

Poznavanje sila vjetra, valova i morskih struja kao uvjet projektiranja morskih luka

Kapitanović, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:321348>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-22**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for
permanent storage and preservation of digital
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

MATEO KAPITANOVIĆ

**POZNAVANJE SILA VJETRA, VALOVA I
MORSKIH STRUJA KAO UVJET
PROJEKTIRANJA MORSKIH LUKA**

DIPLOMSKI RAD

SPLIT, 2024.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

STUDIJ: POMORSKA NAUTIKA

**POZNAVANJE SILA VJETRA, VALOVA I
MORSKIH STRUJA KAO UVJET ZA
PROJEKTIRANJE MORSKIH LUKA**

DIPLOMSKI RAD

MENTOR:

Izv.prof.dr.sc. Nenad Leder

STUDENT:

Mateo Kapitanović (MB:0171276701)

SPLIT, 2024.

SAŽETAK

U ovom radu su prikazani meteorološki (vjetar) i oceanografski elementi (morske struje i valovi) koji su sastavni dio pomorstva i esencijalni elementi za planiranje i projektiranje hidrotehničkih zahvata u morskoj luci ili na otvorenom moru. Morske luke daju sigurnosti i zaštićenost, međutim uvijek postoji utjecaj vanjskih sila prilikom uplovljavanja, isplavljanja, manevra broda prilikom priveza i odveza te njegovog boravka u luci. Na osnovi dostupnih literatura, u radu je prikazan proračun prirodnih vanjskih sila odnosno sile vjetra, morskih struja i valova koje djeluju na brod M/V Dubrovnik koji je uglavnom privezan na Gatu sv. Petra u Gradskoj luci Split. Zaključeno je da sile vjetra imaju najveći utjecaj na sami brod u odnosu na sile morskih struja i valova. Sile morske struje nisu značajne osim u periodima orkanskog vjetra dok sile valova je najizraženija u vrijeme lebića premda njegova ekstremna pojava je na ovom području učestala svakih 10-15 godina.

Ključne riječi: *vjetrovi, morske struje, valovi, morske luke, M/V Dubrovnik, Gat sv. Petra*

ABSTRACT

This paper presents meteorological (wind) and oceanographic elements (sea current and waves) which are an integral part of seafaring and essential elements for planning and designing hydrotechnical procedures in a seaport or on the open sea. Sea port provide security and protection, however, there are always the influence of external forces when arrival, departure, maneuvering the ship during bearthing and unberthing, and its stay in the port. Based on the available literature, the paper presents the calculation of natural external forces, the force of wind, sea currents and waves acting on the ship M/V Dubrovnik, which is mostly moored at St. Peter in the City Port of Split. It was concluded that wind forces have the greatest influence on the ship itself compared to the forces of sea current and waves. The force of the sea current is not significant except during periods of hurricane wind, while the force of the waves is most pronounced at the time of lebić, although its extreme occurrence is frequent in this area every 10-15 years.

Keywords: *winds, currents, waves, seaports, M/V Dubrovnik, St. Peter's pier*

SADRŽAJ

1. UVOD	5
2. OSNOVNE ZNAČAJKE MORSKIH LUKA	7
2.1. RAZVRSTAJ MORSKIH LUKA U HRVATSKOJ	9
2.2. FUNKCIJE MORSKIH LUKA	10
2.3. PROJEKTIRANJE MORSKE LUKE	11
2.3.1. Projektiranje vanjskih i unutarnjih lučkih građevina na primjeru luke Rovinj 13	
2.3.2. Uvjeti za fizičku postavu morske luke na primjeru Gradske luke Split....	17
3. METEOROLOŠKI ELEMENTI	24
3.1. VJETAR	24
3.2. VJETROVI NA JADRANU	25
3.3. PRORAČUN SILA VJETRA	26
4. OCEANOGRAFSKI ELEMENTI	29
4.1. MORSKE STRUJE	29
4.2. VALOVI	31
4.3. PRORAČUN SILA MORSKIH STRUJA I VALOVA	32
5. PRORAČUN SILE VJETRA, VALOVA I MORSKIH STRUJA U GRADSKOJ LUCI SPLIT	34
6. ZAKLJUČAK	38
LITERATURA	39
POPIS SLIKA	40
POPIS TABLICA	41
POPIS KRATICA	42

1. UVOD

Poznavanje vjetrova, morskih struja i valova danas je od krucijalne važnosti ne samo za pomorca već i za samu granu pomorstva. Osim što utječu na sigurnu plovidbu, važnu ulogu imaju u samom projektiranju i planiranju morskih luka i drugih hidrotehničkih zahvata na moru.

Izraz luka odnosno morska luka definirana je u Republici Hrvatskoj Pomorskim zakonikom [13], međutim u najširem smislu to je infrastruktura koja uključuje razne usluge za obavljanja određenih operacija. Osim što je u njima omogućeno obavljanje operacija utovara i istovara, prije svega ona nudi sigurnost brodovima od raznih meteoroloških i oceanografskih pojava. Prilikom projektiranja morskih luka potrebno je analizirati utjecaj vanjskih sila prilikom uplovljavanja, isplovljavanja, manevra broda prilikom priveza i odveza te njegovog boravka u luci.

Vjetar najjednostavnije možemo opisati kao horizontalno strujanje zračnih masa koje nastaje uslijed razlike temperature odnosno tlaka zraka. Kad govorimo o vjetrovima nad Jadranom valja spomenuti najučestalije, a to su bura (NNE do ENE), jugo (ESE do SSE) i maestral (WNW do NW). Učinak samog vjetra na luku, lučke konstrukcije i lučke operacije važniji je od učinka oceanografskih elemenata poput morskih struja i valova. Da bi se dobili neki matematički podaci o samoj sili vjetra postoje razni nacionalni standardi, proračuni i propisi, međutim ti parametri bi u važnijim procjenama trebali služiti kao vodič.[5][7]

Kad govorimo o morskim strujama najčešće se misli na gibanje morske odnosno oceanske vode u nekom smjeru. Morske struje u Jadranu nemaju neki značajniji utjecaj na sigurnost plovidbe i variraju od nekih 0,5 čv u određenim uvjetima do 4 čv u uskim prolazima te riječnim ušćima. Proračun sila morskih struja nešto je kompliciraniji nego sile vjetra zbog udaljenosti same kobilice i morskog dna. Zbog različitosti u standardima i preporukama metode za proračun sila morskih struja isto tako treba uzeti kao vodič. [5][7]

Valovi su horizontalna gibanja odnosno prenošenja energije koju je zrak predao moru, ali u fizičkoj oceanografiji se smatraju vertikalnim gibanjima morske površine. S oceanografskog gledišta Jadransko more se smatra zatvorenim morem u kojem najfrekventnije površinske valove uzrokuju bura i jugo u zimskom, a maestral u ljetnom periodu.[5]

Cilj rada je proračunati sile vjetra, valova i morskih struja u akvatoriju Gradske luke Split, a na osnovu dostupnih stručnih i znanstvenih spoznaja. Svrha rada je osigurati kvalitetno planiranje i projektiranje morskih luka.

Rad se sastoji od šest poglavlja te su u njima opisane značajke i karakteristike morskih luka, vjetrova, morskih struja i valova te metode proračuna sila za navedene meteorološke i oceanografske elemente. Nakon uvoda, u drugom poglavlju se iznose osnovna obilježja i definicija morskih luka te se ukratko prikazuje proces projektiranja istih na primjeru luke Rovinj. U trećem poglavlju prikazuje se najvažniji meteorološki element vjetar. Osim osnovnih karakteristika prikazane su osnovne proračunske metode za izračun sile vjetra. Oceanografski elementi i njihovi proračuni su prikazani u četvrtom poglavlju. Ono najbitnije je prikazano u petom poglavlju, a to su proračuni sile vjetra, morskih struja i valova na primjeru broda M/V Dubrovnik koji pristaje u Gradskoj luci Split. Na kraju rada navedeni su najvažniji zaključci rada.

2. OSNOVNE ZNAČAJKE MORSKIH LUKA

Luka jest morska luka (slika 1.), tj. morski i s morem neposredno povezani kopneni prostor s izgrađenim i neizgrađenim obalama, lukobranima, uređajima, postrojenjima i drugim objektima namijenjenim za pristajanje, sidrenje i zaštitu brodova, jahti i brodica, ukrcaj i iskrcaj putnika i robe, uskladištenje i drugo manipuliranje robom, proizvodnju, oplemenjivanje i doradu robe te ostale gospodarske djelatnosti koje su s tim djelatnostima u međusobnoj ekonomskoj, prometnoj ili tehnološkoj svezi. [13]



Slika 1. Morska luka Split [20]

Pomorska lučka infrastruktura u Republici Hrvatskoj sastoji se od šest luka otvorenih za javni promet od državnog značaja (Rijeka, Zadar, Šibenik, Split, Ploče i Dubrovnik), 40 županijskih i oko 280 lokalnih luka. Isto tako, postoje 24 marine te 26 industrijskih i brodogradilišnih luka od državnog značaja. [8]

Hrvatske morske luke važna su gospodarska središta. Imaju značajan utjecaj na hrvatsko gospodarstvo kroz prometne, trgovačke i industrijske funkcije te sve aktivnosti vezane uz njih. Tim prometnim čvorištima prolaze i u njima se isprepleću kopneni,

pomorski, robni i putnički tokovi. Preko njih prolazi najjeftinijim putem roba iz domaće i vanjskotrgovinske razmjene, tranzit za srednjoeuropske zemlje. [10]

U samom procesu proizvodnje lučkih usluga koriste se objekti i sredstva za rad koja se prema načinu sudjelovanja u tom procesu mogu svrstati na sljedeće skupine:

- lučku infrastrukturu;
- lučku suprastrukturu;
- lučku pokretnu mehanizaciju.

Lučku infrastrukturu čine svi objekti na prostoru i u akvatoriju luke ili terminala, koji istovremeno služe svim radnim organizacijama, upravi luke i institucijama koje obavljaju određene aktivnosti na tom prostoru. To su nepokretna sredstva, odnosno objekti koji služe za rad u luci, ali koji ne proizvode lučku uslugu, već služe za organiziranje i obavljanje lučke djelatnosti. U nju pripadaju lukobrani (slika 2), operativne obale, druge lučke zemljišne površine, kao i objekti prometne infrastrukture (lučke cestovne i željezničke prometnice, vodovodna, kanalizacijska, energetska i telefonska mreža, objekti za sigurnost plovidbe. Lučku suprastrukturu čine lučki objekti i sredstva za rad koja služe pri prekrcaju tereta, skladištenju robe i nekim specifičnim lučkim aktivnostima (npr. popravci; fumigacija robe, odnosno zaštita od štetnika u skladištima i sl.). Predstavlja nepokretne objekte koji se neposredno koriste u proizvodnji lučke usluge kao što su upravne zgrade, skladišta, silosi, rezervoari i sl., te lučki kapitalni pretovarni objekti (dizalice i sl.).

Lučka pokretna mehanizacija je skupni izraz za mobilnu mehanizaciju, odnosno transportna sredstva i uređaje koji služe za ukrcaj, iskrcaj ili pretovar tereta na brodove ili s njih, te rukovanje teretom u lučkom prostoru uključujući i ploveće objekte kao što su remorkeri, bageri, grtalice i maone. [11]



Slika 2. Lukobrani morske luke [18]

2.1. RAZVRSTAJ MORSKIH LUKA U HRVATSKOJ

Zakon o pomorskom dobru i morskim lukama daje potpuno novu klasifikaciju luka, što nije bilo moguće u prethodnim zakonima te omogućava drugačiju podjelu luka prema njihovoj veličini i značenju za Republiku Hrvatsku. [16] Kategorizacijom luka, na osnovi stvarnih prometnih i ostalih parametara, RH se odredila prema glavnim prometnim pravcima. Zakon normira luke otvorene za javni promet i luke posebne namjene, što čini podjelu luka prema namjeni kojoj služe. Sve luke mogu biti otvorene za međunarodni ili samo za domaći promet. Luke za javni promet su: [9]

- Luke osobitog (međunarodnog) gospodarskog interesa za RH,
- luke županijskog značenja i
- luke lokalnog značenja.

Luke posebne namjene dijele se na:

- vojne luke,
- luke tijela unutarnjih poslova,
- luke nautičkog turizma,
- industrijske luke,
- športske luke,
- brodogradilišne luke,
- ribarske luke i dr.

Prema značenju za RH luke posebne namjene također se razvrstavaju i to prema značenju za RH i od županijskog značenja.

Upravljanje, izgradnja i održavanje luka otvorenih za javni promet provodi se putem lučke uprave, dok je upravljanje lukom posebne namjene povjereno nositelju koncesije za luku posebne namjene. Tako zakon o morskim lukama objedinjuje europske modele upravljanja morskim lukama, ali je i odraz postojećeg stanja u morskim lukama RH. [9]

2.2. FUNKCIJE MORSKIH LUKA

Razvojem gospodarstva i razvojem prometnog sustava mora se omogućiti sve veća protočnost prometa. Povećanjem količine robe mijenjala se uloga morskih luka i povećavao se značaj morskih luka.[16]

Suvremene luke predstavljaju važna prometna, trgovačka i industrijska središta, pa se lučke djelatnosti prema bitnim značajkama mogu podijeliti u jednu od tri osnovne funkcije: prometna funkcija luke, trgovačka funkcija luke i industrijska funkcija luke. [15]

Osnovna funkcija luke je prometna jer je promet glavna djelatnost luke. Prometna funkcija također je preduvjet za trgovačku i industrijsku funkciju luke. Luka djeluje kao sustav u kojem su sve tri funkcije usko povezane te međusobno zavisne. Da bi luka obavljala prometne funkcije mora zadovoljavati sljedeće zahtjeve:

- imati odgovarajuće mogućnosti prekrcaja;
- imati dobru kopnenu povezanost sa zaleđem;
- imati razvijene morske veze (pročelje luke).

S vremenom se trgovačka funkcija luke postupno razvila iz prometne. Moderne luke nisu samo prekrcajna, već i trgovačka središta. Morske luke postaju nacionalna, međunarodna i svjetska središta zbog nižih nabavnih cijena i smanjenih troškova transporta, uvoznici kupuju na veliko, a prodaju u malim količinama. Zbog svoje komercijalne funkcije, luka djeluje kao posrednik u prometu između dviju zemalja. Komercijalne funkcije luke uključuju:

- kupoprodaja robe;
- robne dodatne radnje kojima se povećava tržišna vrijednost robe (pakiranje, prepakiranje, punjenje, sipanje, miješanje, dijeljenje, sortiranje, pranje, sušenje, etiketiranje, obrada tereta i dr.).

Kako bi luka uspješno obavljala svoje trgovačke funkcije, mora ispunjavati određene zahtjeve:

- dobra pomorska i kopnena povezanost;
- na području luke koncentrirana dovoljna količina tereta;
- dovoljan kapacitet skladištenja.

Početni razvoj industrijske funkcije luke usko je povezan s trgovačkom funkcijom, uključujući prije svega preradu uvozne robe bilo to u većoj ili manjoj doradi. Stoga se industrijska funkcija luke izravno nadovezala na trgovačku funkciju luke, povećavajući broj ulazne robe u luku te direktnim djelovanjem utjecala na poboljšanje prometne i trgovačke funkcije luke.

Posljednjih godina industrijska funkcija luke postaje sve važnija, jer je luka postala idealno mjesto za različite industrijske sektore, u kojima se odvija industrijska prerada sirovina i proizvodnja gotovih proizvoda. Time se u potpunosti iskorištavaju prednosti koje more nudi kao najekonomičniji transportni put za transport industrijskih sirovina. Razvoj industrijske funkcije u luci donosi i promjene same luke. To se prvenstveno odnosi na značajna povećanja lučkih površina te smještaj i izgradnja tvornica i drugih industrijskih pogona. [11]

2.3. PROJEKTIRANJE MORSKE LUKE

Projektiranje predstavlja istraživačko-razvojni postupak pomoću kojega se definiraju osnovna tehničko-tehnološka obilježja luka i terminala. Projektiranje, kao postupak, ima svoje logičke faze, a to su: idejno rješenje (slika 3), idejni projekt, glavni projekt i izvedbeni projekt. Kada se pristupa samom projektiranju luke, jako je bitno odrediti osnovne čimbenike koji određuju razinu maritimne sigurnosti kao i prilaz samom akvatoriju. Treba se posebno analizirati utjecaj vanjskih sila prilikom uplovljavanja, isplovljavanja, manevra broda prilikom priveza i odveza te njegovog boravka u luci.[15] Ne smije se zanemariti zakonska obveza izrade maritimne studije, a sukladno Pomorskom zakoniku. [13]



Slika 3. Idejno rješenje luke Omiš [15]

Za svaki novi objekt potrebno je utvrditi lokacijsku dozvolu na temelju koje se dobiva građevinska dozvola. Projektom dokumentacijom moraju se utvrditi svi bitni sadržaji luke ili terminala što znači da moraju biti istaknute prometne površine i njihova namjena, objekti koji služe za obavljanje poslova upravljanja terminalom, objekti koji služe za smještaj i rukovanje robom, objekti servisnih djelatnosti, carine i špeditera, te niz drugih objekata, nezavisno od namijenjenih terminala.

Prilikom projektiranja moraju biti definirani i potrebni prekrajni kapaciteti i sredstva za prijevoz robe čije je projektiranje lučkih terminala da pruži maksimalnu nezavisnost između dva transportna oblika (koja se susreću u luci), te optimalnu slobodu u nesmetanu protoku robe. Zbog toga je pri projektiranju potrebno voditi računa o operacionalizaciji projekta. To se prije svega odnosi na definiranje funkcije ciljeva, koje će omogućiti postizanje optimalnih tehničkih, tehnoloških i ekonomskih učinaka.

Vanjske lučke građevine, također, imaju važnu ulogu u projektiranju luke, budući da one štite lučki akvatorij od valova, a njihova sekundarna funkcija može biti zaštita od morskih struja i nanosa. Vanjske lučke građevine koje štite lučki akvatorij od valova su lukobrani (slika 3) i valobrani. Konstrukcija valobrana identična je lukobranima, ali je funkcija različita. Naime, valobrani su podmorski ili niski nadmorski objekti koji djelomično štite od valova te nisu povezani s obalom kao lukobrani

Funkcionalni zahtjevi koji determiniraju optimalan položaj i smjer vanjskih lučkih

građevina te izbor vrste, tipa i konstrukcije lukobrana ili valobrana, ovise o zahtjevima luke u pogledu zadovoljavanja položajnih pogodnosti. Kod projektiranja luke treba se odrediti broj i veličina vezova prema prometu u luci i veličini brodova te se odabire točka koja je najizloženije u lučkom akvatoriju, određuje se kut izloženosti α (alfa) i prenese na ružu vjetrova. Tako se dobiju smjerovi vjetra, ali i smjerovi dominantnih i sekundarnih valova koje ti vjetrovi uzrokuju. [16]

2.3.1. Projektiranje vanjskih i unutarnjih lučkih građevina na primjeru luke Rovinj

Najčešće vanjske lučke građevine su one koje štite lučki akvatorij od valova posebno onih uzrokovanih vjetrom. Njihova dodatna funkcija je zaštita od morskih struja, plimnih oscilacija i nanosa.

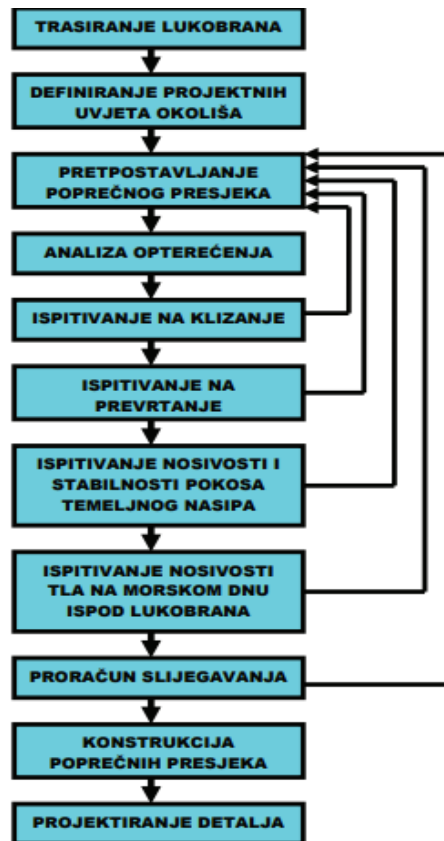
Lukobran je čvrsta građevina u moru (izgrađeni nasip) povezana s obalom, s osnovnom zadaćom zaštite luke od štetnog djelovanja vjetra i valova.

Valobran je građevina u moru (izgrađeni nasip) ispred luke, s osnovnom zadaćom zaštite luke od štetnog djelovanja vjetra i valova.

Funkcionalni zahtjevi koji determiniraju optimalan položaj i smjer vanjskih lučkih građevina, te izbor vrste, tipa i konstrukcije lukobrana i/ili valobrana, ovise o zahtjevima luke u pogledu zadovoljavanja položajnih pogodnosti. Izbor vrste i tipa lukobrana ili valobrana ovisi prvenstveno o raspoloživom kamenom materijalu i blizini njegova iskopa, dubini vode u luci i visini projektnog vala. Uz ove čimbenike, na izbor utječu i:

- varijacije vremenskih uvjeta tijekom godine,
- dubine mora,
- udaljenost od obale,
- troškovi izgradnje,
- vrste i karakteristike brodova koji pristaju u luci itd. [6]

Lukobrani moraju biti projektirani tako da omogućе neočekivano velikim valovima da se reflektiraju i/ili preliju lukobran i/ili procijede kroz njega. Količine koje se prelijevaju ili procjeđuju određene su dopuštenim valovima koji nastaju unutar bazena. Prelijevanje se može smanjiti povišenjem lukobrana, a procjeđivanje finijom strukturom jezgre lukobrana. Projektiranje lukobrana sastoji se iz više faza, a predstavlja se dijagramom toka kako je prikazano na slici 4.



Slika 4. Dijagram toka projektiranja lukobrana [6]

Unutarnje lučke građevine služe za vezu između morskih i kopnenih prijevoznih sredstava. U lukama se primjenjuju tri osnovna sustava rasporeda unutarnjih građevina:

- sustav rubnih bazena,
- sustav bazena,
- sustav gatova.

Sustav gatova se primjenjuje u uvjetima luka koje žele postići bolje iskorištenje obale. Postoje dvije karakteristične izvedbe, a to su američka (uski gatovi) i mediteranska (široki gatovi).

Posebna vrsta unutarnjih obalnih građevina su plivajući gatovi ili pontoni. Upotrebljavaju se u lukama s velikim sezonskim razlikama vodene razine. U zadnje se vrijeme javlja velik broj različitih specijaliziranih pontonskih građevina (offshore) na otvorenom moru, namijenjenih prekrcaju tekućih i suhih rasutih tereta.

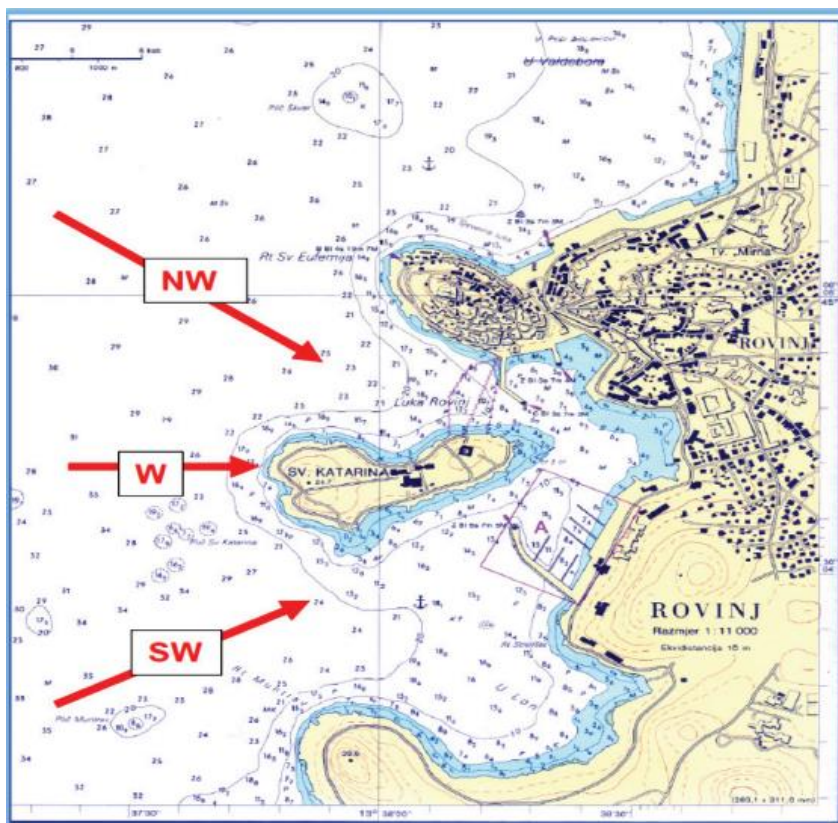
Funkcijski kriteriji vezani uz projektiranje lučkih građevina, koje je potrebno uzeti u obzir su: funkcijski kriteriji iz projektnog zadatka, ublaženi funkcijski kriteriji, kriteriji preživljavanja i eliminacijski kriteriji. Odnos svih kriterija može se vidjeti na primjeru projektiranja dogradnje luke Rovinj što prikazuje tablica 1.

Tablica 1. Funkcijski kriterij kod projektiranja dogradnje luke Rovinj [6]

a) Funkcijski kriteriji iz projektnog zadatka	<ul style="list-style-type: none"> Maksimalna visina vala na prolazima u akvatorij; 	$H_{\max 5g} < 0,80 \text{ m}$
	<ul style="list-style-type: none"> Maksimalna visina vala kod «Punte Oštro» (kriterij prohodnosti plutajućih valobrana); 	$H_{\max 5g} < 0,50 \text{ m}$
	<ul style="list-style-type: none"> Maksimalna visina vala u zaštićenom akvatoriju (kriterij prohodnosti plutajućih gatova) 	$H_{\max 5g} < 0,30 \text{ m}$
b) Ublaženi funkcijski kriteriji	<ul style="list-style-type: none"> Kriterij funkcioniranja plutajućih valobrana 	$H_{\max 5g} < 0,75 \text{ m}$
	<ul style="list-style-type: none"> Kriterij funkcioniranja plutajućih gatova 	$H_{\max 5g} < 0,5 \text{ m}$
c) Kriteriji preživljavanja	<ul style="list-style-type: none"> Kriterij preživljavanja plutajućih valobrana 	$H_{\max 100g} < 1,5 \text{ m}$
	<ul style="list-style-type: none"> Kriterij preživljavanja plutajućih gatova 	$H_{\max 100g} < 0,75 \text{ m}$
a) Eliminacijski kriteriji	<ul style="list-style-type: none"> Trošak izgradnje lukobrana Pogoršanje manevarskih uvjeta na ulazu u luku. 	

Kod funkcijskog kriterija iz projektnog zadatka bitno je posebno uzeti u obzir širinu ulaza u luku. Lučka uprava Rovinj, koja je i nositelj zahvata, preporučila je da širina ulaza u luku mora iznositi najmanje 3 dužine maksimalnog broda koji može ući u luku. Tako za putnički brod dužine 30 m širina ulaznog dijela u luku mora iznositi najmanje 90 m. Međutim, zbog izloženosti jakom vjetru i snažnim valovima iz zapadnog i jugozapadnog smjera, nemoguće je točno odrediti ne samo širinu ulaza u luku, nego i broj odgovarajućih gatova za siguran vez plovila jer sama izgrađenost i opremljenost lučke infrastrukture ne pružaju adekvatnu sigurnost u postavljanju neophodnih dodatnih privezišta. [6]

Na slici 5 prikazan je primjer akvatorija južne gradske luke Rovinj na kojem su označeni smjerovi vjetra koji ugrožavaju sigurnost plovila unutar lučkog bazena. Smjer vjetra bitno će utjecati na smjer izgradnje pristana i rasporeda lučkih objekata. [6]



Slika 5. Akvatorij južne gradske luke Rovinj s označenim smjerovima vjetra iz III. i IV. kvadranta [6]

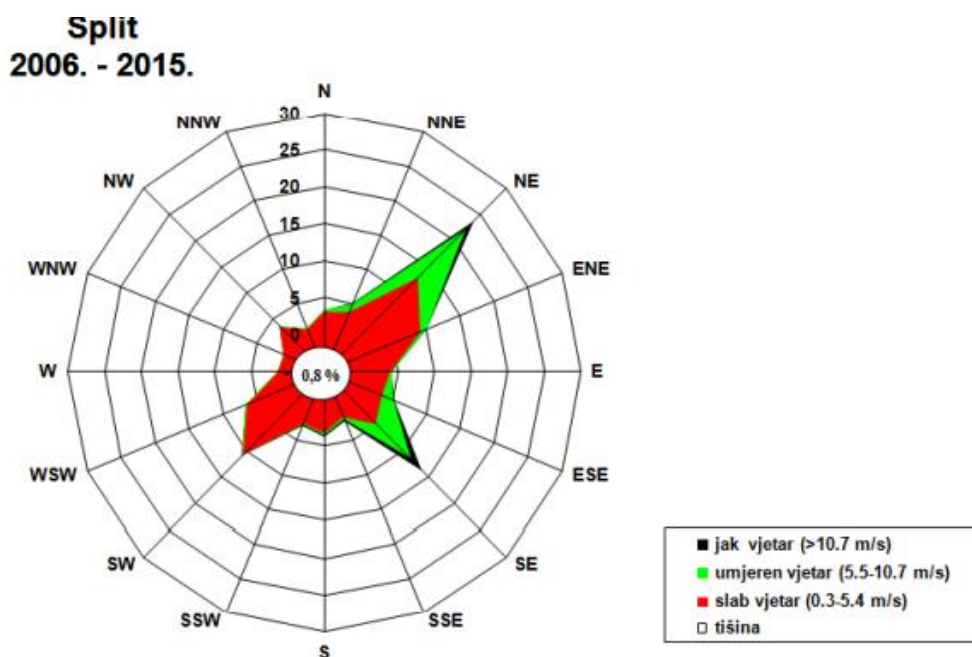
2.3.2. Uvjeti za fizičku postavu morske luke na primjeru Gradske luke Split

Izbor lokacije i fizička postava luke i terminala, te odabir usmjerenja bitnih lučkih objekata, kao što su prilazni kanali, lukobrani, bazeni, obale zahtijeva istraživanje svih prirodnih uvjeta koji se odražavaju na izbor, konstrukciju i troškove izgradnje lučke infrastrukture.

U prirodne uvjete za fizičku postavu luka i terminal svrstavaju se:

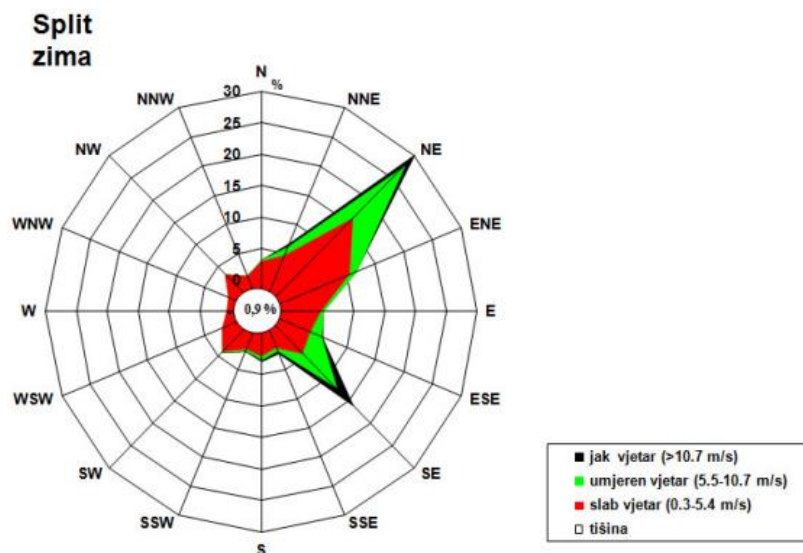
- meteorološki i klimatski uvjeti,
- oceanografski uvjeti,
- hidrografske-navigacijski uvjeti,
- položajni uvjeti, veličina luke i manevarskog prostora.

Vjetar je izrazito prostorno i vremenski promjenjiv meteorološki parameter, jer ovisi o orografskim i drugim lokalnim uvjetima na nekom području. Za klimatološku analizu vjetra najčešće se izrađuje godišnje i sezonske ruže vjetrova. Tako je za projektiranje luke Split izražena godišnja ruža vjetra prikazano na slici 6. [15]

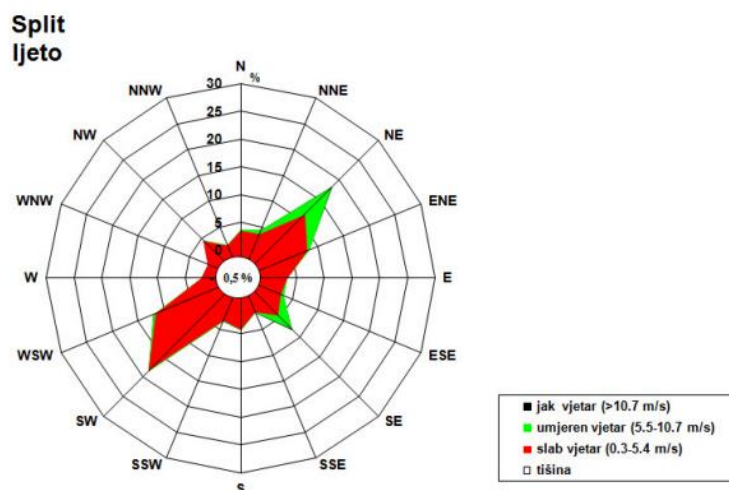


Slika 6. Godišnja ruža vjetrova za područje Splita u razdoblju od 2006. do 2015. godine [15]

Međutim za projektiranje luke Split potrebna je izrada i sezonskih ruža vjetrova što je prikazano na slikama 7 i 8.



Slika 7. Sezonska ruža vjetrova za zimu na području Splita u razdoblju od 2006. do 2015. godine [15]



Slika 8. Sezonska ruža vjetrova za ljetno na području Splita u razdoblju od 2006. do 2015. godine [15]

Na godišnjoj razini na području Splita vidljivo je da je prevladavajući vjetar NE s učestalošću od 23,8%. Slijedi SE vjetar s učestalošću od 13,8%, a zatim SW vjetar koji se javlja u 10,9% slučajeva. Bura i jugo prevladavaju zimi, a SW vjetar ljeti.

Za potrebe sigurnosti plovidbe u luci te za projektiranje Luke Split analiziraju se statističke ekstremne brzine vjetra. Za procjenu ekstremnih vrijednosti brzine najčešće se koristi generalizirana razdioba ekstremnih vrijednosti prema Jenkinsonu ili Gumbelova razdioba što je prikazano tablicom 2. [15]

Tablica 2. Očekivani maksimalni udari vjetra, te pripadne vjerojatnosti za povratna razdoblja od T godina dobivenih Jenkinsonovom razdiobom ekstrema iz podataka mjerenja brzine vjetra za područje Splita, 2006. – 2015. [15]

T (god)	P (%)	VJETAR						
		Svi smjerovi	N	NNE	NE	ENE	SE	SW
2	50	35,56	27,36	32,87	35,06	31,84	29,58	25,61
5	80	39,56	33,12	38,12	39,41	36,30	33,11	28,91
10	90	41,92	36,12	40,78	41,95	39,19	34,76	31,06
20	95	43,99	38,50	42,85	44,16	41,90	35,96	33,11
25	96	44,61	39,17	43,43	44,82	42,75	36,28	33,76
50	98	46,42	41,00	44,98	46,72	45,34	37,12	35,74
100	99	48,07	42,52	46,25	48,44	47,87	37,76	37,69

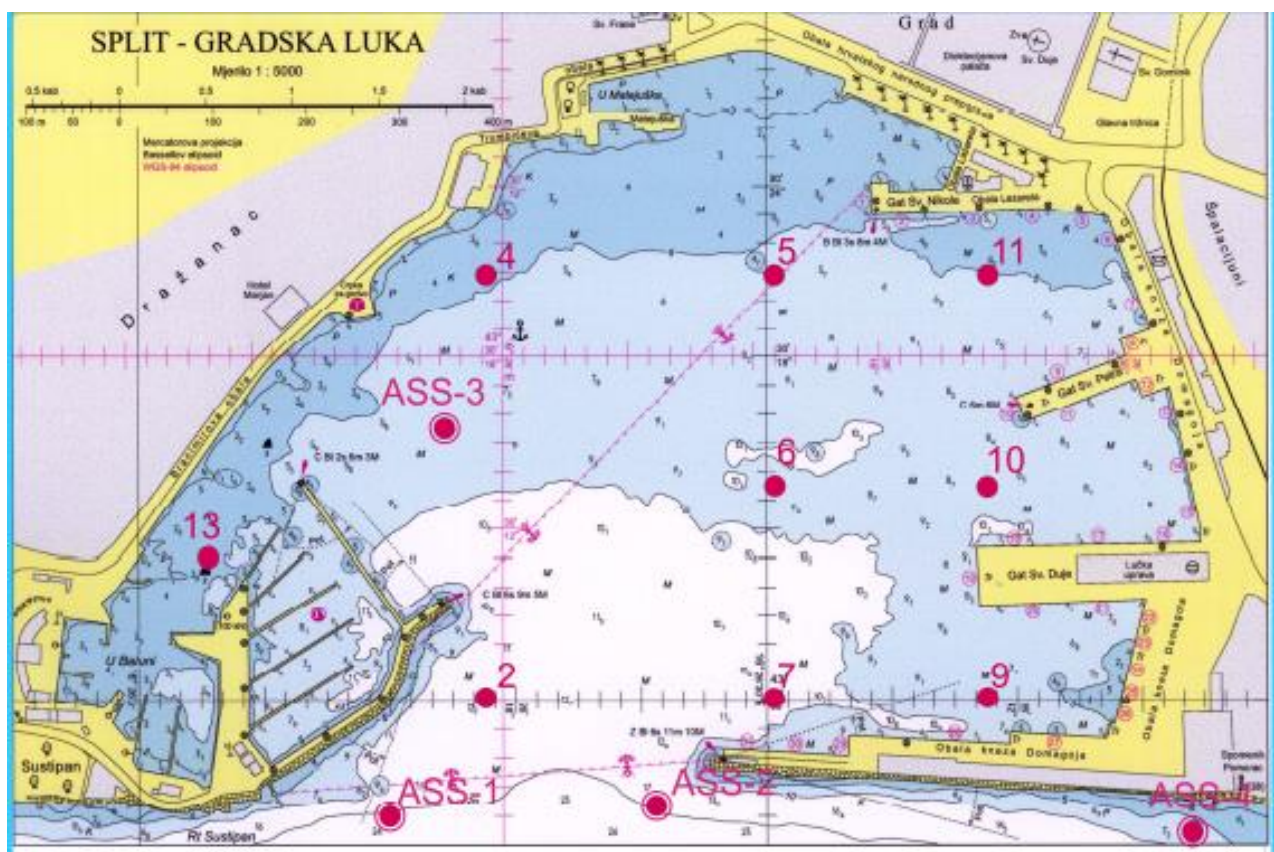
Tablica 3. Srednji i mjesečni broj dana s orkanskim vjetrom s pripadnom standardnom devijacijom za Split od 2006. do 2015. godine [15]

BROJ DANA S VJETROM JAČINE ≥ 10 bf													
Godina	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	zbroj
2006.	3	2	4	3	0	0	0	0	2	3	3	1	21
2007.	2	2	3	0	1	0	2	0	2	3	3	6	23
2008.	5	4	3	2	0	0	0	0	0	0	5	4	23
2009.	0	6	7	1	0	2	0	0	0	3	1	4	24
2010.	4	2	2	1	1	1	1	2	0	2	2	6	24
2011.	1	0	/	1	1	0	0	0	2	4	0	0	9
2012.	1	4	2	3	0	0	1	0	0	1	2	4	18
2013.	0	4	5	0	1	1	0	0	0	0	6	1	18
2014.	2	2	3	1	0	0	0	0	3	2	7	9	29
2015.	6	5	7	6	3	1	1	0	0	0	2	0	31
zbroj	24	31	36	18	7	5	5	2	9	18	31	34	220
Sred.	2,4	3,1	3,6	1,8	0,7	0,5	0,5	0,2	0,9	1,8	3,1	3,4	22,0
Std.	2,1	1,8	2,2	1,8	0,9	0,7	0,7	0,6	1,2	1,5	2,2	2,9	1,6
Max.	6	6	7	6	3	2	2	2	3	4	7	9	9

Važan čimbenik za projektiranje Luke Split je i analiza statističke značajke vjetra određene jačine (naročito ekstremne) što je prikazano tablicom 3.

Generalno ciklonalno strujanje u Jadranskom moru objašnjava se dugoperiodičkim gradijentskim strujama, koje nastaju zbog horizontalnih razlika u gustoći mora. Naime, dotok slatke vode od strane sjevernojadranskih Rijeka (najveći od rijeke Po), te njezino gibanje pod utjecajem Coriolisove sile, uz talijansku obalu Jadrana, rezultira generalnom strujom suprotnog smjera uz hrvatsku obalu.

Poznavanje karakteristika morskih struja u nekom akvatoriju od velikog je značaja za veliki broj djelatnosti, posebno hidrotehničke projekte kao što su izgradnja lukobrana, morskih luka i marina. U luci Split prije rekonstrukcije i izgradnje vanjskih vezova je obavljeno mjerenje morskih struja što je prikazano na slici 9.



Slika 9. Pozicije mjerenja morskih struja u luci Split (ASS-1, ASS-2, ASS-3) [15]

Rezultati mjerenje morskih struja na ove tri pozicije je prikazano u tablicama 4 do 6.

Tablica 4. Statistički parametri morskih struja na postaji ASS-1 u vremenskom razdoblju od 2006. do 2015. [15]

Gradska luka Split (ASS-1)			
Dubina (m)	3	7	9
Maksimalna brzina (cm/s)	51,0	35,0	34,0
Srednja brzina (cm/s)	6,7	6,1	5,4
Minimalna brzina (cm/s)	1,0	1,0	1,0
Standardna devijacija (cm/s)	4,8	3,7	3,5
Rezultatni vektor (cms^{-1}/deg)	4,06/246	3,58/247	2,82/246
Faktor stabilnosti (%)	60,4	58,6	51,8

Tablica 5. Statistički parametri morskih struja na postaji ASS-2 u vremenskom razdoblju od 2006. do 2015. [15]

Gradska luka Split (ASS-2)			
Dubina (m)	2	10	16
Maksimalna brzina (cm/s)	58,0	29,0	30,0
Srednja brzina (cm/s)	9,3	5,9	2,9
Minimalna brzina (cm/s)	1,0	1,0	1,0
Standardna devijacija (cm/s)	6,5	3,7	2,6
Rezultatni vektor (cms^{-1}/deg)	4,43/304	3,13/293	0,56/258
Faktor stabilnosti (%)	47,4	53,3	19,2

Tablica 6. Statistički parametri morskih struja na postaji ASS-3 u vremenskom razdoblju od 2006. do 2015. [15]

Gradska luka Split (ASS-3)	
Dubina (m)	6
Maksimalna brzina (cm/s)	21,0
Srednja brzina (cm/s)	3,4
Minimalna brzina (cm/s)	1,0
Standardna devijacija (cm/s)	2,1
Rezultatni vektor (cms^{-1}/deg)	0,77/318
Faktor stabilnosti (%)	22,9

Za potrebe dizajniranja lukobrana u luci Split obavljena su mjerenja valova suvremenim valografom na postaji V2 u Bračkom kanalu, nedaleko od gradske luke. S aspekta generiranja površinskih valova na postaji V2 u Bračkom kanalu dominiraju sljedeći vjetrovi (slika 10):

- jugo, smjera ESE-SE, privjetrište oko 100 km;
- bura, smjera NE-ENE, privjetrište oko 3,5 km;
- lebić, smjer SW, privjetrište oko 15 km;
- maestral, pulenat, smjera W-WSW, privjetrište oko 30 km. [15]



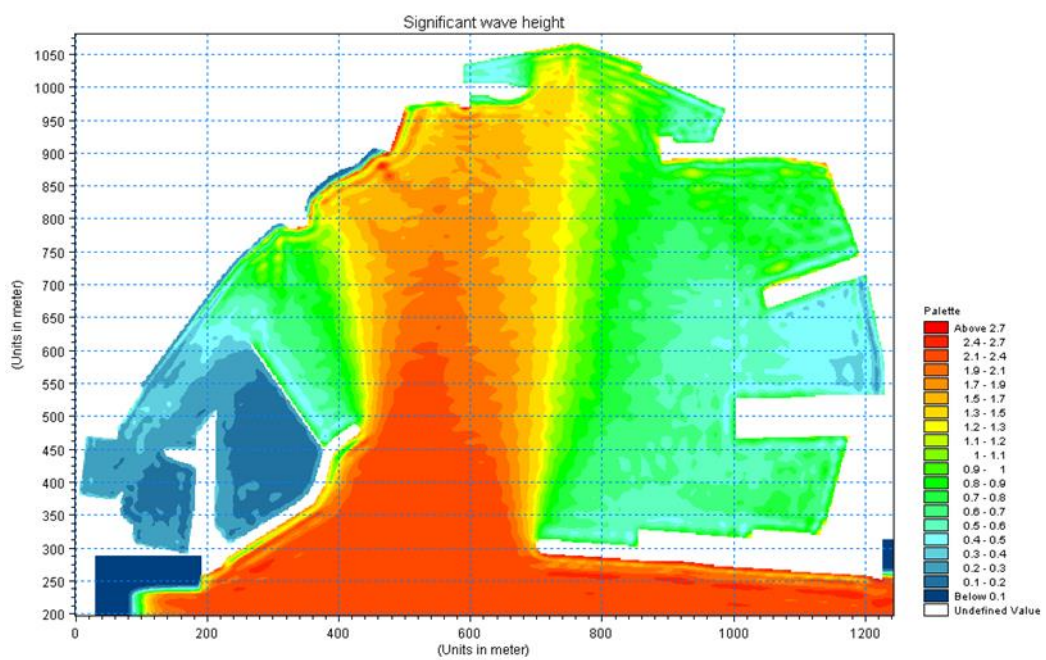
Slika 10. Smjerovi dominantnih vjetrova na luku Split [15]

Maksimalna visina vala izmjerena na postaji V2 u vremenskom razdoblju 11.2007.-06.2008. godine iznosi $H_{\max} = 2,84$ m dok je maksimalno značajna valna visina bila $H_s = 1,35$ m. Poznavanje navedenih valnih visina potrebno je poznavati za projektiranje Gradske luke Split. [15]

Površinski valovi uzrokovani vjetrom nisu mjereni u akvatoriju Gradske luke Split, budući bi sidrenje valografske plutače unutar luke predstavljalo opasnost za plovidbu brodova. Stoga se u oceanološkoj praksi koriste numerički modeli širenja valova u luci.

Na slici 11 prikazani su smjer i značajna visina valova u Gradskoj luci Split za vrijeme oštra i lebića, vjetrova koji u luci, zbog njezina položaja, uzrokuju najveće valove.

Iz slike 11 se vidi da se na Gat u Sv. Petra javljaju reflektirani valovi lebića iz područja obalnog zida ispred Dioklecijanove palače, čija se značajna valna visina procjenjuje između 1,0 i 1,5 m.



Slika 11. Gradska luka Split – rezultati numeričkog modela MIKE 21 širenja valova za vrijeme oštra i lebića (dole) i fotografija luke za vrijeme lebića (gore) [15]

3. METEOROLOŠKI ELEMENTI

Meteorološki elementi odnosno veličine su kojima se prikazuje fizikalno stanje atmosfere i fizikalne pojave u njoj. Glavni meteorološki elementi dijele se na elemente koji ponajviše ovise o djelovanju Sunca (intenzitet i trajanje Sunčeva zračenja, temperatura zraka), na one elemente koji određuju stanja i promjene mehaničke naravi uz utjecaj gravitacijske sile (tlak zraka, smjer i brzina vjetra) i na elemente koji su u vezi s vodenom parom u atmosferi (isparavanje, vlažnost zraka, oblaci, oborine). U meteorološke elemente ubrajaju se još i toplinsko zračenje atmosfere i Zemlje, horizontalna vidljivost, snježni pokrivač, optičke i električne pojave u atmosferi i dr. [1]

U radu je naglasak na vjetru kao najvažnijem elementu pri planiranju i izgradnji hidrotehničkih zahvata na moru, a pogotovo morskih luka.

Meteorološke elemente zajedno sa oceanografskim elementima možemo svrstati u vanjske čimbenike. Ovi elementi izravno utječu, bilo to u većoj ili manjoj mjeri na sigurnost pomorske plovidbe te odvijanja lučkih procesa. Njih treba uzeti u obzir u svim fazama projektiranja svih lučkih zahvata kako tijekom faze izgradnje tako i tijekom samog radnog vijeka. Treba imati na umu promjenjiv i često nepredvidiv karakter svih sila koje mogu djelovati na lučke konstrukcije. [2]

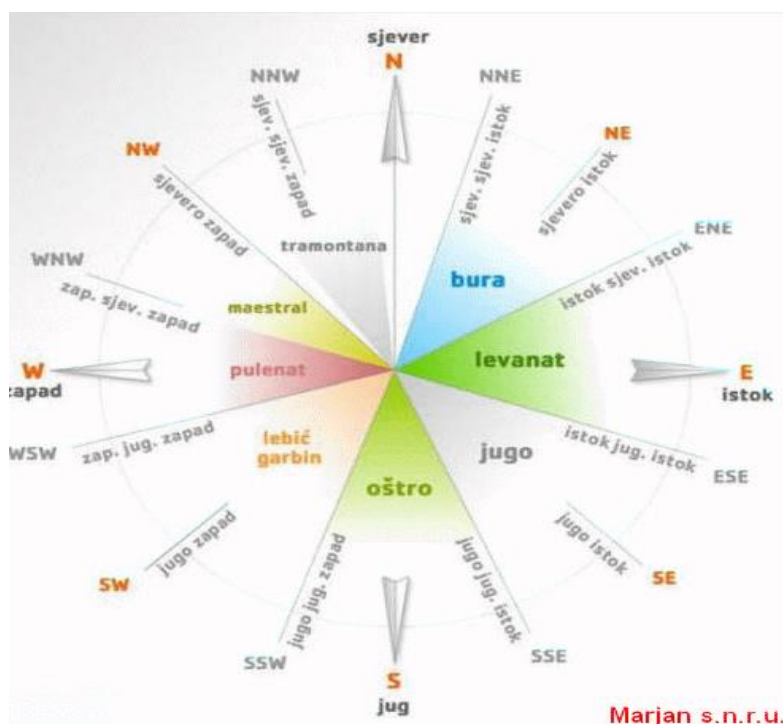
3.1. VJETAR

Vjetar najjednostavnije možemo opisati kao horizontalno strujanje zračnih masa koji nastaje uslijed razlike temperatura odnosno tlakova. Strujanjem zraka dolazi do trenja, odnosno gubitka kinetičke energije u doticaju s čvrstom podlogom, što rezultira razlikama u brzini strujanja u prostoru i vremenu. U radu će biti stavljen naglasak na vjetrove koji pušu nad Jadranom. [3]

Vjetar je posljedica više čimbenika: razlike tlaka između dvaju područja (vjetar struji od područja višega tlaka prema području nižega tlaka i to je jači što je ta razlika veća), Zemljine rotacije, Coriolisove sile - vjetar zbog njezina djelovanja (na sjevernoj polutki skreće u desno, na južnoj u lijevo), centrifugalne sile kada su putanje čestica zraka zakrivljene, te sile trenja s podlogom. [14]

3.2. VJETROVI NA JADRANU

Vjetrovi nad Jadranom općenito ovise o razdiobi baričkih sustava na širem području. Najčešći vjetrovi na Jadranu su bura (NNE do ENE), jugo (ESE do SSE) i maestral (WNW do NW). Osim navedenih pušu i vjetrovi iz smjera S (oštro), SW (lebić, garbin), W (pulenat), N do NW (tramontana), E (levant), te vjetrovi obalne cirkulacije (burin ili kopnenjak i zmorac). Ruža vjetrova na Jadranu je prikazana na slici 12. [5]



Slika 12. Ruža vjetrova na Jadranu [4]

U jesenskom i zimskom razdoblju najčešći vjetar na južnom Jadranu je jugo, a na sjevernom bura. Učestala je i pojava tramontane, naročito nad otvorenim morem, a lebić i lebićada se javljaju pri prolasku frontalnih sustava, i to češće u sjevernom nego u južnom Jadranu. Ljeti najčešće puše maestral, a jugo i bura su znatno rjeđi nego u zimskom razdoblju (slika 13).

Najjači se udari vjetra mogu očekivati u području između Rijeke i Starigrada s brzinama preko 50 m/s, a mjestimice i preko 60 m/s. Uz obalu Istre i kvarnerskih otoka udari vjetra dostižu 40 do 45 m/s. U Dalmaciji uz obalu udari bure dostižu 50 m/s, ponegdje do 60 m/s, a u području otvorenog mora i otoka vjetar može dostići brzinu do 60 m/s.

Vjetar jačine 6 bofora ili više puše uz obalu uglavnom 25 do 40 dana godišnje, a na izloženim mjestima može puhati i preko 100 dana u godini. Olujni vjetar (jačina 8 bofora ili više) puše rjeđe, obično 2 do 10 dana u godini. Najčešće se javlja u obalnom području kao bura, a rjeđe kao jugo, naročito na južnom Jadranu. [5]



Slika 13. Sezonska ruža vjetrova, broj dana sa jačinom vjetra većom od 8 bofora (N), i učestalost tišine (C) [5]

3.3. PRORAČUN SILA VJETRA

Snaga vjetra se klasificira prema Beaufortovoj skali raspona od 0-12 (tablica 7). Srednja brzina i smjer vjetra trebali bi se, u skladu s Beaufortovom skalom, zabilježiti 10 m iznad srednje razine mora i trebali bi se temeljiti na 10-minutnim prosjecima brzine i smjera vjetra.

Norveška uprava za naftu preporučila je da se maksimalna brzina vjetra, prosječna u kratkim vremenskim razdobljima, može dobiti množenjem stvarne 10-minutne srednje brzine vjetra s faktorima udara kao što je prikazano u tablici 8. [7]

Tablica 7. Beaufortova skala snage vjetra [21]

Beaufortova skala

		Brzina				Visina valova	
		km/h	m/s	kt	mph	m	ft
0 Bf	tišina	< 1	0 - 0.2	< 1	< 1	-	-
1 Bf	lahor	1 - 5	0.3 - 1.5	1 - 3	1-3	0.1 (0.1)	0.25 (0.25)
2 Bf	povjetarac	6 - 11	1.6 - 3.3	4 - 6	4 - 7	0.2 (0.3)	0.5 (1)
3 Bf	slabi	12 - 19	3.4 - 5.4	7 - 10	8 - 12	0.6 (1)	2 (3)
4 Bf	umjereni	20 - 28	5.5 - 7.9	11 - 16	13 - 18	1 (1.5)	3.5 (5)
5 Bf	umjereno jaki	29 - 38	8.0 - 10.7	17 - 21	19 - 24	2 (2.5)	6 (8.5)
6 Bf	jaki	39 - 49	10.8 - 13.8	22 - 27	25 - 31	3 (4)	9.5 (13)
7 Bf	žestoki	50 - 61	13.9 - 17.1	28 - 33	32 - 38	4 (5.5)	13.5 (19)
8 Bf	olujni	62 - 74	17.2 - 20.7	34 - 40	39 - 46	5.5 (7.5)	18 (25)
9 Bf	jaki olujni	75 - 88	20.8 - 24.4	41 - 47	47 - 54	7 (10)	23 (32)
10 Bf	orkanski	89 - 102	24.5 - 28.4	48 - 55	55 - 63	9 (12.5)	29 (41)
11 Bf	jaki orkanski	103 - 117	28.5 - 32.6	56 - 63	64 - 72	11.5 (16)	37 (52)
12 Bf	orkan	>= 118	>= 32.7	>= 64	>= 73	14 (-)	45 (-)

Tablica 8. Odnos između 10-minutne srednje vrijednosti brzine vjetra i faktora udara [7]

Trajanje vjetra	Faktor udara/naleta
3 s	1,35
10 s	1,30
15 s	1,27
30 s	1,21
1 min	1,15
10 min	1,0

Faktor naleta odnosno udara ovisit će o okolnim topografskim uvjetima lučkih bazena i smještaju same luke. Za samu luku i lučke operacije naleti vjetra koji su kraći od 1 minute nemaju velikog značenja, ali na nekim terminalima primjerice oko Sjevernog mora uočeno je da trajanje vjetra od 20-30 sekundi može utjecati na tankere u balastnom stanju.

Također, važno je poznavati odnos između jednosatne srednje vrijednosti brzine vjetra i srednjih vrijednosti vjetra za ostale vremenske intervale (trajanje vjetra), kako je prikazano u tablici 9.

Tablica 9. Odnos između jednosatne srednje brzine vjetra i faktora udara [7]

Trajanje vjetra	Faktor naleta/udara
3 s	1,56
10 s	1,48
1 min	1,28
10 min	1,12
30 min	1,05
1 h	1,00

Općenito, učinci vjetra na lučke konstrukcije i lučke operacije važnije su od utjecaja valova i morskih struja. [7]

Veličina brzine vjetra V_ω koja se primjenjuje u projektiranju varira od mjesta do mjesta i mora se procijeniti u svakom slučaju. Projektna brzina vjetra treba odgovarati maksimalnoj brzini naleta koja će djelovati na brod, a ne samo prosječnoj brzini tijekom određenog razdoblja. Kod usidrenih brodova trajanje naleta vjetra mora biti dovoljno da se razvije potpuno naprezanja konopa ili bokobrana, uzimajući u obzir inerciju broda. To može dovesti do smanjenja projektne brzine vjetra. Također treba uzeti u obzir da područje vjetra nije simetrično u odnosu na središnju liniju, što implicira razvoj momenta rotacije. Standardna opća formula za izračun sile vjetra na brod privezan uz vez: [7]

$$P_\omega = C_\omega \times [(A_\omega \times \sin^2 \varphi) + (B_\omega \times \cos^2 \varphi)] \times \gamma_\omega \times \frac{V_\omega^2}{2g} \quad (1)$$

Gdje je:

P_ω = sila vjetra u kilonjutnima (kN)

C_ω = koeficijent sile vjetra

A_ω = bočno projektirana površina broda iznad vode u m^2

B_ω = prednja površina broda iznad vode u m^2

V_ω = brzina vjetra u m/s

γ_w = specifična težina vode – morska voda $1,034 t/m^3$ – slatka voda $1,00 t/m^3$;

φ = kut smjera vjetra prema središnjoj liniji broda

g = ubrzanje sile teže $9,81 m/s^2$

Maksimalna sila vjetra u gornjoj jednadžbi je kada je $\varphi = 90^\circ$, tj. vjetar puše okomito na središnju liniju broda. [7]

Jačina sile vjetra koja djeluje na brod procjenjuje se korištenjem uobičajenog izraza, a za proračun je potrebno poznavati stvarne nadvodne površine brodova kao i značajnu brzinu vjetra. Sa stajališta maritimne sigurnosti nužno je postaviti najnepovoljniji slučaj i zbog toga se promjena sile vjetra ne uzimaju u obzir s pogledom na kut pod kojim vjetar puše u odnosu na uzdužnu simetralu broda. [7]

4. OCEANOGRAFSKI ELEMENTI

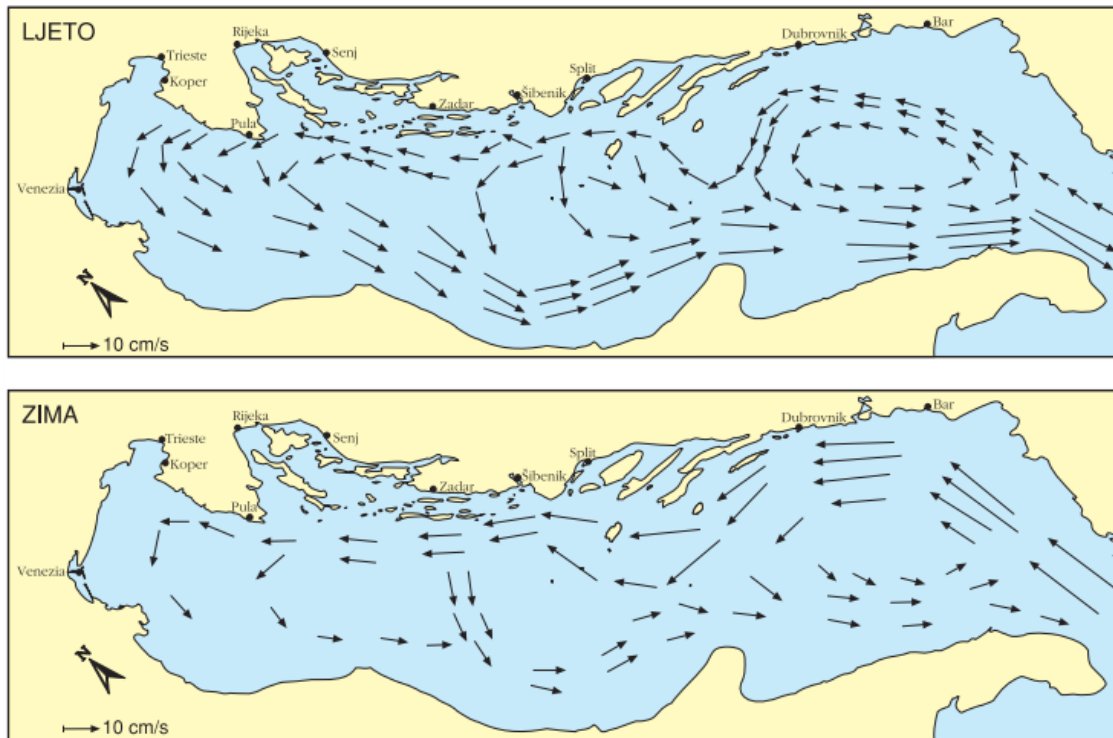
4.1. MORSKE STRUJE

Morska struja je horizontalno gibanje morske odnosno oceanske vode u nekom smjeru. To je razmjerno uska struja vode širine nekoliko desetina, po dubini više stotina metara, a duljine više tisuća kilometara. [1]

Za razliku od skalarnih veličina kao što su temperatura mora, visina razine mora ili salinitet, morska struja je vektorska veličina koja mora biti opisana iznosom i smjerom strujanja.[12]

U Jadranskom moru postiže brzine od 0,1 do 0,4 m/s te se javlja na površini i u raznim dubinama mora. Za razliku od smjera vjetra koji pušu iz smjera puhanja, morska struja teče u smjeru gibanja. Smjer struje se određuje prema zemljopisnim stranama prema kojima struja teče. [1]

Morske struje u Jadranu nemaju značajniji utjecaj na sigurnost plovidbe u području otvorenog mora. Brzina struja se mijenja u pojedinim područjima i vremenskim razdobljima. Srednje brzine morskih struja su oko 0,5 čv, ali u određenim uvjetima, naročito u uskim prolazima i u blizini riječnog ušća mogu dostići i do 4 čv. Smjer je također promjenjiv (i do 180°) u priobalnom i međuotočnom područje. Prosječne površinske struje u ljetnoj i zimskoj sezoni prikazne su na slici 14. [5]



Slika 14. Površinske morske struje ljeti i zimi (prema Zore-Armanda, 1976.) [5]

Da bi se što bolje razumjele karakteristike polja strujanja u Jadranskom moru, potrebno je poznavati osnovne sile uzročnice morskih struja: sila koja nastaje zbog horizontalnih razlika u gustoći mora uzrokuje gradijentske struje, plimotvorna sila uzrokuje struje morskih mijena te sila potiska vjetra koja nastaje djelovanjem tangencijalne napetosti vjetra na površinu mora uzrokuje struje drifta. Osim ovih sila uzročnica bitan utjecaj na morske struje ima i dimenzija i topografske karakteristike obale i morska dna određenog bazena. [5]

Veličina i smjer plimne struje i struje uzrokovane vjetrom se moraju procijeniti kako bi se utvrdilo bilo kakav utjecaj na operacije pristajanja brodova. Morska struja može nastati u lučkom bazenu zbog vjetra koji prenosi mase vode, razlike u temperature i sadržaju soli, učinka plime i oseke, protoka vode iz riječnih ušća. U nekim norveškim lukama koje se nalaze na ušćima rijeke, poznato je da imaju struje koje dosegnu brzinu i do 3 m/s ili 6 čvorova. [7]

4.2. VALOVI

Valovi su horizontalni gibanje odnosno prenošenje energije koju je zrak predao moru. Međutim u fizičkoj oceanografiji pod pojmom 'valovi' najčešće se misli o vertikalnim gibanjima morske površine. Kao i kod struja postoje sile uzročnice koje dovode do nastanka valova. Prema silama koje uzrokuju kolebanja odnosno oscilacije morske razine, tj. valova mogu se podijeliti na slobodne i prisilne. Slobodni valovi nastaju djelovanjem jednog impulsa. Takvi valovi nastaju npr. lomom te potom padom ledenih gromada u more. Toj skupini pripadaju i valovi mrtvog mora te seši, čiji period ovisi o dimenzijama bazena uznemirene vode. Prisilni valovi nastaju djelovanjem stalnih vanjskih sila – to su npr. vjetrovni valovi i morske mijene. [1]

Jadransko more je malo, poluzatvoreno more, karakteristično po intenzivnoj ciklonalnoj aktivnosti (osobito u zimskom razdoblju), iznad kojeg pušu vjetrovi različitih smjerova intenziteta. S oceanografskog gledišta, a posebno s aspekta generiranja površinskih valova uzrokovanih vjetrom, Jadransko more se smatra zatvorenim morem. Najfrekventnije površinske valove na Jadranu uzrokuju bura i jugo u zimskom periodu, te NW vjetar odnosno maestral u ljetnom periodu. Značajke površinskih valova uzrokovanih vjetrom općenito zavise od smjera, brzine i trajanja prevladavajućih vjetrova, veličine područja nad kojim ti vjetrovi pušu te topografije morskog dna.

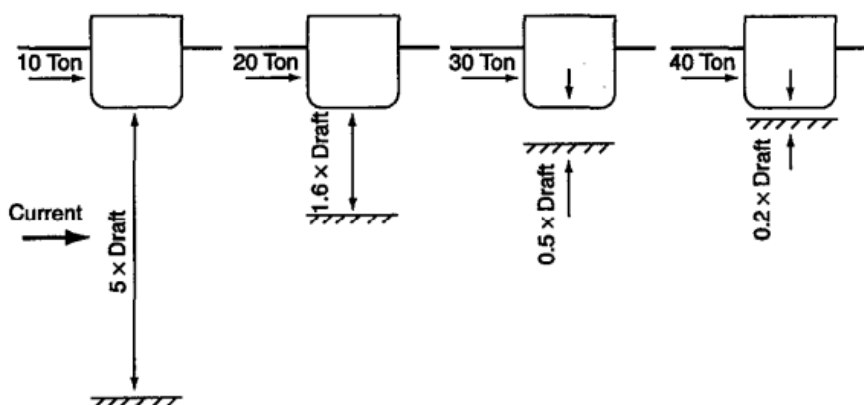
Stanje mora, s obzirom na valovitost, određuje se u skladu s Douglasovom ljestvicom koja je prikazana u tablici 10. [5]

Tablica 10. Douglasova ljestvica stanja mora [6]

STANJE MORA	OPIS	WMO	VISINA VALOVA (m)
0	mirno (bonaca)	calm (glassy)	0
1	mirno (naborano)	calm (rippled)	0 – 0,1
2	malo valovito	smooth	0,1 – 0,5
3	umjereno valovito	slight	0,5 – 1,25
4	valovito	moderate	1,25 – 2,5
5	jače valovito	rough	2,5 – 4
6	uzburkano	very rough	4 – 6
7	teško	high	6 – 9
8	vrlo teško	very high	9 – 14
9	izuzetno teško	phenomenal	> 14

4.3. PRORAČUN SILA MORSKIH STRUJA I VALOVA

Sile morskih struja koje djeluju na brod mogu značajno varirati ovisno o tipu i veličini broda i stoga ih je najbolje utvrditi ispitivanjem. Općenito, morske struje djeluju na brod zbog brzine i smjera slično kao i sile vjetra. Prilikom izračuna u morskim lukama uz kalkulacije sila vjetra dodajemo proračune morskih struja. Sile morskih struja su nešto kompliciranije u usporedbi sa silama vjetra zbog značajnog učinka razmaka ispod kobilice (slika 15). Razlog tomu je što se sila struja povećava što se udaljenost kobilice smanjuje.



Slika 15. Efekt sile morske struje u funkciji učinka razmaka ispod kobilice [7]

Opća standardna formula za izračun sile morskih struja na privezani brod [7]:

$$P_c = C_c \times \gamma_w \times A_c \times \left(\frac{V_c^2}{2g}\right) \quad (2)$$

gdje je C_c faktor za izračun poprečne i uzdužne sile. Ova veličina u velikoj mjeri ovisi o obliku broda i dubini vode duž prednjeg dijela veza. Faktori za izračun poprečne sile morske struje:

- za duboke vode, $C_c = 1,0 - 1,5$,
- dubina vode/gaz broda = 2, $C_c = 2,0$,
- dubina vode/gaz broda = 1,5, $C_c = 3,0$,
- dubina vode/gaz broda = 1,1, $C_c = 5,0$,
- dubina vode/gaz broda približno = 1, $C_c = 6,0$.

Faktori za izračun uzdužne sile morske struje variraju od 0,2 za duboke vode do 0,6 za dubinu vode kod projektiranog gaza broda približno 1.

γ_w = specifična težina morske vode 10,34 kN/m³

A_c = područje podvodnog dijela broda projiciranog na ravninu okomito na smjer morske struje

V_c = brzina morske struje u m/s

g = ubrzanje sile teže 9,81 m/s²

Sila valova koje mogu djelovati na brod španjolski standard ROM 0.2-90 je opisao sljedećom formulom:

Bočna ili poprečna sila vala u kilonjutnima:

$$F_{Twave} = C_{fw} \times C_{dw} \times \gamma_w \times H_s^2 \times D' \times \sin^2 \alpha \times 10 \quad (3)$$

Uzdužna sila vala u kilonjutnima:

$$F_{Lwave} = C_{fw} \times C_{dw} \times \gamma_w \times H_s^2 \times D' \times \cos \alpha \times 10 \quad (4)$$

gdje je:

$$D' = L_{bp} \times \sin \alpha + B \times \cos \alpha \quad (5)$$

gdje je:

C_{fw} = koeficijent vodne ravnine koji ovisi o valnoj duljini L_w i gazu broda D . Ako je $(2\pi/L_w) \times D$ veći od 1,4, tada je koeficijent vodne ravnine 0,064, a ukoliko je manji od 0,2, onda koeficijent vodne ravnine iznosi 0,0;

C_{dw} = koeficijent dubine ovisi o duljini vala L_w i dubini vode h . Ako je $(4\pi/L_w) \times h$ veći od 6,0, tada koeficijent dubine iznosi 1,0, a ako je $(4\pi/L_w) \times h$ je jednak 0,0, tada koeficijent dubine iznosi 2,0;

γ_w = specifična težina vode – morska voda 1,034 t/m³ – slatka voda 1,00 t/m³;

H_s = dizajnirana značajna visina vala;

α = kut između uzdužne osi broda, promatrano od pramca do krme i smjera vala;

D' = projekcija duljine broda u smjeru upadnih valova;

L_{bp} = duljina između perpendikulara;

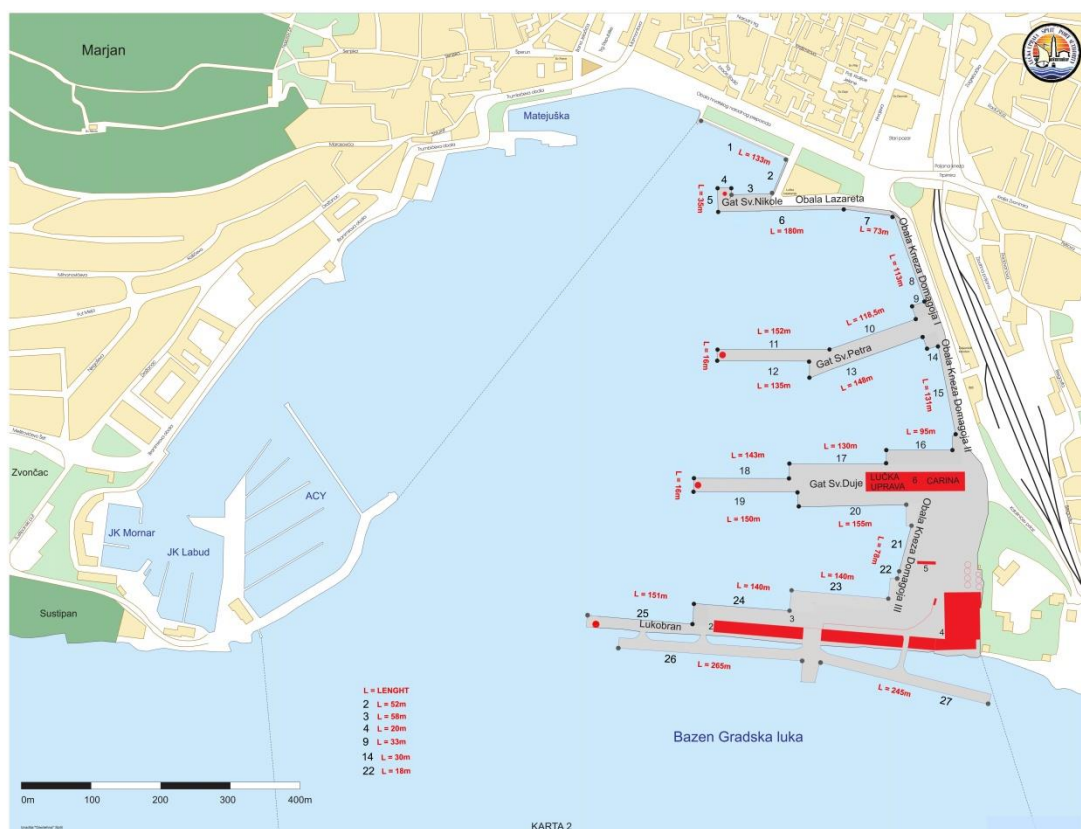
B = širina broda u najširoj točki;

D = gaz broda;

h = dubina vode na određenoj lokaciji. [7]

5. PRORAČUN SILE VJETRA, VALOVA I MORSKIH STRUJA U GRADSKOJ LUCI SPLIT

U ovom poglavlju prikazat će se proračuni sila vjetra, valova i morskih struja za područje Gradske luke Split. Temeljem formula koje su analizirane u poglavlju 4 prikazat će se iznosi sila koje djeluju na brod M/V Dubrovnik. Ovaj RO-RO brod, odnosno trajekt, uglavnom se veže i pristaje na Gatu sv. Petra (slika 16).



Slika 16. Prikaz gata sv. Petar [21]

Sila vjetra ima najveći utjecaj na sigurnost brodova i drugih plovila tijekom manevriranja i veza u samoj gradskoj luci. Nadvodne površine brodova na koje djeluje vjetar procijenjene su temeljem vrijednosti za brodove sličnih svojstava i veličine koja se namjeravaju i mogu prihvaćati na mjestima priveza na Gatu sv. Petra na putničkom terminalu luke Split. Ključna stvar kod izračuna sile vjetra na brod jest poznavanje nadvodnih (poprečna i uzdužna) površine broda. Za brod M/V Dubrovnik izračunata je prednja uzdužna površina broda 366 m^2 i bočna poprečna površina broda 1993 m^2 iznad vode do kojih se došlo primjenom programskog alata Progecad (slika 17).



Slika 17. Prikaz površina broda M/V Dubrovnik

Nadalje, koeficijent sile vjetra iz formule (1) je uzet ovisno o površini na koju se računa sila vjetra. Kada se govori o poprečnoj površini broda iznad mora, tada se uzima koeficijent sile vjetra 1,3, a kod izračuna za uzdužnu stranu broda koristi se koeficijent 0,9. [7]

Ono što je bitno u analizi izračuna sila su procijenjene brzine vjetra. Na osnovi meteoroloških analiza prikazanih u poglavlju 3, uzete su jednominutne vrijednosti: 25 m/s, 30 m/s i 35 m/s. Kako je vjetar određen smjerom i brzinom bitno je istaknuti na koju stranu broda vjetar djeluje odnosno je li to poprečna ili uzdužna strana. U tablici 11 su prikazane sile vjetra na brod M/V Dubrovnik koji je vezan na Gat sv. Petra sa sjeverne strane. Iz tablice 11 se vidi da su i poprečna i uzdužna sila vjetra gotovo 2 puta veće za brzinu vjetra od 35 m/s u odnosu na brzinu vjetra od 25 m/s.

Tablica 11. Sile vjetra na brod u kN

Površina broda	Brzina vjetra u m/s		
	25	30	35
	Sila vjetra u kN		
Poprečna	1011,0	1456,0	1981,6
Uzdužna	128,5	185,1	251,9

Statističke vrijednosti brzina morskih struja na području Gradske luke Split prikazane su u tablici 6. Prema Peljaru za male brodove, strujanje unutar luke je pretežito anticiklonalno, a brzine struja za vrijeme orkansog vjetra prelaze vrijednost od 0,5 čv. [5]

Korištenjem formule (2), izračunate su sile morske struje koje djeluju na M/V Dubrovnik kada je privezan na Gat sv. Petra. Bitno je naglasiti da su pretpostavljene tri brzine morskih struja: 0,5 m/s, 0,75 m/s i 1 m/s. Osim pretpostavljenih brzina morskih

struja bitno je znati površinu broda na koji one djeluju: podvodna poprečna (573 m²) i podvodna uzdužna (48 m²) površina (slika 17). Omjerom dubine na kojem se brod nalazi (prosječna dubina kod Gata sv. Petra je 8 m) i gaza broda (4,8 m) dobiju se potrebni uzdužni (0,6) i poprečni (3,0) faktori.

Tablica 12. Sile morske struje na brod u kN

Površina broda	Brzina morske struje u m/s		
	0,5	0,75	1,0
	Sile morske struje u kN		
Poprečna	226,5	509,6	905,9
Uzdužna	3,9	8,6	15,2

Stoga se može zaključiti da je utjecaj morskih struja tijekom manevriranja i boravka brodova na Gatu Sv. Petra znatno manji od utjecaja vjetra.

Postavljanje plutače u bazen Gradske luke Split za mjerenje valova u samoj luci nije dolazio u obzir. Razlog tomu je smanjenje sigurnosti slobodnog manevriranja brodova i brodica u samom bazenu. Stoga su potrebni parametri za proračun sila valova u morskoj luci uzeti iz rezultata numeričkog modela vjetra lebića kao što je prikazano na slici 11. Iz toga modela je vidljivo valovi pod utjecajem lebića dolaze skroz do središnjeg dijela rive te se reflektiraju prema sjevernoj strani Gata sv. Petra. Ono što je bitno za proračun sile valova (formule 3,4 i 5) jest ta visina reflektiranog vala koja iznosi nekih 0,5 do 1,5 m. Osim toga, reflektirani val na temelju slike 11 približno ima valnu duljinu od 5 m. Temeljem valne duljine dobije se koeficijent vodne ravnine C_{fw} koji iznosi 0,064 i koeficijent dubine C_{dw} koji iznosi 1,0. Osim navedenih podataka tu su još tehnički podatci M/V Dubrovnika poput gaza (4,8 m), širine broda (18,6 m) te dužine između perpendikulara (118 m). Kako brod M/V Dubrovnik pristaje sa sjeverne strane, smjer djelovanja valova na brod jest samo na poprečnu stranu broda (pod kutevima od 45° i 90°).

Tablica 13. Prikaz sila valova na brod u kN

Smjer udara vala	Značajna visina vala u m		
	0,5	1,0	1,5
	Sila valova u kN		
Poprečno (90°)	195,2	780,9	1757,0
Poprečno (45°)	79,1	316,5	712,1

U tablici 13 prikazane su sile valova koje djeluju na M/V Dubrovnik za vrijeme olujnog lebića dok je brod vezan uz sjevernu stranu Gata sv. Petra.

Usporedbom tablica 11, 12 i 13, vidljivo je da sile vjetra imaju najveći utjecaj na sigurnost i manevriranje brodova u Gradskoj luci Split.

Premda znatno veći utjecaj vjetar ima na poprečnu stranu broda, sila vjetra na uzdužnu stranu broda nije zanemariva. Sila vjetra za poprečnu i za uzdužnu stranu broda gotovo se udvostručila porastom brzine vjetra u rasponu od samo 10 m/s.

Iako brzine morskih struja u bazenu Gradske luke Split nisu značajne zbog same zaštićenosti luke, one djeluju na brod određenom silom. Znatno manji utjecaj imaju nego sila vjetra, ali pojavom orkanskih vjetra brzine morskih struja u luci mogu doseći i brzine veće od 0,5 čvorova. Iz tablice 12 vidljivo je značajno povećanje sile morske struje od oko 5 puta porastom brzine struje za 0,5 m/s.

Ono što je bitno naglasiti kod valova u bazenu splitske luke jest da su se u ovom radu procijenili određeni valni parametri na temelju numeričkog modela MIKE 21 širenja valova sa slike 11. Razlog tomu je nedostatak podataka zbog nemogućnosti postavljanja plutače u bazen splitske luke. Premda pojava lebića ovakvih slučajeva nije učestala te se u prosjeku javlja svakih 10-15 godina ne smije se zanemariti posebno u današnja vremena kad dolazi do naglih klimatskih promjena koje mogu povećati učestalost ekstremnog lebića. Iz tablice 13 je vidljivo da reflektirani val od 1,5 m ima gotovo deset puta veću silu nego onaj od 0,5 m.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu su analizirani proračuni sila vjetrova, morskih struja i valova na brodove u luci odnosno na vezu, a posebno je odabran brod M/V Dubrovnik koji pristaje na Gatu sv. Petra u Gradskoj luci Split. S obzirom na to da se u radu spominje morska luka, dana je njena definicija te razvrstaj i funkcija, prema Zakonu o pomorskom dobru i morskim lukama. Osim toga, opisana je procedura projektiranja morske luke Split na temelju meteoroloških i oceanografskih elemenata.

Pojava i klasifikacija vjetra na Jadranu ponajviše ovisi o razdiobi baričkih sustava na širem području. Morske struje na Jadranu nemaju prevelik značaj i utjecaj na plovidbu, ali nisu zanemarive pogotovo u nekim uskim prolazima i tjesnacima. Valovi na Jadranu su popraćeni vjetrovima koji ih uzrokuju pa tako najfrekventnije i najviše površinske valove stvaraju bura, jugo, maestral te u određenim uvjetima i lebić.

Poznavanje meteoroloških odnosno oceanografskih elemenata je neizbježno prilikom raznih hidrotehničkih zahvata bilo to u samoj luci ili negdje na otvorenom moru. Projektiranje luke nije moguće bez da se utvrde iznosi sile vjetra, morskih struja i valova koje bi vjerojatno stvarali problem samoj luci ili nekoj lučkoj operaciji, odnosno ta luka ne bi osigurala sigurnost za same brodove koji manevriraju, isplovljavaju ili uplovljavaju u nju.

U ovom radu je prikazana analiza i proračuni sila vjetrova, morskih struja i valova u Gradskoj luci Split. Temeljem formula koje su navedene, izračunale su se sile koje djeluju na privezani brod M/V Dubrovnik sa sjeverne strane Gata sv. Petra. Najveći utjecaj za brodove i samu luku imaju vjetrovi, a kao najopasnije možemo izdvojiti jugo i lebić jer stvaraju valove zbog svog djelovanja. Nadalje, morske struje nisu toliko izražene u samom bazenu Gradske luke Split, ali prilikom orkanskog vjetra površinske morske struje znaju postići brzinu veću od 0,5 čvorova. Valovi u Gradskoj luci Split nemaju točne zapise zbog manjak mjerenja, odnosno ne postoje adekvatna mjerenja valova u luci zbog nemogućnosti postavljanja plutače radi gustog prometa i same sigurnosti brodova. Međutim pojava lebića uzrokuje visoke valove u luci te na to treba itekako obratiti pozornost.

Na kraju se može zaključiti, da su saznanja o silama vjetra, morskih struja i valova koje se javljaju u nekoj luci je od velike važnosti za njezino planiranje i projektiranje. Srećom te sile je danas vrlo lako naći, odnosno izračunati pomoću raznih nacionalnih standarda i proračun.

LITERATURA

- [1] Gelo, B.: *Opća i pomorska meteorologija*, Sveučilište u Zadru, 2010.
- [2] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=40416>
- [3] <https://www.vjetroelektrane.com/sto-je-vjetar>
- [4] <http://marjan.hr/wp-content/uploads/sites/318/2015/01/ruza.gif>
- [5] *Peljar za male brodove*, 1. Dio, Piranski zaljev-Virsko more, Hrvatski hidrografski institut, Split 2002.
- [6] Begonja, M.: *Djelovanje vanjskih sila na projektiranje lučkih građevina*, Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci.
- [7] Thoresen, C.: *Port designer's handbook: recommendations and guidelines*, 2003.
- [8] Dundović, Č. i Plazibat, V. (2011). Lučka i prometna infrastruktura Republike Hrvatske. *Pomorstvo*, 25 (1), 209-222.
- [9] Kovačić, M. (2002). Specifičnost razvoja luka posebne namjene u Primorsko-goranskoj županiji. *Pomorski zbornik*, 40(1), 177-204.
- [10] Ban, I. (1998). Pomorski promet kao čimbenik razvitka Hrvatske. *Naše more*, 45 (1-2), 45-51.
- [11] Žanetić, S. (2019). Strategija razvoja luke d.d. Split (Doctoral dissertation, University of Split. Faculty of economics, Split).
- [12] Domijan, N., Mihanović, H., Leder, N., & Gržetić, Z. (2005). Harmonička i spektralna analiza morskih struja u sjevernom dijelu Riječkog zaljeva. *Pomorski zbornik*, 43(1), 193-205.
- [13] <https://zakon.hr/z/310/Pomorski-zakonik>
- [14] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=64995>
- [15] Izv.prof.dr.sc. Nenad Leder, Pomorski nautički inženjering – predavanje 2021./2022.
- [16] Izv.prof.dr.sc. Nenad Leder, Pomorski nautički inženjering - morske luke, predavanje 2021./2022.
- [17] <https://hr.emsayazilim.com/definici-n-de-puerto-mar-timo>
- [18] https://www.enciklopedija.hr/Ilustracije/NV_094.jpg
- [19] <https://www.autopress.hr/wp-content/uploads/2021/07/luka-omis-696x429.jpg>
- [20] https://tehnika.lzmk.hr/wp-content/uploads/2018/05/HTE_0999.jpg
- [21] <https://portsplit.hr/luka-split/lucka-podrucja/bazen-gradska-luka/>

POPIS SLIKA

Slika 1. Morska luka Split [20].....	7
Slika 2. Lukobrani morske luke [18]	9
Slika 3. Idejno rješenje luke Omiš [15]	12
Slika 4. Dijagram toka projektiranja lukobrana [6].....	14
Slika 5. Akvatorij južne gradske luke Rovinj s označenim smjerovima vjetra iz III. i IV. kvadranta [6].....	16
Slika 6. Godišnja ruža vjetrova za područje Splita u razdoblju od 2006. do 2015. godine [15]	17
Slika 7. Sezonska ruža vjetrova za zimu na području Splita u razdoblju od 2006. do 2015. godine [15].....	18
Slika 8. Sezonska ruža vjetrova za ljeto na području Splita u razdoblju od 2006. do 2015. godine [15].....	18
Slika 9. Pozicije mjerenja morskih struja u luci Split (ASS-1, ASS-2, ASS-3) [15]	20
Slika 10. Smjerovi dominantnih vjetrova na luku Split [15].....	22
Slika 11. Gradska luka Split – rezultati numeričkog modela MIKE 21 širenja valova za vrijeme oštra i lebića (dole) i fotografija luke za vrijeme lebića (gore) [15]	23
Slika 12. Ruža vjetrova na Jadranu [4].....	25
Slika 13. Sezonska ruža vjetrova, broj dana sa jačinom vjetra većom od 8 bofora (N), i učestalost tišine (C) [5].....	26
Slika 14. Površinske morske struje ljeti i zimi (prema Zore-Armanda, 1976.) [5]	30
Slika 15. Efekt sile morske struje u funkciji učinka razmaka ispod kobilice [7]	32
Slika 16. Prikaz gata sv. Petar [21].....	34
Slika 17. Prikaz površina broda M/V Dubrovnik	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Funkcijski kriterij kod projektiranja dogradnje luke Rovinj [6].....	15
Tablica 2. Očekivani maksimalni udari vjetra, te pripadne vjerojatnosti za povratna razdoblja od T godina dobivenih Jenkinsonovom razdiobom ekstrema iz podataka mjerenja brzine vjetra za područje Splita, 2006. – 2015. [15].....	19
Tablica 3. Srednji i mjesečni broj dana s orkanskim vjetrom s pripadnom standardnom devijacijom za Split od 2006. do 2015. godine [15].....	19
Tablica 4. Statistički parametri morskih struja na postaji ASS-1 u vremenskom razdoblju od 2006. do 2015. [15]	21
Tablica 5. Statistički parametri morskih struja na postaji ASS-2 u vremenskom razdoblju od 2006. do 2015. [15]	21
Tablica 6. Statistički parametri morskih struja na postaji ASS-3 u vremenskom razdoblju od 2006. do 2015. [15]	21
Tablica 7. Beafortova skala snage vjetra [21]	27
Tablica 8. Odnos između 10-minutne srednje vrijednosti brzine vjetra i faktora udara [7]....	27
Tablica 9. Odnos između jednosatne srednje brzine vjetra i faktora udara [7]	28
Tablica 10. Douglasova ljestvica stanja mora [6].....	31
Tablica 11. Sile vjetra na brod u kN	35
Tablica 12. Sile morske struje na brod u kN	36
Tablica 13. Prikaz sila valova na brod u kN.....	36

POPIS KRATICA

NNE (eng. North North East)	sjever sjevero istok
ENE (eng. East North East)	istok sjevero istok
ESE (eng. East South East)	istok jugo istok
SSE (eng. South South East)	jugo jugo istok
WNW (eng. West North West)	zapad sjevero zapad
NW (eng. North West)	sjevero zapad
S (eng. south)	jug
W (eng. West)	zapad
N (eng. North)	sjever
E (eng. East)	istok
m/s	metar po sekundi
s	sekunda
min	minute
čv	čvorovi
m	metar
p	tlak vjetra
P_{ω}	sila vjetra
C_{ω}	koeficijent sile vjetra
A_{ω}	bočno projektirana površina broda iznad vode
Sin	sinus
Cos	kosinus
φ	kut smjera vjetra prema središnjoj liniji broda
L_s	duljina broda
L_Q	duljina kontakta
P_c	sila morske struje
C_c	faktor za izračun poprečne i uzdužne sile
γ_{ω}	specifična težina morske vode
A_c	podvodni dio broda projektiran na ravninu okomito na smjer sutre
V_c	brzina morske struje
g	akceleracija gravitacije

kN	kilonjutni
F_{Twave}	bočna sila vala
F_{Lwave}	uzdužna sila vala
m^2	metar na kvadrat
C_{fw}	koeficijent vodne ravnine
C_{dw}	koeficijent dubine
γ_w	specifična težina vode
Hs	dizajnirana značajna visina vala
α	kut između osi broda, promatrano od pramca do krme i smjera vala
D'	projekcija duljine broda u smjeru upadnih valova
L_{bp}	duljina između perpendikulara
B	širina broda u najširoj točki
D	gaz broda
h	duljina vode na određenom mjestu