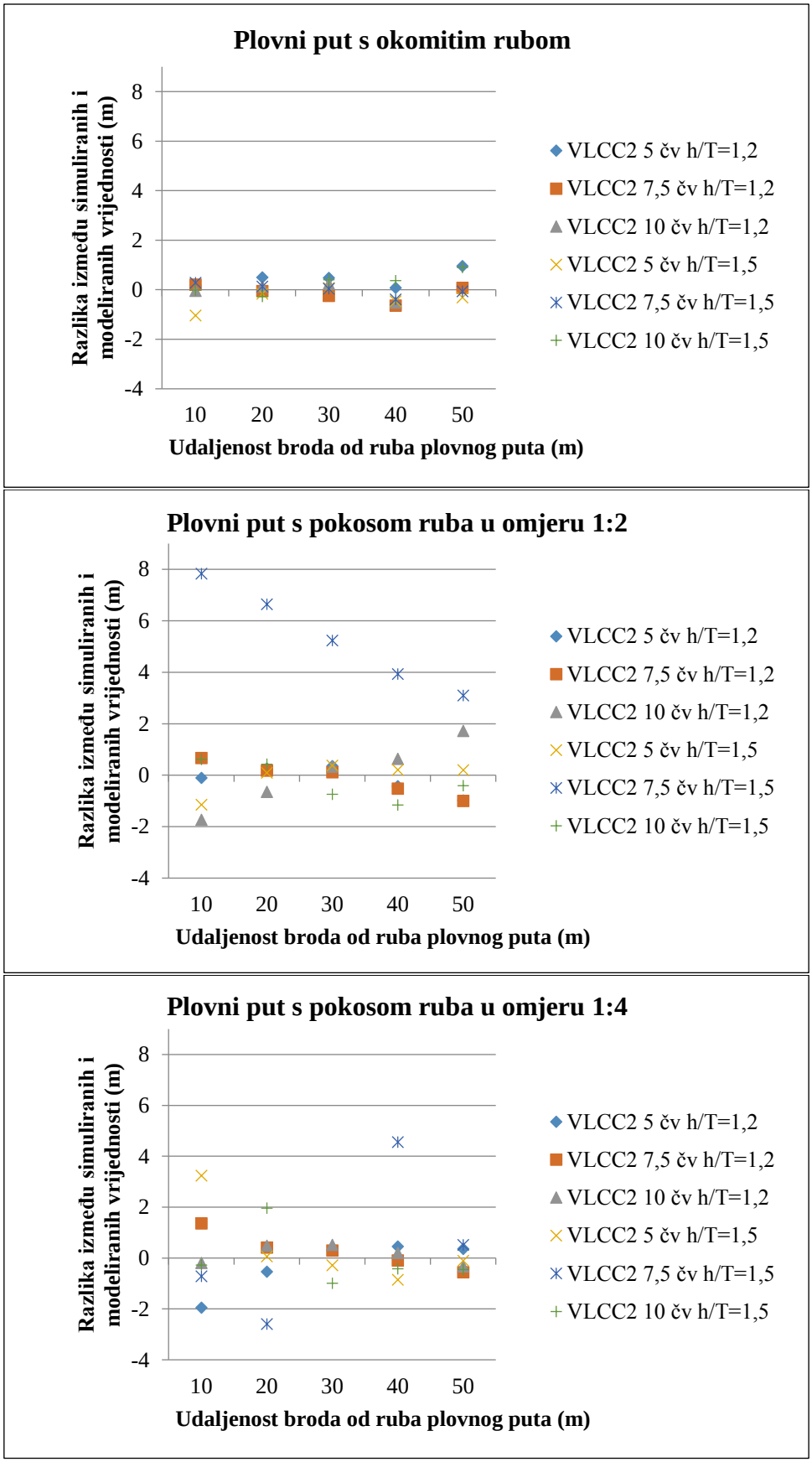
Za model broda VLCC2 prosjek odstupanja podataka dobivenih modelom nije veći od 2 metra, a najveća razlika ne prelazi 8 metara. Kod modela broda VLCC4 prosječno odstupanje je isto tako 2 metra, međutim u ovom slučaju najveća zabilježena razlika ne prelazi 5 metara. Nadalje, potrebno je ponovno naglasiti da kreirani model vrijedi samo za modele brodova i plovne putove korištene u izradi modela, pa se stoga može koristiti samo za modele brodova i plovnih putova vrlo sličnih karakteristika.

U grafikonima 19, 20, 21 je prikazana ocjena valjanosti podataka za brodove finije forme. I u ovom slučaju je analizirano odstupanje između modelirane i simulirane vrijednosti. Za sva tri modela broda prosječno odstupanje između modelirane i simulirane vrijednosti iznosi 3 metra, dok najveća pojedina odstupanja ne prelaze 4 metara.

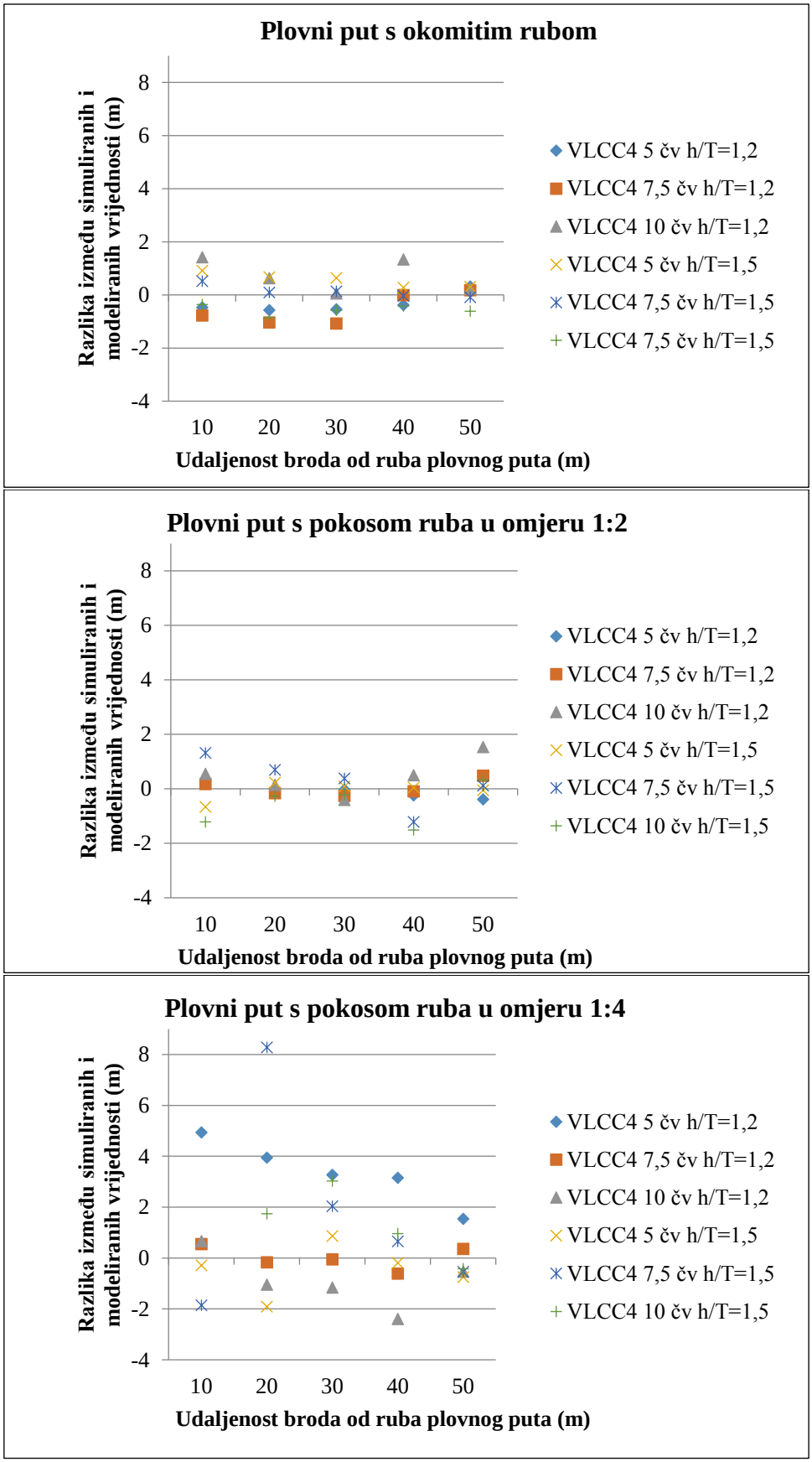
Analizirajući dobivene rezultate može se zaključiti da su oba modela vrlo vjerodostojna, te ni u jednom slučaju značajnije ne odstupaju od stvarnih vrijednosti. Dobiveni podatci potvrđuju vjerodostojnost oba modela, koji stoga mogu zamijeniti postupak simulacije, te doprinijeti točnosti determinističke metode definiranja širine plovnog puta.



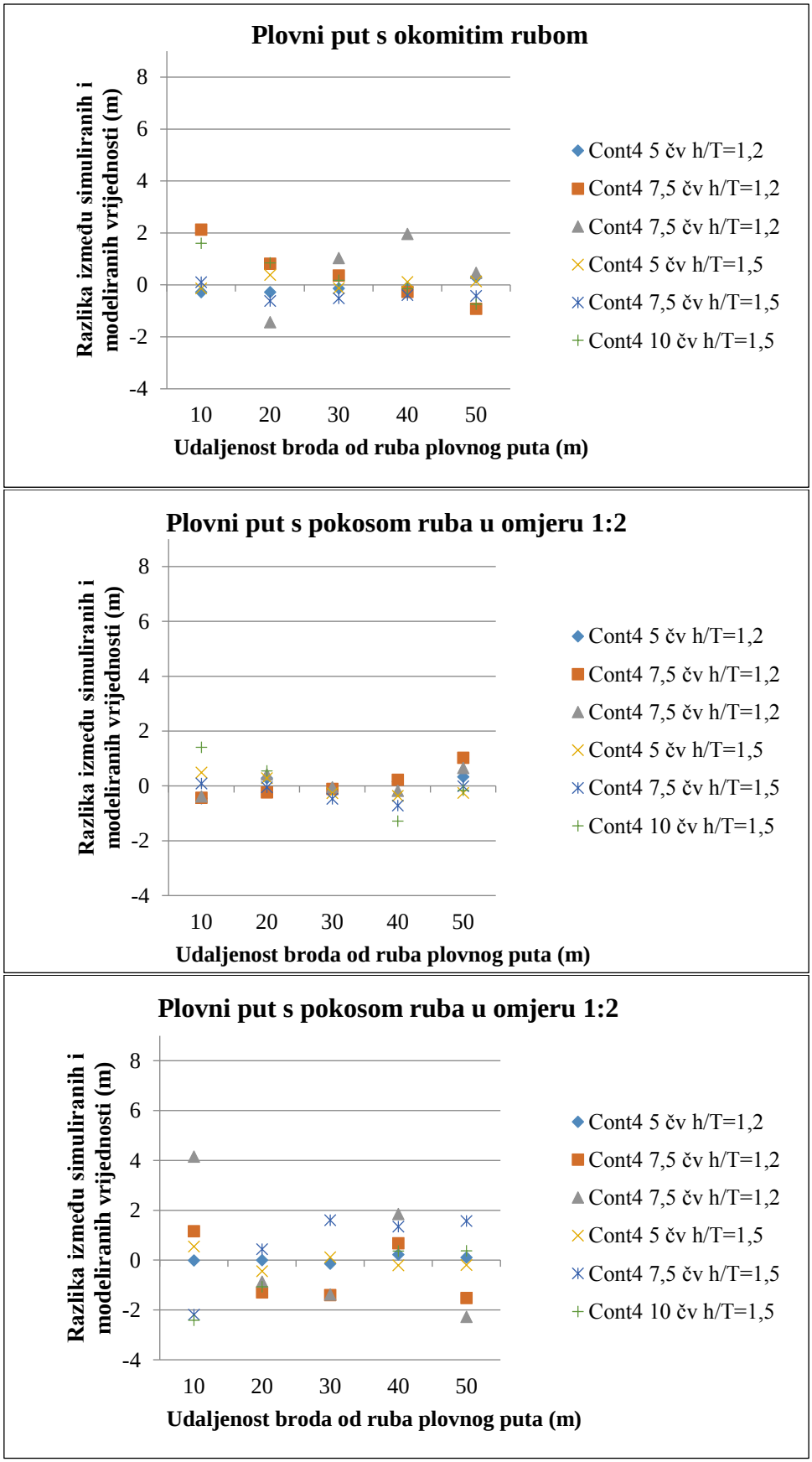
Grafikon 16: Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda dobivenog simulacijama i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za model broda Tanker



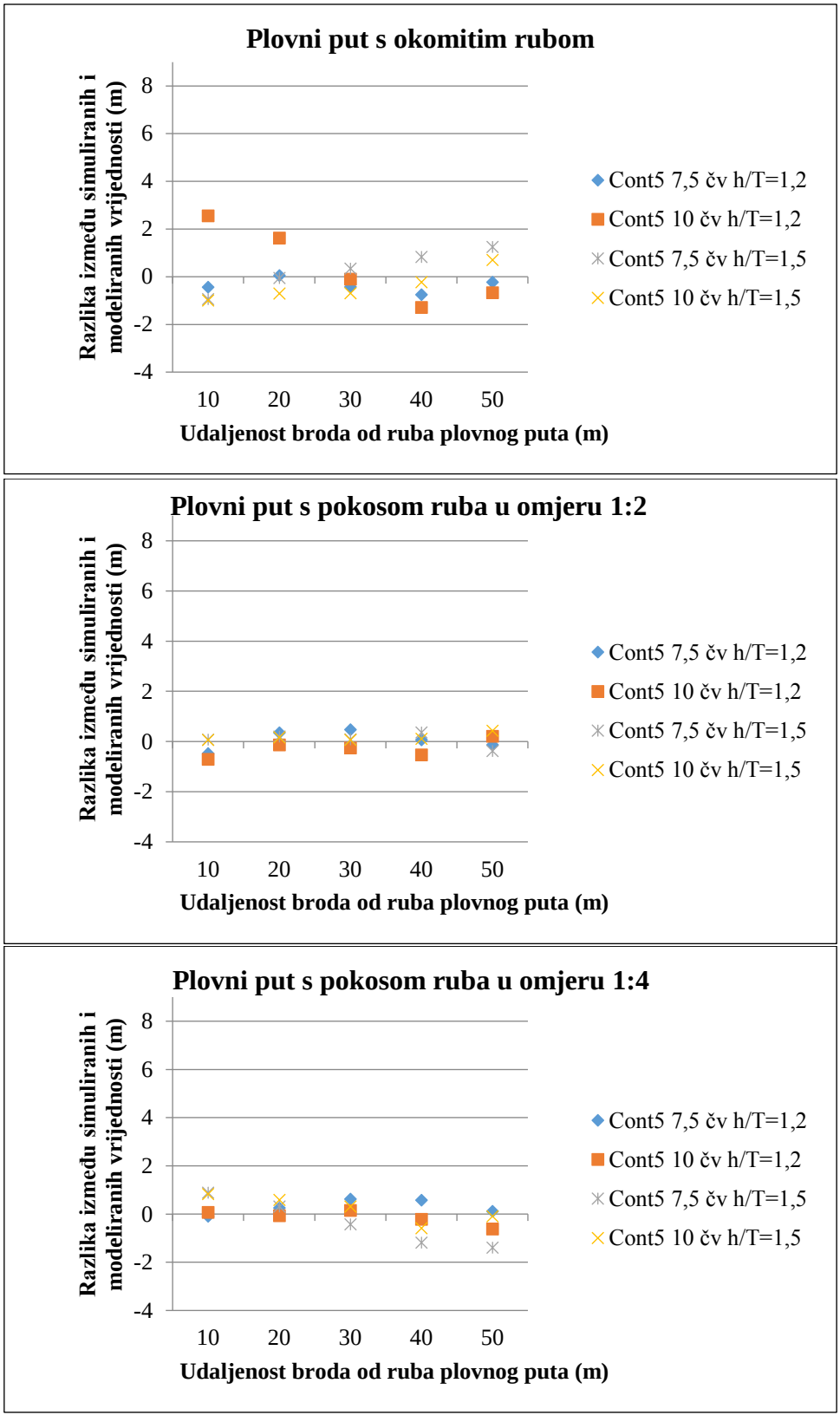
Grafikon 17: Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za model broda VLCC2



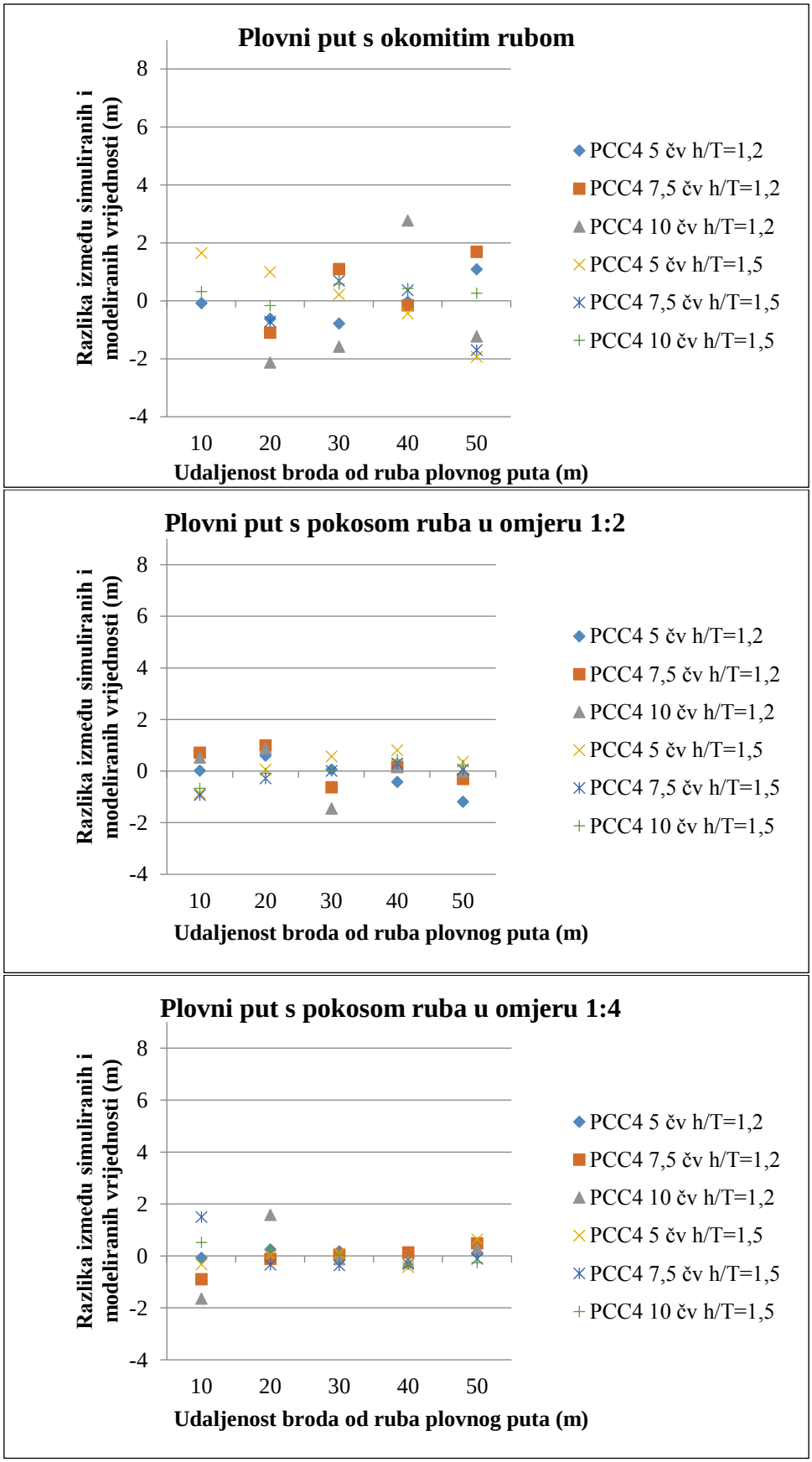
Grafikon 18 Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za model broda VLCC4



Grafikon 19: Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za model broda Cont4



Grafikon 20: Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za model broda Cont5



Grafikon 21: Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za modela broda PCC4

5.7. Usporedba modela s postojećim metodama određivanja potrebne širine plovnog puta

Testiranje modela, provedeno je na način da su dobiveni rezultati uspoređeni s postojećim metodama za određivanje udaljenosti trajektorije broda od ruba plovnog puta. U prvom redu s rezultatima PIANC-a, ROM-a i MLIT-a.

U uputama za projektiranje plovnih putova i prilaza lukama, izdane od strane PIANC-a,[173] međudjelovanje između broda i ruba plovnog puta se razmatra kroz dodatnu širinu. Ta dodatna širina se dobije na temelju oblika pokosa plovnog puta, brzine broda i izloženosti plovnog puta vanjskim utjecajima. Pokosi su definirani kao blagi (1:10), strmi i okomiti, s tim da zadnja dva tipa pokosa nisu definirani omjerom. Također, u obzir se uzima utjecaj brzine koja se pritom definira kao velika, umjerena i mala, bez da je definirana brojem u odgovarajućoj jedinici. Iz navedenog je vidljivo da će dodatna širina plovnog puta ovisiti o procjeni. Kada se definiraju svi čimbenici, dodatna širina plovnog puta se određuje u odnosu na širinu broda. Podatci su prikazani tablici 47.

Tablica 47: Vrijednost dodatne širine plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja između trupa broda i ruba plovnog puta prema PIANC-u

Dodatna širina od ruba plovnog puta (lijevo i desno)	Brzina broda	Vanjski plovni put	Unutarnji plovni put
Blagi pokos ruba plovnog puta (1:10 i manje)	**Velika**	0,2 *B*	0,2 *B*
	Umjerena	0,1 *B*	0,1 *B*
	Mala	0,0 *B*	0,0 *B*
Umjereni pokos ruba plovnog puta	**Velika**	0,7 *B*	0,7 *B*
	Umjerena	0,5 *B*	0,5 *B*
	Mala	0,3 *B*	0,3 *B*
Strmi i okomiti rubovi plovnog puta	**Velika**	1,3 *B*	1,3 *B*
	Umjerena	1,0 *B*	1,0 *B*
	Mala	0,5 *B*	0,5 *B*

Preporuke od strane ROM-a,[174] predviđaju također dodatnu širinu plovnog puta koju valja uzeti u obzir zbog utjecaja međudjelovanja između trupa broda i obale. Vrijednosti su prikazane tabelarno, a ulazni parametri su oblik pokosa plovnog puta i brzina broda. Kod ovog pristupa pokos i brzina su definirani, te ne ovise o procjeni. Potrebna dodatna širina je podijeljena na dodatnu širinu plovnog puta zbog utjecaja sila međudjelovanja, te na udaljenost broda od ruba plovnog puta koja se ne smije prekoračiti. Obje vrijednosti određuju se u odnosu na širinu broda. Preporuke su prikazane u tablici 48.

[173] *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, PIANC, Report No. 121-2014.

[174] Puertos Del Estado (1999): *Recommendations for Maritime Works* (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.

Tablica 48: Vrijednosti dodatne širine plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja trupa broda i ruba plovnog puta prema ROM-u

	Dodatna širina plovnog puta zbog utjecaja sila međudjelovanja	Udaljenost ruba plovnog puta od obale koja se ne smije prekoračiti	Zbroj vrijednosti
Plovni put s omjerom pokosa manjim od 1:3			
Brzina broda veća od 3 čv	0,6 *B*	0,1 *B*	0,7 *B*
Brzina broda između 2-3 čv	0,4 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*
Brzina broda manja od 2 čv	0,2 *B*	0,1 *B*	0,3 *B*
Plovni put s omjerom pokosa 1:2 i manjim (čvrstih strukturama)			
Brzina broda veća od 3 čv	1,2 *B*	0,2 *B*	1,4 *B*
Brzina broda između 2-3 čv	0,8 *B*	0,2 *B*	1,0 *B*
Brzina broda manja od 2 čv	0,4 *B*	0,2 *B*	0,6 *B*

Preporuke MLIT-a[175] koje se odnose na međudjelovanje između broda i obale daju minimalnu udaljenost plovidbe broda od ruba plovnog puta na kojoj sila međudjelovanja ne djeluje značajnije na brod. Vrijednosti su prikazane tabelarno u metrima, a ulazne vrijednosti su vrsta i dimenzije broda. Dodatna širina plovnog puta potrebna zbog utjecaja sile međudjelovanja dana je kao vrijednost udaljenosti broda od obale i odnosa udaljenosti i širine broda. Također je potrebno naglasiti da su vrijednosti dane za plovni put okomitog ruba. Rezultati su prikazani u tablici 49.

Tablica 49: Vrijednosti dodatne širine plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja između trupa broda i ruba plovnog puta prema MLIT-u

Vrsta broda	Duljina broda preko svega *Lpp* (m)	Širina broda *B* (m)	Udaljenost broda od ruba plovnog puta (m)	Omjer udaljenosti broda od ruba plovnog puta i širine broda
Brod za prijevoz generalnog tereta	103	20	17,40	0,87
Manji teretni brod	60,40	15	9,80	0,87
Brod za prijevoz kontejnera (Postpanamax)	283,80	40	55,50	1,39
Brod za prijevoz kontejnera (Panamax)	273	32,2	55,20	1,71
Brod za prijevoz rasutog tereta (Postpanamax)	279	45	52,60	1,17
Brod za prijevoz rasutog tereta (Panamax)	216	32,30	41,90	1,3

[175]Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2009) Japan: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*.

Vrsta broda	Duljina broda preko svega *Lpp* (m)	Širina broda *B* (m)	Udaljenost broda od ruba plovnog puta (m)	Omjer udaljenosti broda od ruba plovnog puta i širine broda
Brod za prijevoz rasutog tereta (Handysize)	119,20	215	20,30	0,95
Tanker (VLCC)	316	60	49,70	0,83
Brod za prijevoz automobila	190	32,20	34,30	1,06
Brod za prijevoz automobila	180	32,20	31,20	0,97
Brod za prijevoz ukapljenih plinova (LNG)	270	44,80	47,70	1,07
Brod za prijevoz hlađenog tereta	144	23,50	26,60	1,13
Putnički brod	160	24,70	25,90	1,05
Trajekt	181	29,40	30,50	1,04

Za usporedbu s opisanim preporukama odabrana su dva broda, brod punije i finije forme slične nosivosti. Podatci o brodovima su prikazani u tablici 50.

Tablica 50: Podatci o brodovima korištenih u usporedbi podataka

	Brod punije forme	Brod finije forme
Deplasman	148230 t	135000 t
Duljina preko svega	270 m	353 m
Širina	46,5 m	43,5 m
Gaz	16 m	14,5 m
Koeficijent punoće deplasmana	0,80	0,70

Vrijednosti dodatne širine, u tablicama i grafikonima, dobivene su modelom i ranije opisanim preporukama. Modelom je određeno najveće poprečno kretanje broda za različite brzine, oblike pokosa, udaljenosti broda od ruba plovnog puta i dubine plovnog puta.

Preporuke, za razliku od modela, ne razlikuju udaljenost broda od ruba plovnog puta. Kod projektiranja novog plovnog puta dodatna širina koju valja uzeti u obzir zbog međudjelovanja broda i obale proračunava se posljednja, te se za preostalu udaljenost ruba plovnog puta od obale može utvrditi da je dostatna ili će se utvrditi da je potrebno dodatno jaružanje.

Kod postojećeg plovnog puta, podatci se mogu koristiti za povećanje kapaciteta plovnog puta, na način da se na temelju brzine broda i udaljenosti ruba plovnog puta od obale, može korigirati ili širina plovnog puta ili brzina plovidbe. Rezultati su prikazani u tablici 51 za model broda punije forme i tablici 52 za model broda finije forme. Rezultati predstavljaju omjer potrebne udaljenosti od obale i širine broda (*d/B*).

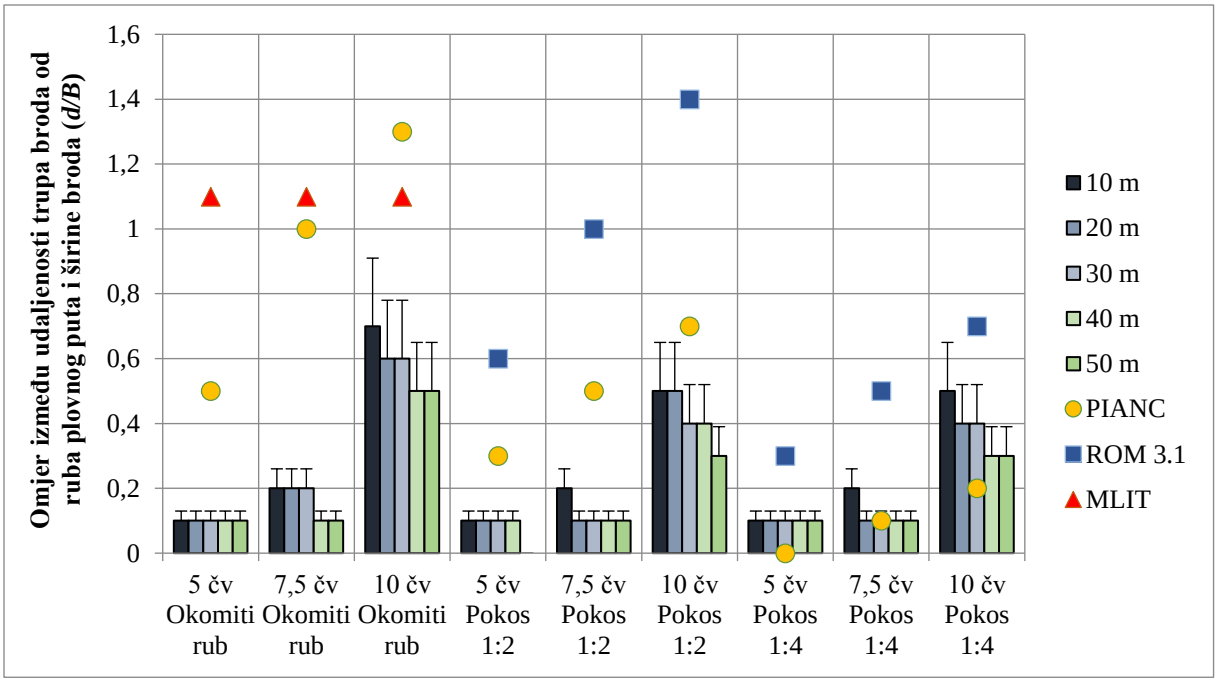
Tablica 51: Vrijednosti dodatne širine plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja između trupa broda i ruba plovnog puta za brod punije forme dobivene modelom i preporukama

Potrebna širina plovnog puta u slučaju preporučene akcije kormilom														
		***h/T*= 1,2T**					***h/T*= 1,5T**							
Brzina (čv)	**Pokos**	**10 m**	**20 m**	**30m**	**40m**	**50m**	**10 m**	**20 m**	**30m**	**40m**	**50m**	**PIANC**	**ROM 3.1**	**MLIT**
5	**Okomiti rub**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*		1,1 *B*
7,5		0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	1,0 *B*		
10		0,7 *B*	0,6 *B*	0,6 *B*	0,5 *B*	0,5 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	1,3 *B*		
5	**1:2**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,0 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,0 *B*	0,3 *B*	0,6 *B*	
7,5		0,2 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*	1,0 *B*	
10		0,5 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,2 *B*	0,7 *B*	1,4 *B*	
5	**1:4**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,0 *B*	0,0 *B*	0,0 *B*	0,3 *B*	
7,5		0,2 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,2 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*	
10		0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,7 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,7 *B*	
Potrebna širina plovnog puta u slučaju nepreporučene akcije kormilom														
		***h/T*= 1,2T**					***h/T*= 1,5T**							
Brzina (čv)	**Pokos**	**10 m**	**20 m**	**30m**	**40m**	**50m**	**10 m**	**20 m**	**30m**	**40m**	**50m**	**PIANC**	**ROM 3.1**	**MLIT**
5	**Okomiti rub**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*		1,1 *B*
7,5		0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	1,0 *B*		
10		0,9 *B*	0,8 *B*	0,8 *B*	0,7 *B*	0,7 *B*	0,7 *B*	0,5 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	1,3 *B*		
5	**1:2**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0 *B*	0,3 *B*	0,6 *B*	
7,5		0,3 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*	1,0 *B*	
10		0,7 *B*	0,7 *B*	0,5 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,7 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,7 *B*	1,4 *B*	
5	**1:4**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0 *B*	0 *B*	0,0 *B*	0,3 *B*	
7,5		0,3 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*	
10		0,7 *B*	0,5 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,9 *B*	0,7 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,2 *B*	0,7 *B*	

Tablica 52: Vrijednosti dodatne širine plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja između trupa broda i ruba plovnog puta za brod finije forme dobivene modelom i preporukama

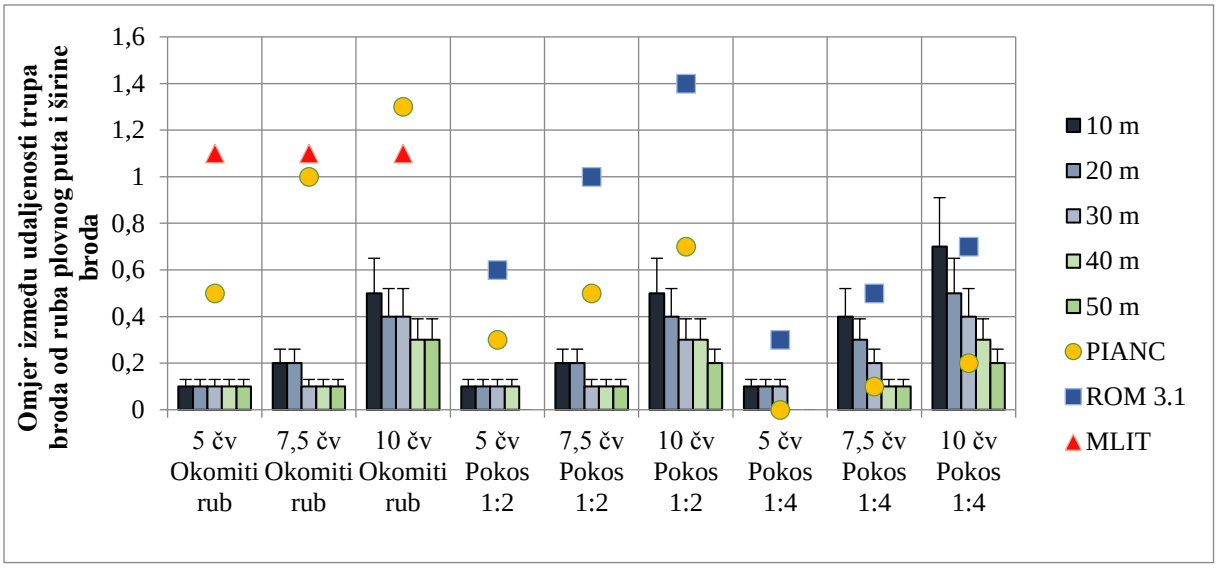
Potrebna širina plovnog puta u slučaju preporučene akcije kormilom														
		***h/T*= 1,2T**					***h/T*= 1,5T**							
Brzina (čv)	**Pokos**	**10 m**	**20 m**	**30m**	**40m**	**50m**	**10 m**	**20 m**	**30m**	**40m**	**50m**	**PIANC**	**ROM 3.1**	**MLIT**
5	**Okomiti rub**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*		1,1 *B*
7,5		0,4 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	1,0 *B*		
10		0,6 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	1,3 *B*		
5	**1:2**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,0 *B*	0,0 *B*	0,0 *B*	0,3 *B*	0,6 *B*	
7,5		0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*	1,0 *B*	
10		0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,1 *B*	0,7 *B*	1,4 *B*	
5	**1:4**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,0 *B*	0,0 *B*	0,0 *B*	0,0 *B*	0,3 *B*	
7,5		0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*	
10		0,4 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,4 *B*	0,3 *B*	0,3 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,7 *B*	
Potrebna širina plovnog puta u slučaju nepreporučene akcije kormilom														
		***h/T*= 1,2T**					***h/T*= 1,5T**							
Brzina (čv)	**Pokos**	**10 m**	**20 m**	**30m**	**40m**	**50m**	**10 m**	**20 m**	**30m**	**40m**	**50m**	**PIANC**	**ROM 3.1**	**MLIT**
5	**Okomiti rub**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*		1,1 *B*
7,5		0,5 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	1,0 *B*		
10		0,7 *B*	0,6 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,5 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	1,3 *B*		
5	**1:2**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0 *B*	0 *B*	0 *B*	0,3 *B*	0,6 *B*	
7,5		0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*	1,0 *B*	
10		0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,1 *B*	0,7 *B*	1,4 *B*	
5	**1:4**	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0,1 *B*	0 *B*	0 *B*	0 *B*	0,0 *B*	0,3 *B*	
7,5		0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,1 *B*	0,5 *B*	
10		0,5 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,5 *B*	0,4 *B*	0,4 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,2 *B*	0,7 *B*	

Podatci iz tablice 51, potrebna dodatna širina za model broda punije forme, prikazani su u grafikonu 22 za odnos dubine vode i gaza *h/T* = 1,2 i u grafikonu 23 za *h/T* = 1,5. Vrijednosti u grafikonu prikazuju najmanju potrebnu dodatnu širinu plovnog puta zbog međudjelovanja između trupa broda i ruba plovnog puta u slučaju da se poduzme pravilna akcija s kormilom. U slučaju nepreporučene akcije s kormilom, preporučenu najmanju dodatnu širinu je potrebno uvećati, što je prikazano crnim linijama na vrijednost potrebne dodatne širine.



Grafikon 22: Usporedba vrijednosti o potrebnoj dodatnoj širini plovnog puta za brod punije forme i za odnos dubine vode i gaza broda *h/T* = 1,2

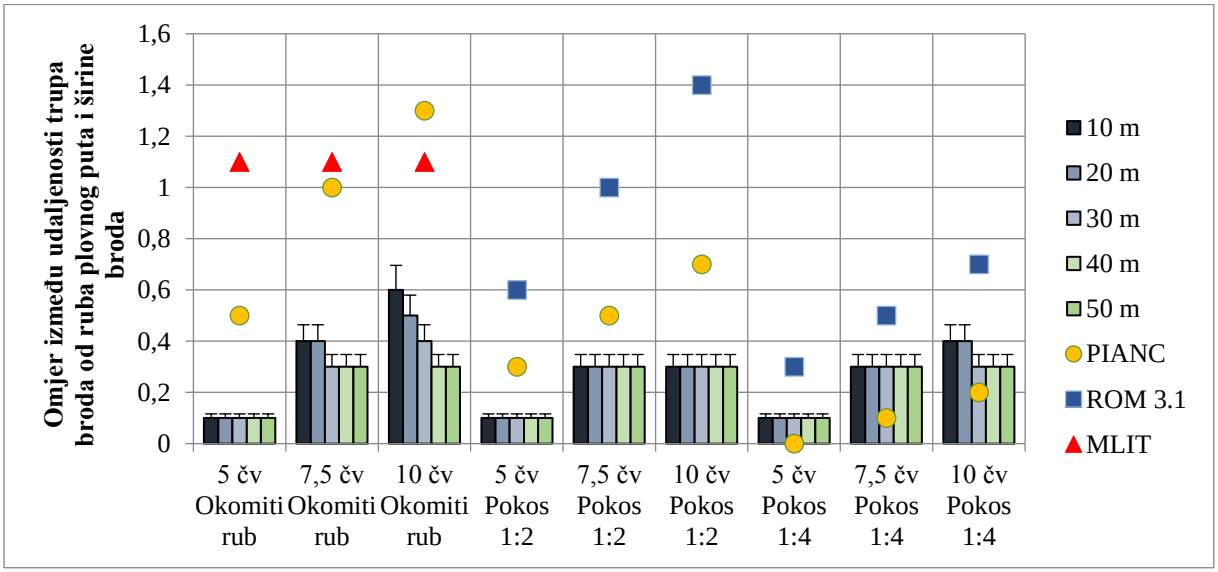
Analizom dobivenih podataka uviđa se da općenito s udaljenosti trajektorije plovidbe broda od ruba plovnog puta pada i potrebna dodatna širina. Također, uočava se da za brzine plovidbe od 5 i 7,5 čvorova s povećanjem omjera visine i duljine pokosa dolazi i do pada potrebne dodatne širine, što potvrđuju podatci o silama koje djeluju na brod. Međutim, kod brzine od 10 čvorova ne dolazi do znatnijeg pada potrebne širine s povećanjem omjera visine i duljine pokosa. To su pokazali i podatci sila, kojim se također kod brzine od 10 čvorova ne smanjuju širine s povećanjem omjera visine i duljine pokosa, što potvrđuje činjenica da brod koji plovi iznad pokosa zbog smanjenog presjeka *S* i dalje stvara znatne sile međudjelovanja koje u ovom slučaju djeluju na način da privlače brod prema obali. Ako se modelirani podatci usporede s podatcima iz preporuka, kod svih oblika pokosa plovnog puta primjećuje se znatna razlika. Do odstupanja dolazi iz razloga što su podatci iz preporuka općeniti i u sebi imaju uključen znatniji faktor sigurnosti, te se temelje na ranijim istraživanjima i podatcima prema kojima se najveća sila međudjelovanja javlja kod plovnog puta okomitog ruba i pada s povećanjem omjera visine i duljine pokosa. Kod podataka ROM-a, koji inkorporiraju novija istraživanja, ne dolazi do znatnijeg odstupanja, te za plovne putove s većim omjerom visine i duljine pokosa potvrđuju podatke modela za plovni put s omjerom visine i duljine pokosa 1:4.



Grafikon 23: Usporedba vrijednosti o dodatnoj širini plovnog puta za brod punije forme i za odnos dubine vode i gaza broda *h/T* = 1,5

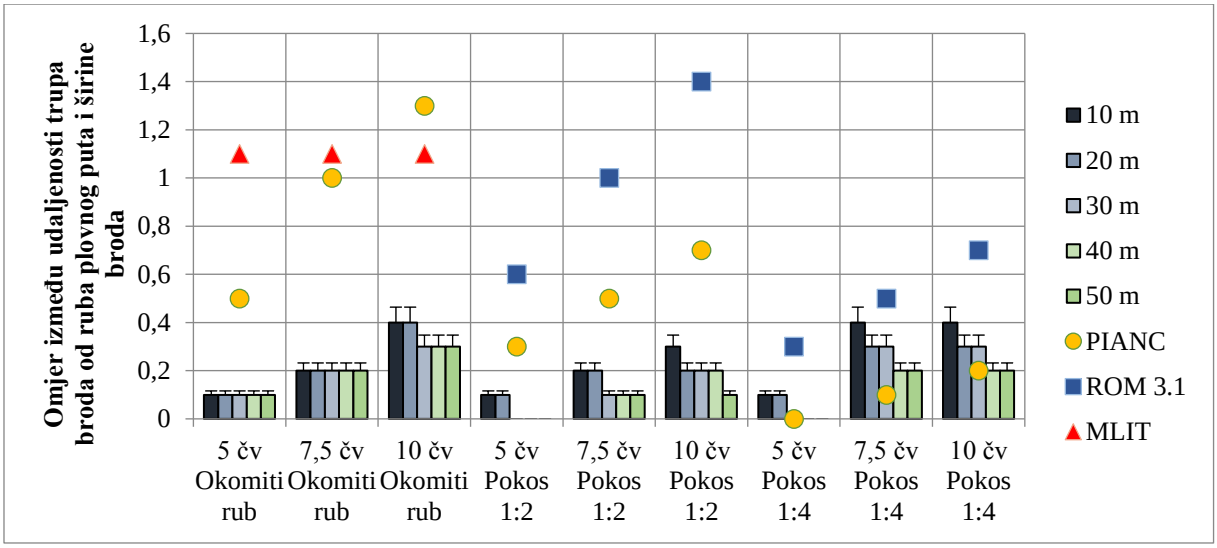
U slučaju da je omjer dubine plovnog puta i gaza broda *h/T* = 1,5, primjećuje se da s povećanjem omjera visine i duljine pokosa dolazi do porasta potrebne dodatne širine plovnog puta zbog utjecaja sile međudjelovanja. Analizirajući podatke dobivene simulacijama i ostalim istraživanjima, uviđa se da porastom preostale dubine ispod kobilice sila koja je kod manjeg odnosa dubine i gaza broda bila pozitivna i udaljava brod od obale, dobiva negativan predznak, te znatnije privlači brod k obali. Iz tog razloga povećanjem omjera visine i duljine pokosa model predviđa veću dodatnu širinu zbog utjecaja sile međudjelovanja. I ovdje je vidljiva znatna razlika između preporuka dodatne širine zbog utjecaja sile međudjelovanja trupa broda i obale te modeliranih vrijednosti.

Podatci iz tablice 52, potrebna dodatna širina za model broda finije forme, prikazani su u grafikonu 24 za odnos dubine vode i gaza *h/T* = 1,2 i u grafikonu 25 za *h/T* = 1,5, gdje crne linije predstavljaju uvećanje širine u slučaju nepreporučene akcije kormilom.



Grafikon 24: Usporedba vrijednosti o dodatnoj širini plovnog puta za brod finije formi za odnos dubine vode i gaza broda *h/T* = 1,2

Brodovima finije forme, zbog bolje stabilnosti održavanja kursa, općenito je potrebna manja dodatna širina zbog sile međudjelovanja broda i obale u odnosu na brodove punije forme. Također, može se zamijetiti da povećanjem omjera visine i duljine pokosa ne dolazi do značajnije promjene potrebne dodatne širine plovnog puta. Kako je već ranije navedeno, zanos broda koji kod okomitog ruba plovnog puta i oblika pokosa omjerom 1:2 djeluje na način da udaljava brod od obale, a pri obliku pokosa omjera 1:4 djeluje na način privlačenja broda prema obali.



Grafikon 25: Usporedba vrijednosti o dodatnoj širini plovnog puta za brod punije forme i za odnos dubine vode i gaza broda *h/T* = 1,5

U slučaju da je omjer dubine vode i gaza broda *h/T* = 1,5 općenito je potrebna manja dodatna širina plovnog puta. I u ovome slučaju, zbog ranije opisanog djelovanja, povećanjem omjera visine i duljine pokosa dolazi do porasta sile i potrebne širine plovnog puta. U oba slučaja, preporuke daju znatno veću potrebnu dodatnu širinu od podataka dobivenih predloženim modelom.

Analizirajući navedeno može se zaključiti da su preporuke vrlo općenite i ne uzimaju u obzir dovoljan broj faktora koji djeluju na veličinu sile međudjelovanja broda i obale. Na taj način u nekim slučajevima može se dobiti predimenzioniran plovni put zadovoljavajuće razine sigurnosti plovidbe, međutim u nekim slučajevima može se dobiti plovni put koji svojom širinom ne udovoljava zahtijevanoj razini sigurnosti plovidbe.

Također, predloženi model predstavlja najmanju potrebnu dodatnu širinu zbog utjecaja sila međudjelovanja između trupa broda i obale te ne uključuje dodatan faktor sigurnosti definiran u skladu s metodama procjene rizika. Prvi korak procesa izračuna dodatnog faktora sigurnosti u ovom radu je prikazan kroz akcije s kormilom. Međutim, dodatni faktor sigurnosti uključuje niz ulaznih podataka koji utječu na sigurnost plovidbe, a način njihovog određivanja je u skladu s ranije predloženim metodama procjene rizika.

Dodatni čimbenici koji bi se mogli uzeti u obzir pri procjeni rizika su vrsta obale pokosa (npr. kamenita, muljevita, pješčana, …), vrsta broda i vrsta tereta koju prevozi, gustoća prometa, postoji li na rubu plovnog puta infrastruktura, ekološka osjetljivost područja, vremenski uvjeti koji prevladavaju na plovnom putu, te ostali relevantni uvjeti koji mogu utjecati na sigurnost plovidbe.

6. ZAKLJUČAK

Ovom doktorskom disertacijom sustavno su sagledani svi čimbenici koji utječu na međudjelovanje broda i obale, a analizom njihovih utjecaja te temeljem spoznaja i utjecaja na trajektoriju broda, definiran je model određivanja dodatne širine plovnog puta.

U radu je utvrđena međuzavisnost između svih čimbenika koji djeluju na veličinu sile međudjelovanja i posljedično na trajektoriju broda. Sustavnom prosudbom postupka utvrđivanja dimenzija plovnog puta, a posebno širine, sagledana je potpuna slika i djelovanje pojedinih čimbenika. Također, analizirani su i dinamički utjecaji na brod koje je kao i ostale navedene čimbenike, potrebno uzeti u obzir sa stajališta sigurnosti plovidbe prilikom analize plovnog puta, bilo novog ili postojećeg.

Utvrđeni i opisani čimbenici omogućuju definiranje modela dodatne širine plovnog puta sa stajališta sigurnosti plovidbe. Korištenjem podataka dobivenih navigacijskim simulatorom, koji ima provjerene matematičke i hidrodinamičke modele, moguće je utvrditi međuzavisnosti pojedinih čimbenika i izraditi vjerodostojan model. Metode simulacije su omogućile simuliranje različitih utjecajnih čimbenika na plovnim putovima, a time i širok spektar mogućih situacija na plovnim putovima.

Model je zbog funkcionalnosti i točnosti te s obzirom na utjecajne čimbenike i utvrđene međuovisnosti, podijeljen s obzirom na formu brodova i oblike plovnih putova. Temeljem rezultata modela moguće je točnije predvidjeti potrebnu dodatnu širinu plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sila međudjelovanja broda i obale, u odnosu na dosadašnje preporuke i determinističke metode izračuna. Rezultati modela mogu se sa stajališta sigurnosti plovidbe koristiti kod novog plovnog puta za definiranje potrebne dodatne širine. Kod postojećih plovnih putova u eksploataciji, osim sigurnosti plovidbe, moguće je utjecati i na organizaciju plovidbe određenim plovnim putom. Općenito, ovim pristupom može se uvelike utjecati na tehničke i ekonomske aspekte iskoristivosti plovnog puta, a da se pritom zadovolje minimalnim zahtjevi sigurnosti plovidbe.

Predloženi pristup omogućuje brzu i sigurnu procjenu dodatne širine plovnog puta, bez potrebe izrade simulacija plovidbe, što iziskuje dodatno vrijeme i financije izdatke. Opisana metodologija određivanja dimenzija plovnog puta, preporučena od strane međunarodno priznatih organizacija, omogućuje odabir najefikasnijih dijelova opisanih metoda u kombinaciji s predloženim modelom koji udovoljavaju zahtjevima sigurnosti plovidbe, ali i ekonomičnosti.

Valja također naglasiti da prikazani rezultati vrijede za simulirane uvjete plovidbe i korištene modele brodova. Daljnja istraživanja, trebala bi uključiti ostale vrste brodova, oblike plovnih putova, što u konačnici omogućuje točnije definiranje dimenzija plovnih puta. Također, razvoj na polju matematičkih i hidrodinamičkih modela koje koriste navigacijski simulatori omogućuje dobivanje vjerodostojnijih podataka. Ovaj način istraživanja, za razliku od istraživanja u bazenima, omogućuje brže i isplativije dobivanje velikog broja seta podataka te konačno definiranje točnijeg modela, a sve s ciljem udovoljavanja zahtjevima za povećanje razine sigurnosti plovidbe. Uključivanjem većeg broda modela brodova, punije i finije linije, povećava se točnost predloženog modela te unaprjeđuje primjenjivosti predloženog modela. Osim uključivanja analize dodatnih modela brodova, dodatna istraživanja moguće je provesti i za različite oblike plovnih putova te za različite scenarije plovidbe. Osim unaprjeđenja predloženog modela koristeći simulator, posljednji korak bi uključivao potvrdu provedenog

istraživanja koristeći modele brodova u bazenima. S time bi se potvrdila valjanost dobivenih podataka i primjenjivost modela, te nepobitno dokazala uporabljivost modela u praksi.

Rezultati istraživanja predstavljaju znanstveni doprinos problemu definiranja dodatne širine ograničenih plovnih putova te općenito metodologiji definiranja dimenzija ograničenih plovnih putova sa stajališta sigurnosti plovidbe, uključujući aspekte projektiranja i eksploatacije.

LITERATURA

Akakura, Y., & Takahashi, H. (1998): Ship dimensions of design ship under given confidence limits. Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan.

Atkinson, E., O'Brien, P. (2008): DUKC in Channel Design, 6th IHMA Conference, St. Petersburg, Russia.

Barrass, C.B. (1979): A Unified Approach to Squat Calculations for Ships. PIANC Bulletin 32:3-10.

Barrass, C.B. (1979): A Unified Approach to Squat Calculations for Ships. PIANC Bulletin 32:3-10.

Barrass, C.B. (1994a): Further Discussion on Squat., Seaways, March, str. 4-6.7.

Barrass, C.B. (1994b): Change of Trim as a Ship Squats, Seaways, October, str. 30-32.

Barrass, C.B. (2002): Ship Squat – A Guide for Masters, Private report, www.ship-squat.com.

Barrass, C.B. (2004), Ship Design and Performance for Masters and Mates, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford.

Barrass, C.B. (2004): Thirty-Two Years of Research into Ship Squat, Squat Workshop 2004, Elsfleth/Oldenburg.

Barrass, C.B. (2009): Ship Squat and Interaction, Whitersby Publishing & Seamanship, Livingston.

Bijker, A. B., & Massie, W. W. (1978): Coastal Engineering, Vol II, Chapter 4: Channel Depth, Coastal Engineering Group.

Briggs, et al. (2013): Validation of a Risk-Based Numerical Model for Predicting Deep-Draft Underkeel Clearance, ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 139, No. 4, July 1, 2013, str. 267-276.

Briggs, M.J., Silver, A. L., Borgman, L. E. (2006): Risk-Based Predictions for Ship Underkeel Clearance, ICCE 2006, San Diego.

Briggs, M.J., Silver, A.L., Kopp, P.J. (2012): Chapter 6: Risk-Based Channel Depth Design using CADET, Series on Coastal and Ocean Engineering Practice – Vol. 1 (Editor: Y.C. Kim), World Scientific Publishing Company, Singapore, str. 319-366.

Briggs, Michael J., Leon E. Borgman, and Eivind Bratteland (2003): Probability assessment for deep-draft navigation channel design, Coastal engineering 48. str. 29-50.

Bukša, J., & Zec, D. (2005). Model procjene pomorskih rizika u ograničenom plovnom području. Pomorstvo: Scientific Journal of Maritime Research, 19(1), str. 173-193.

Bunnik, T., & Veldman, A. (2010). Modelling the effect of sloshing on ship motions. 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, str. 279-286.

Crane, C. L. (1979). Maneuvering Trials of 278 000 DWT Tanker in Shallow and Deep Waters. SNAME Transactions, 87, str. 251-283

Dand, I. W. (1981): On ship-bank interaction. The Transactions of the Royal Institution of Naval Architects: International Journal of Maritime Engineering, Vol. 124, str. 25–40.

Dand, I.W., Lyon, P.R. (1993): The Element of Risk in Approach Channel Design. Int.

Eloot, K., & Vantorre, M. (2011). Ship behaviour in shallow and confined water: an overview of hydrodynamic effects through EFD, RTO-AVT Specialists' meeting on Assessment of Stability and Control Prediction Methods for Air and Sea Vehicle, Portsdown.

Eloot, K., Verwilligen, J., Vantorre, M. (2008): An Overview of Squat Measurements for Container Ships in Restricted Water. In: International conference on Safety and Operations in Canals and Waterways, Glasgow, University of Strathclyde Glasgow and University of Glasgow, str. 106-116.

Ericson, C. A. (2005). Event tree analysis. Hazard Analysis Techniques for System Safety, str. 223-234

Erneux, T. (2009), Applied Delay Differential Equations: Surveys and Tutorials in the Applied Mathematical Sciences, Springer, New York.

Eryuzlu, N. E., and R. Hausser. (1978). Experimental investigation into some aspects of large vessel navigation in restricted waterways. Proceedings of the Symposium of Aspects of Navigability of Constraint Waterways Including Harbour Entrances, Vol 2, str. 1-15.

Eryuzlu, N.E., Cao, Y.L., D`agnolo, F. (1994):„Underkeel Requirements for Large Vessels in Shallow Water. Proceedings 28th International Navigation Congress, PIANC, Paper S II-2, Sevilla, Spain, str. 17-25.

European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2015.

Faltinsen, O. (1993). Sea loads on ships and offshore structures (Vol. 1). Cambridge University Press.

Groenveld, R. (2001): Lecture Notes, Delft University of Technology, Service Systems in Ports and Inland Waterways , Delft.

Groenveld, R. (2006). Ship Traffic Simulation Study Port Extension Maasvlakte 2 of the Port of Rotterdam. PIANC Congress 2006, Estoril.

Gucma, L., & Schoeneich, M. (2008). Probabilistic model of underkeel clearance in decision making process of port captain. TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2(2).

Guliev, U.M. (1971): On Squat Calculations for Vessels Going in Shallow Water and Trought Channels. PIANC Bulletin 1(7), str. 17-20.

Harbour approach channels design guidelines, PIANC, Report No. 121-2014.

Härting, A. Laupichler, A., Reinking, J. (2009): Considerations on the Squat of Unevenly Trimmed Ships, Ocean Engineering, Elsevier, 36, str. 193-201.

Hooft, J. P. 1974. The Behaviour of a ship in head waves at restricted water depth. International Shipbuilding Progress, 244(21); str. 367.

Huang, Y. (1997). Nonlinear ship motions by a Rankine panel method (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

ICORELS (International Commission for the Reception of Large Ships). (1980). Report of Working Group IV, PIANC Bulletin No. 35, Supplement.

IMO Resolution A.1045(27), Pilot transfer arrangements, 30. November 2011.

IMO Resolution A.960(23), Recommendations on training and certification and on operational precedures for maritime pilots other than deep-sea pilots, 05. December 2003.

IMO, Formal Safety Assessment, MSC 83/INF.2, 2007.

International Chamber of Shipping (2008), ICS Guide to helicopter/ship operations, 4th edition.

Kobylinski, L. K. (2011). Capabilities of ship handling simulators to simulate shallow water, bank and canal effects. TransNav-International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation", str. 247-252.

Lackenby, H. (1963). Note on the effect of shallow water on ship resistance. BSRA Report No. 377.

Lackenby, H. (1963). The effect of shallow water on ship speed. Shipbuilder and Marine Engine Builder. Vol. 70.

Landweber, L. (1939). Tests on a model in restricted channels. EMB Report 460.

Lataire, Evert, et al. (2007). Navigation in confined waters: influence of bank characteristics on ship-bank interaction. International Conference on Marine Research and Transportation, ICMRT.

Lo, D. C., Su, D. T., & Chen, J. M. (2009). Application of computational fluid dynamics simulations to the analysis of bank effects in restricted waters. Journal of Navigation, 62(03), str. 477-491.

Lloyd's Register Fairplay Data (2006) Lloyd's Register Fairplay Ltd., September.

Maimun, A., et al. (2013). „A mathematical model on manoeuvrability of a LNG tanker in vicinity of bank in restricted water." Safety Science, 53, str. 34-44.

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), Japan (2009): Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, OCDI.

Mohović, Đ. (2010). Ocjena prihvatljivosti pomorskih plovidbenih rizika, Doktorska disertacija, Pomorski fakultet, Sveučilište u Rijeci.

Mohović, Đ. (2011). Upravljanje rizikom u pomorstvu, Autorizirana predavanja, Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci.

Mohovic, D., Mohovic, R., & Baric, M. (2016). Deficiencies in Learning COLREGs and New Teaching Methodology for Nautical Engineering Students and Seafarers in Lifelong Learning Programs. Journal of Navigation, 69(04), str. 765-776.

Mohović, R. (2002), Model manevriranja brodom u ograničenim plovnim područjima u funkciji sigurnosti i zaštite morskog okoliša, Doktorska disertacija, Pomorski fakultet, Sveučilište u Rijeci.

Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). Ship resistance and propulsion: practical estimation of propulsive power. Cambridge university press.

MSC/Circ. 1023, MEPC/Circ. 392, Guidlines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process, IMO, 04/2002.

Newman, J. N. (1977). Marine hydrodynamics. MIT press.

O'Brien, W.T., O'Brien, P., Hens, C. (2012): Use of Web-Based Decision Support Technology for In-Transit Under Keel Clearance Management, 8th IHMA Conference, Cork.

Ohtsu, K., Yoshimura, Y., Hirano, M., Tsugane, M., Takahashi, H. (2006): Design Standards for Fairway in Next Generation. Asia Navigation Conference 2006, No. 26.

Orović, J. (2012). The Optimisation of Propulsion Plants for Liquefied Natural Gas Carriers (Doctoral dissertation, Pomorski fakultet u Rijeci, Sveučilište u Rijeci).

Peckov, A. (2012). A Machine Learning Approach to Polynomial Regression (Doctoral dissertation, PhD thesis, Jozef Stefan International Postgraduate School, Ljubljana).

Perez, T., & Blanke, M. (2002). Simulation of ship motion in seaway. Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Newcastle, Australia, Tech. Rep. EE02037.

PIANC, A. C. (1997). A Guide for Design. Final Report of the Joint PIANCIAPH Working Group II-30 in cooperation with IMPA and IALA, Supplement to Bulletin, (95).

Port information guide, Rotterdam, October 2016.

Prpić-Oršić, J., & Čorić, V. (2006). Pomorstvenost plovnih objekata. Zigo, Rijeka.

Program *Matlab R2009b.*

Program *R – Rattle v.3.1.0.*

Puertos Del Estado (1999): Recommendations for Maritime Works (Spain) ROM 3.1-99: Designing Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Floatation Areas, Spain: CEDEX.

ROM (Puerto Del Estado) (2007): Recommendations for Designing the Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Harbour Basins. ROM 3.1-99. Spain: CEDEX.

Römisch, K. (1993): Der Squat in Begrenzten Fahrwassern Betrachtung aus Hydromechanischer Sicht. Schiff & Hafen / Seewirtschaft, Heft 10, str. 58-62.

Romisch, K. Fuhrer (1977): Section I – Inland Navigation, Subject 3. PIANC Congress, Leningrad, Russia, str. 80.

Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F., & Lorensen, W. E. (1991). Object-oriented modeling and design (Vol. 199, No. 1). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-hall.

Savenije, R. (1996): Probabilistic Admittance Policy Deep Draught Vessels. PIANC Bulletin 91, June.

Šešić, B. V. (1988). Osnove metodologije društvenih nauka.

Simulator Transas NTPro 5000 v5.35.

Stocks, D.T., Dagget, L.L., Page, Y. (2002): Maximization of the ship draft in the St. Lawrence Seaway Volume I; Squat Study. Prepared for Transportation Development Centre, Transport Canada.

Strating, J. et al. (1982). Optimization of depths of channels. Delft Hydraulics, Publ. No 278 and Int. Shipbuilding Progress, Vol. 30, No. 342, str. 45-56.

Sutulo, S., & Soares, C. G. (2008, January). Simulation of the hydrodynamic interaction forces in close-proximity manoeuvring. ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, str. 839-848.

Takahashi, H., Goto, A., Abe, M. (2006): "Study on Standards for Main Dimensions of the Design Ship". Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), No. 309, Japan.

Thoresen, C.A. (2003), Port Designer`s Handbook: Recommendations and Guidelines, Thomas Telford, London, str. 88.

Tsugane, M. (2009): A Statistic Analysis of G_0M and Other Values on Operation of Large Container Ships. Journal of Japan Institute of Navigation, No.120, Japan Institute of Navigation.

Tuck, E.O., Taylor, P.J. (1970): Shallow Water Problems in Ship Hydrodynamics, Proceedings 8th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena.

Tuck. E.O. (1966): Shallow Water Flows Past Slender Bodies. J. Fluid Mech., 26, str. 81-95

Uliczka, K., & Kondziella, B. (2006). Dynamic response of very large containerships in extremely shallow water. In Proceedings of the 31st PIANC Congress.

Van De Kaa, E.J. (1984): Safety Criteria for Channel Depth Design. Proc. Third Meeting of the U.S./Dutch M.O.U. on Dredging and Dredged Material Disposal, Working Group III: Navigation Channels, Charleston, SC.

Vantorre M., et al. (2008): Ship Motions in Shallow Water as the Base for a Probabilistic Approach Policy. Proceedings of the ASME International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2008, Estoril.

Vantorre, M., Delefortrie, G., Eloot, K., & Laforce, E. (2003). Experimental investigation of ship-bank interaction forces. In International Conference MARSIM.

Vantorre, M., Verzhbitskaya, E., & Laforce, E. (2002). Model test based formulations of ship-ship interaction forces. Ship Technology Research, 49, str. 124-141.

Vincoli, J. W. Fault Tree Analysis. Basic Guide to System Safety, Third Edition, str. 145-156

Vučinić, A. (1997), Hidrodinamika plovnih object (Otpor i propulzija broda), Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka.

Yamano, T., & Saito, Y. (1997). An estimation method of wind forces acting on ships. Journal-Kansai society of naval architects japan, str. 91-100.

Yoshimura, Y. (1986): Mathematical Model for the Manoeuvring Ship Motion in Shallow Water, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 200.

POPIS SLIKA

Slika 1: Određivanje općeg izgleda zavojitog dijela plovnog puta 11
Slika 2: Prikaz utjecaja upravljivosti broda na širinu osnovne plovidbene trake 12
Slika 3: Zanos broda pod lateralnim djelovanjem sile vjetra 15
Slika 4: Primjer dodatne dimenzije ograničenog plovnog puta različitog pokosa 16
Slika 5: Shema prilaznog plovnog puta i područja za okretanje brodova 18
Slika 6: Lazni krug broda usidrenog jednim sidrom na pramcu 21
Slika 7: Procedura zaustavljanja broda i dimenzije plovnog puta 24
Slika 8: Sile na privezani brod 26
Slika 9: Dijagram toka FSA metodologije 34
Slika 10: Koncept analize stabla pogrešaka 37
Slika 11: Koncept metode analize stabla događaja 37
Slika 12: Smanjenje rizika upotrebom ALARP principa 38
Slika 13: Prikaz djelovanja otpora trenja i sile tlakova na trup broda u plovidbi 40
Slika 14: Uzorak valova ispod i iznad kritične brzine broda 41
Slika 15: Raščlamba elemenata sigurne dubine pri projektiranju novog plovnog puta 48
Slika 16: Raščlamba elemenata sigurne dubine postojećeg plovnog puta u eksploataciji 49
Slika 17: Primjer ulaza i izlaska iz luke za vrijeme visoke vode 50
Slika 18: Presjeci dvaju osnovnih vrsta ograničenih plovnih putova 53
Slika 19: Trigonometrijsko određivanje dodatnog urona broda zbog utjecaja nagiba 57
Slika 20: Šest stupnjeva slobode gibanja broda 57
Slika 21: Pretpostavljeno vertikalno kretanje pramca i boka broda na valovima 59
Slika 22: Odnos amplitude vala i vertikalnog kretanja broda (kod poniranja) 60
Slika 23: Prikaz određivanja potrebne dubine plovnog puta projektnog tipa broda koristeći smjer, visinu i period signifikantnih valova 61
Slika 24: Uobičajeni raspored kritičnih točaka na trupu broda 64
Slika 25: Dodatna širina plovnog puta zbog djelovanja sile vjetra i valova 82
Slika 26: Vizualno određivanje zanosa broda 85
Slika 27: Dva tipa geometrije zavojitog dijela plovnog puta 91
Slika 28: Poprečni presjek pokosa plovnog puta 94
Slika 29: Primjer trajektorije broda u slučaju kad je pokos ruba plovnog puta 1:4, udaljenost od izobate nasukanja 10 metara te kormilo u sredini, (a) brod punije forme, (b) brod finije forme 100
Slika 30: Pomak broda uslijed sile međudjelovanja broda i ruba plovnog puta kod različitog pokosa 102
Slika 31: Dijagram korelacije (Pearson) parametara dobivenih simulacijama (lijevo) i parametara uzetih u obzir kod izrade modela zanosa (desno) za zaošijanje brodova punije forme 108
Slika 32: Odnos poprečnog presjeka plovnog puta s pokosom omjera visine i duljine 1:4 i okomitog plovnog puta iste dubine i 110
Slika 33: Dijagram korelacije (Pearson) parametara dobivenih simulacijama (lijevo) i parametara uzetih u obzir kod izrade modela zanosa (desno) za zaošijanje brodova finije forme 112

POPIS TABLICA

Tablica 1: Preporučene brzine broda u pojedinim područjima plovidbe i manevriranja 14
Tablica 2: Granične vrijednosti kuta zanosa broda na ograničenom plovnom putu 16
Tablica 3: Određivanje vremena čekanja brodova prikazano kroz prosječno vrijeme korištenja elementa plovnog puta po sustavu M/D/1 18
Tablica 4: Određivanje vremena čekanja brodova prikazano kroz prosječno vrijeme korištenja elementa plovnog puta po sustavu M/M/1 19
Tablica 5: Određivanje vremena čekanja brodova prikazano kroz prosječno vrijeme korištenja elementa plovnog puta po sustavu M/E2/1 19
Tablica 6: Preporuke graničnih uvjeta za sidrišta 20
Tablica 7: Primjeri graničnih uvjeta za peljarske brodice 22
Tablica 8: Granični uvjeti za helikopterske operacije ukrcaja peljara u luci Rotterdam 23
Tablica 9: Preporučeni granični uvjeti na mjestu priveza 29
Tablica 10: Preporučeni granični uvjeti područja za privez brodova 30
Tablica 11: Statistika nezgoda prema tipu nezgoda u razdoblju od 2011. do 2014. godine 31
Tablica 12: Raspodjela nezgoda prema lokaciji u razdoblju od 2011. do 2014. godine 31
Tablica 13: Vrednovanje posljedice događaja za četiri promatrane kategorije utjecaja 39
Tablica 14: Matrica procjene rizika 39
Tablica 15: Autori empirijskih izraza predloženih za izračun dodatnog zagažaja na temelju konfiguracije plovnog puta prema PIANC-u 54
Tablica 16: Vrijednosti K_R za plitku vodu za odnos h/T = 1,2 56
Tablica 17: Ulazni podatci za detaljno određivanje kretanja broda na valovima 61
Tablica 18: Koeficijent transformacije valova C_2 za poluprobabilističku metodu 63
Tablica 19: Koeficijent od C_3 do C_6 za poluprobabilističku metodu (ROM 3.1-99) 63
Tablica 20: Koeficijenti za određivanje frontalne i lateralne površine brodova izloženih djelovanju vjetra izračunati na temelju 95 % signifikantnosti podataka brodova 66
Tablica 21: C_{Yn}j empirijski koeficijenti za lateralnu silu vjetra 67
Tablica 22: Broj godina eksploatacije plovnog puta (N_{ye}) povezanih s razinom rizika 70
Tablica 23: Širina osnovne plovidbene trake, W_{BM} 73
Tablica 24: Dodatna širina plovnog puta prema PIANC-u 74
Tablica 25: Dodatna širina plovnog puta zbog sila međudjelovanja između broda i obale 75
Tablica 26: Koeficijent sile vjetra Cv koji djeluje na trup broda 76
Tablica 27: Preporuka brzine broda preko dna za različita područja plovidbe 77
Tablica 28: Koeficijent sile valova C_{val} koji djeluju na trup broda 78
Tablica 29: Koeficijent sile tegljača Cr koji djeluje na brod 79
Tablica 30: Dodatna širina plovnog puta zbog pogreške određivanja pozicije broda b_e 79
Tablica 31: Najveći prihvatljivi rizik E_{max} 80
Tablica 32: Određivanje dodatne širine plovnog puta zbog vremena reakcije na temelju manevarskih karakteristika broda 80
Tablica 33: Preporučene dodatne širine plovnog puta zbog sile međudjelovanja između broda i obale 81
Tablica 34: Kut zanosa β_1 i odgovarajući kut otklona kormila da bi se kompenzirao utjecaj zanosa δ_1 uslijed djelovanja sile vjetra 83
Tablica 35: Tablica za procjenu razine rizika 86
Tablica 36: Tablica predloženih rezultata procjene razine rizika koji se koristi za o dređivanje faktora sigurnosti C_{FS} 86

Tablica 37: Dodatna širina mimoilaženja brodova W_p 87
Tablica 38: Preporučene minimalne udaljenosti između plovidbenih traka kod dvosmjerne plovidbe 88
Tablica 39: Udaljenost mimoilaženja između brodova W_c 89
Tablica 40: Dodatna širina plovnog puta zbog vremena reakcije na temelju manevarskih karakteristika broda 91
Tablica 41: Referentni modeli brodova korištenih u simulacijama 94
Tablica 42: Preporuke prema MLIT-u za projektiranje luka i plovnih putova, određivanje najmanje udaljenosti plovidbe broda od ruba plovnog puta 95
Tablica 43: Povećanje radijusa kruga okreta broda prema veličini odnosa dubine vode i gaza broda 99
Tablica 44: Dodatni zagažaj broda – usporedba podataka dobivenih simulacijama i izraza prema Barrassu 104
Tablica 45: Dobiveni regresijski koeficijenti modela za brodove punije forme 111
Tablica 46: Dobiveni regresijski koeficijenti modela za brodove finije forme 114
Tablica 47: Vrijednost dodatne širine plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja između trupa broda i ruba plovnog puta prema PIANC-u 122
Tablica 48: Vrijednosti dodatne širine plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja trupa broda i ruba plovnog puta prema ROM-u 123
Tablica 49: Vrijednosti dodatne širine plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja između trupa broda i ruba plovnog puta prema MLIT-u 123
Tablica 50: Podatci o brodovima korištenih u usporedbi podataka 124
Tablica 51: Vrijednosti dodatne širine plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja između trupa broda i ruba plovnog puta za brod punije forme dobivene modelom i preporukama 125
Tablica 52: Vrijednosti dodatne širine plovnog puta koju je potrebno uzeti u obzir zbog sile međudjelovanja između trupa broda i ruba plovnog puta za brod finije forme dobivene modelom i preporukama 126

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1: Promjena kuta divergentnih valova u odnosu na brzinu broda 42
Grafikon 2: Utjecaj plitke vode na krivulju otpora 42
Grafikon 3: Gubitak brzine u postotcima zbog utjecaja plitke vode 44
Grafikon 4: Odnos zaošijanja brodova punije forme kod postavke autopilota na praćenje zadanog kursa (head) i praćenja zadane trajektorije (track) za odnos h/T = 1,2 96
Grafikon 5: Odnos zaošijanja brodova punije forme kod postavke autopilota na praćenje zadanog kursa (head) i praćenja zadane trajektorije (track) za odnos h/T = 1,5 97
Grafikon 6: Odnos zaošijanja brodova finije forme kod postavke autopilota na praćenje zadanog kursa (head) i praćenja zadane trajektorije (track) za odnos h/T = 1,2 97
Grafikon 7: Odnos zaošijanja brodova finije forme kod postavke autopilota na praćenje zadanog kursa (head) i praćenja zadane trajektorije (track) za odnos h/T = 1,5 98
Grafikon 8: Bočni pomak brodova za brodove punije forme 101
Grafikon 9: Bočni pomak brodova za brodove finije forme 101
Grafikon 10: Prikaz odnosa dodatnog zagažaja dobivenog simulacijama i izrazom prema Barrassu za h/T = 1,2 105
Grafikon 11: Prikaz odnosa dodatnog zagažaja dobivenog simulacijama i izrazom prema Barrassu za h/T = 1,5 105
Grafikon 12: Poprečna sila međudjelovanja brodova punije forme za postavku autopilota na praćenje zadane trajektorije 109
Grafikon 13: Vrijednosti sila dobivenih istraživanjima modela brodova punije forme u bazenima 109
Grafikon 14: Poprečne sila međudjelovanja brodova finije forme za postavku autopilota na praćenje zadane trajektorije 113
Grafikon 15: Vrijednosti sila dobivenih istraživanjima modela brodova finije forme u bazenima 113
Grafikon 16: Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda dobivenog simulacijama i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za model broda Tanker 116
Grafikon 17: Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za model broda VLCC2 117
Grafikon 18 Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za model broda VLCC4 118
Grafikon 19: Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za model broda Cont4 119
Grafikon 20: Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za model broda Cont5 120
Grafikon 21: Razlika između simuliranih vrijednosti poprečnog pomaka broda i vrijednosti izračunate dobivenim modelom za modela broda PCC4 121
Grafikon 22: Usporedba vrijednosti o potrebnoj dodatnoj širini plovnog puta za brod punije forme i za odnos dubine vode i gaza broda h/T = 1,2 127
Grafikon 23: Usporedba vrijednosti o dodatnoj širini plovnog puta za brod punije forme i za odnos dubine vode i gaza broda h/T = 1,5 128

Grafikon 24: Usporedba vrijednosti o dodatnoj širini plovnog puta za brod finije forme za odnos dubine vode i gaza broda h/T = 1,2 128
Grafikon 25: Usporedba vrijednosti o dodatnoj širini plovnog puta za brod punije forme i za odnos dubine vode i gaza broda h/T = 1,5 129