

# Optimizacija pomorske plovidbe

---

**Biondić, Nehaj-Mile**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:440168>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2021-07-25**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

**NEHAJ – MILE BIONDIĆ**

**OPTIMIZACIJA POMORSKOG PUTOVANJA**

**ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2020. godina

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

**OPTIMIZACIJA POMORSKOG PUTOVANJA**  
**VOYAGE OPTIMIZATION**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Planiranje putovanja

Mentor: dr. sc. Đani Mohović

Student: Nehaj – Mile Biondić

Studijski smjer: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0115055194

Rijeka, rujan 2020. godina.

Student: Nehaj – Mile Biondić

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0115055194

## **IZJAVA**

kojom potvrđujem da sam završni rad s naslovom „Optimizacija pomorskog putovanja“ izradio samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Đanija Mohovića.

U radu sam primijenio metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan sam s objavom završnog rada na službenim stranicama Fakulteta.

Student

Nehaj – Mile Biondić

## SAŽETAK

U radu sam istraživao temu optimizacije pomorske plovidbe koja se veže na planiranje plovidbe u pomorstvu. Iako je planiranje plovidbe sastavni dio svakog pomorskog putovanja koje se najčešće izvodi od strane časnika palube, često nismo zadovoljni s očekivanim konačnim ishodom te se onda obraćamo specijaliziranim ustanovama u cilju rješavanja ove problematike. Iste, koristeći propisane metode, prilagođavaju putovanje onim faktorima koje treba zadovoljiti. Uz dugogodišnja istraživanja i svu postojeću suvremenu tehnologiju, zaista je iznimno teško postići optimalno. Ističe se činjenica da zapovjednik broda nije dužan cijelim putem provesti plovidbu prema optimiziranom planu, već je koristi kao preporuku. Razlog tome je nepredvidivost niza čimbenika koji potencijalno mogu dovesti brod do nepouzdanosti. Štoviše, cilj ovog rada je približiti metode optimizacije krajnjem korisniku kako bi lakše rukovodio samim operacijama.

Ključne riječi: pomorska plovidba, optimizacija plovidbe, načela optimizacije, metoda izokrona, PARETO optimizacija, 3dmi metoda

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK</b> .....	<b>I</b>
<b>SADRŽAJ</b> .....	<b>I</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. NAČELA OPTIMIZACIJE POMORSKOG PUTOVANJA</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. TEHNOLOŠKI UVJETI OPTIMIZACIJE</b> .....	<b>2</b>
2.1.1. <i>Maritimna svojstva broda</i> .....	3
2.1.1.1. Veličina broda .....	3
2.1.1.2. Propulzija.....	4
2.1.1.3. Upravljivost broda .....	5
2.1.1.4. Brzina broda .....	5
<b>2.2. OKOLIŠNI UVJETI OPTIMIZACIJE</b> .....	<b>7</b>
2.2.1. <i>Vjetar</i> .....	8
2.2.2. <i>Valovi</i> .....	8
2.2.3. <i>Magla</i> .....	9
2.2.4. <i>Morske struje</i> .....	10
2.2.5. <i>Led</i> .....	10
<b>2.3. OTPOR BRODA</b> .....	<b>10</b>
2.3.1. <i>Otpor trenja</i> .....	11
2.3.2. <i>Otpor valova</i> .....	12
2.1.1.5. Jamesova krivulja gubitka brzine po stanju mora.....	13
2.3.3. <i>Otpor zraka</i> .....	14
2.3.4. <i>Otpor kormila</i> .....	14
<b>2.4. FUNKCIJA CILJA</b> .....	<b>15</b>
<b>3. JEDNOCILJNE METODE OPTIMIZACIJE</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1. METODA IZOKRONA</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2. MODIFICIRANA METODA IZOKRONA</b> .....	<b>17</b>
<b>3.3. METODA ISOPONE</b> .....	<b>18</b>
<b>3.4. RAČUN VARIJACIJE</b> .....	<b>19</b>
<b>3.5. DINAMIČKO PROGRAMIRANJE</b> .....	<b>19</b>
<b>3.6. MODEL DINAMIČKOG TRIMA BRODA</b> .....	<b>20</b>

<b>4. VIŠECILJNE METODE OPTIMIZACIJE .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1. PARETO – OPTIMALNO .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2. 3DMI METODA (THREE DIMENSIONAL MODIFIED ISOCHRONE).....</b>	<b>22</b>
<i>4.2.1. Odabir težinskog faktora.....</i>	<i>24</i>
<b>4.3. NEDOMINANTAN SORTIRAJUĆI GENETSKI ALGORITAM -NSGA.....</b>	<b>24</b>
<b>4.4. NEDOMINANTAN SORTIRAJUĆI GENETSKI ALGORITAM II - NSGAI</b>	<b>26</b>
<b>4.5 DIJKSTRA ALGORITAM .....</b>	<b>26</b>
<b>5. PRUŽATELJ USLUGA OPTIMIZACIJE .....</b>	<b>28</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>30</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>31</b>
<b>POPIS ILUSTRACIJA .....</b>	<b>32</b>
<b>POPIS KRATICA .....</b>	<b>33</b>

# 1. UVOD

Planiranje pomorske plovidbe je kompleksan zadatak iz razloga što obuhvaća međudjelovanje raznih čimbenika. Prioritetno se gleda uvjet sigurnosti izvršavanja plovidbe, kako za ljude tako i za okoliš, a zatim i operativna iskoristivost. Optimizacija u generalnom smislu znači ostvarivanje najboljih rezultata rada u zadanim okolnostima. U primjeni definicije, rad je zapravo pomorsko putovanje, a prilagodbom na zadane okolnosti na tom putovanju mijenja se konačni rezultat. Valja istaknuti da je riječ *optimalan* pridjev koji dolazi iz latinskog jezika - *optimus* što znači *najbolji*. On se kao takav ne komparira pa zato ne postoji optimalniji ili najoptimalniji. Dakle, ako za nešto kažemo da je optimalno, ono u sebi nosi maksimum svoje kvalitete. Jedini pojam koji umanjuje značenje riječi *optimalno* je *suboptimalno* što znači da je za „razinu“ manje od najveće kvalitete.

U svrhu osiguravanja sigurnosti i ljudi i okoliša, moramo se koristiti svim raspoloživim sredstvima i saznanjima kako bi priveli samu plovidbu kraju s težnjom k optimalnom. Nažalost, pošto su određeni čimbenici promjenjivi, vrlo se teško postiže optimalno, pogotovo u vremenima kada se planiranje pomorskog putovanja radilo „ručno“ pomoću nautičkih karata. Ogroman napredak u tom pravcu postignut je razvojem računala i softvera koji se izričito bave problematikom optimizacije cijelog pomorskog putovanja ili samo jednog dijela. U svom završnom radu navest ću osnovne čimbenike koji utječu na pomorsku plovidbu te načine njihove evaluacije i integracije u kompleksne metode same optimizacije iste.



## **2. NAČELA OPTIMIZACIJE POMORSKOG PUTOVANJA**

Poštujući činjenicu da je gotovo nemoguće u pomorskom putovanju pronaći optimalno za sve inačice koje su dio samog putovanja, vrlo je važno odrediti funkciju cilja i težnju k optimalnim prilagoditi tom cilju. S tom odredbom reduciramo niz drugih čimbenika i koncentriramo se na nama važne stvari u zadanom trenutku. Plan provedbe plovidbe za svako putovanje vrlo je različit. Plovidba može biti od ekonomske koristi koja se ostvaruje prijevozom putnika i/ili tereta, iskorištavanjem mora i podmorja te korištenjem u svrhe znanstvenih istraživanja ili plovidbe u rekreativne ili vojne svrhe. Zbog različitosti razloga provedbe plovidbe, različite su i funkcije cilja. Pomorsko putovanje je dio nekog složenijeg procesa pa se ne smijemo fokusirati na optimalno kao dio samog putovanja nego kao dio cjelokupnog procesa imajući u vidu da će nam stajalište optimalnog biti promjenjivo. Moramo biti svjesni činjenice da je svaki brod drugačije veličine i namjene te stoga ima i drugačija maritimna svojstva. Osim sigurnosnih uvjeta koji moraju biti zadovoljeni, funkcija cilja obuhvaća ostale uvjete optimizacije. Oni se mogu podijeliti na tehnološke i okolišne uvjete navedene u daljnjem tekstu.

### **2.1. TEHNOLOŠKI UVJETI OPTIMIZACIJE**

Tehnološki uvjeti optimizacije su tehnološka obilježja broda kao prijevoznog sredstva te načini njegovog iskorištavanja. Pod njih spadaju razne značajke i obilježja kao što su veličina broda, dubina gaza, plovnost, upravljivost i čvrstoća pa sve do nosivosti, zapremnine, broja posade/putnika, tipa tereta, porivne snage te vrste pogona i propulzije.

Uvjete u ovoj skupini nazivamo statičkim iz razloga što se ne mijenjaju tijekom vremena ili imaju manje i predvidive promjene kao npr. promjena gaza broda tokom putovanja uslijed potrošnje goriva. Kao takvi, u pravilu se mogu matematički izraziti i izračunati u zadovoljavajućoj razini točnosti. U ovu skupinu ulaze i promjenjivi uvjeti kao npr. cijena goriva ili pak potrošnja goriva pri određenoj brzini, a nameću se ekonomskom iskorištavanju broda. Određene promjenjive uvjete možemo s lakoćom matematički izračunati.

### 2.1.1. Maritimna svojstva broda

Brod pri plovidbi stvara poremećaje okoliša tj. vode i zraka. Oni se direktno opiru njegovom gibanju. Maritimna svojstva broda kod optimizacije pomorskog putovanja primarno se gledaju kroz ponašanje broda pri određenom stanju mora i atmosfere.

Otpor trupa broda u vodi različite gustoće, otpor vjetra ili otpor valova iziskuje različitu učinkovitost porivnog stroja, odnosno potrošnju goriva. Snaga brodskog poriva mora biti veća od zbroja svih otpora ukoliko očekujemo gibanje broda. Zato se možemo matematički izraziti i izračunati potrebnu silu poriva s obzirom na hidrodinamičke i aerodinamičke sile otpora. Za ove izračune moramo imati točne podatke matematičkog opisa podvodnog i nadvodnog dijela broda, podatke o snazi stroja i obilježjima djelovanja porivnog vijka (vrsta, mehanika, iskoristivost i kavitacija), točne podatke statičke i dinamičke stabilnosti, regresijske studije i provjere na temelju ispitivanja i brodskih bilješki.

#### 2.1.1.1. Veličina broda

Jedno od osnovnih obilježja svakog broda je njegova veličina. Veličina broda izražava se kroz istisninu, duljinu, širinu te dubinu gaza. Deplasman ili istisnina broda, koju izražavamo u tonama, čini masa praznog broda i nosivost broda. Nosivost se dijeli na korisnu (ukrcajni kapacitet do ograničenja teretne vodene linije) i neposrednu (mase goriva, zaliha, posade te ostale nepoznate mase). Pažnja se pridaje rasporedu masa na brodu jer izravno utječe na težište istisnine. U pogledu optimizacije, deplasman je promjenjiva varijabla obzirom da brod može biti i nenakrcan.

Kod brodskih dimenzija, poznamo tri duljine; duljina preko svega (engl. length over all -  $L_{OA}$ ), duljina na vodenoj liniji (engl. loaded waterline length -  $L_{WL}$ ) te duljina između pramčane i krmene okomice odnosno perpendikulara (engl. length between perpendiculars -  $L_{PP}$ ). Za izračun sile otpora i snage propulzija koristi se duljina vodene linije. Brodska duljina iznimno utječe na gotovo sva maritimna svojstva broda.

Konstruktivsku širinu ili širinu podvodnog dijela broda gledamo na presjeku glavnog rebra, između vanjskih bridova oplata te je označavamo kao širinu na konstrukcijskoj vodenoj liniji ( $B_{KVL}$ ).

Gaz broda je udaljenost između kobilice i vodene linije odnosno visina podvodnog dijela broda. Osim utjecaja na manevarska svojstva, širina broda i gaz predstavljaju glavna

ograničenja plovnog puta tijekom prolaska kroz kanale ili prilaza i priveza u luci. Važno je napomenuti da gaz broda određuje slobodne visine ispod kobilice (engl. *underkeel clearance*).

### 2.1.1.2. Propulzija

Kako bi pobudili gibanje broda moramo proizvesti poriv koji će nadvladati sumu sila svih otpora. Pomoću propulzora, moment rotacijskog gibanja pretvaramo u poriv translacijskog gibanja. Kao posljedica pretvaranja energije javlja se gubitak kinetičke energije koji se manifestira ubrzavanjem strujanja vode uz vijak te stoga, iskoristivost propulzije izražavamo kroz omjer snage proizvedene porivom i snage koja dolazi do samog propulzora, formulom:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_E}{P_D} = \frac{R_T \times V_S}{Q \times 2\pi \times n} \quad (1)$$

gdje je:

$P_E$  - efektivna snaga (engl. *effective power*) – potrebna sila za svladavanje otpora (kW),

$R_T$  – ukupni otpor broda (kN),

$V_S$  – brzina broda (m/s),

$P_D$  – snaga dovedena propulzoru (engl. *delivered power*) (kW),

$Q$  – moment koji se dovodi propulzoru (kNm),

$n$  – broj okretaja (1/s).

Iskoristivost propulzora uvelike ovisi o tipu broda, tipu propulzije i kavitaciji. Kavitacija ima iznimno negativan učinak na iskoristivost propulzije. Uslijed povećanja brzine, mjesni tlak postaje niži od tlaka isparavanja vode. Rezultat je stvaranje mjehurića koji nošeni strujom, u dodiru s mjestom većeg tlaka (u ovom slučaju područje broskog vijka) implodiraju te na dijelovima površine broskog vijka dolazi do erozije. Ponekad su štetni učinci kavitacije toliko intenzivni da zbog oštećenja vijka može doći do vibracija koje se prenose na trup broda.

### **2.1.1.3. Upravljivost broda**

Veoma bitno maritimno svojstvo broda tokom plovidbe je upravljivost s obzirom na usmjeravanje, a posebice u ograničenim plovidbenim područjima. Upravljivost se opisuje kao sposobnost kontrole brodskih gibanja uz pomoć njegovih uređaja za upravljanje. Aktivne uređaje pokreću motori te koriste energiju sa broda; sustavi propulzija i kormila. Pasivni uređaji koriste kinetičku energiju za bolju upravljivost pa tu ubrajamo kobilicu, ljuljne kobilice te krmenu peraju.

Upravljivost promatramo kroz napredovanje broda (engl. *advance*), bočni pomak (engl. *transfer*), taktički promjer (engl. *tactical diameter*) te konačni promjer (engl. *final diameter*). Napredovanje broda je udaljenost koju brod prevali pri usmjeravanju od kursa pri otklonu kormila pa sve do trenutka postizanja željenog novog kursa. Bočni pomak je okomita udaljenost na početni kurs od trenutka kada je kormilo prebačeno sve do postizanja željenog novog kursa. Taktički promjer je udaljenost krajnjih točaka od početnog kursa do okretaja broda za 180°. Konačni promjer okreta broda dobijemo potpunim otklonom kormila sve dok se ne okrenemo do početnog kursa. Kod brodova većih dimenzija, odaziv na relaciji kormilo – brod je sporiji pa je poželjno poznavanje prevaljenog puta od trenutka otklona kormila do samog početka promjene kursa (engl. *wheel over point*) i trenutka kada otklon treba vratiti (engl. *counter rudder point*) kako bi vrijednost promjene kursa ostala na zadanom (engl. *rate of turn*). Kod upravljivosti broda poznajemo još dva manevarska obilježja u nuždi: duljina bezporivnog zaustavnog puta (engl. *stopping distance*) i duljina zaustavnog puta korištenjem poriva (engl. *crash astern stopping distance*).

### **2.1.1.4. Brzina broda**

Brzina je vektorska fizikalna veličina koja pokazuje vrijednost prevaljenog puta u jedinici vremena. U pomorstvu, brzinu iskazujemo u čvorovima što je zapravo broj prevaljenih nautičkih milja u vremenskom intervalu od jednog sata. Tijekom same plovidbe razlikujemo dvije vrste brzina:

1. brzina kroz vodu (engl. *speed through water* -  $S_{TW}$ )
2. brzina preko dna (engl. *speed over ground* -  $S_{OG}$ )

Razliku čini to što je brzina kroz vodu ona brzina koju bi brodski poriv trebao postizati pri idealnim uvjetima, dok je brzina preko dna zapravo brzina kroz vodu korigirana za utjecaje vjetra, valova, trenja te morskih struja. Tu valja pripaziti pošto korekcija ne znači nužno smanjenje brzine. Isto tako postoji i kritična brzina koja se javlja nakon što broj okretaja propulzora nadmašuje standardan broj okretaja koji je propisan od strane brodograditelja nakon svih ispitivanja maksimalnih mogućnosti. Razlog zašto nije poželjno postizati kritičnu brzinu je preopterećivanje glavnog porivnog stroja te javljanje vibracija.

Svladavanjem otpora porivnom snagom određujemo brzinu broda. Ključ optimizacije čini brzina jer s njom određujemo hoćemo li povisiti troškove, a smanjiti trajanje putovanja ili obrnuto. Brzina broda nije stalna vrijednost tijekom eksploatacije broda, već se usprkos okolnostima mijenja s vremenom. Okolnosti mogu biti razne poput smanjivanja dubine vode ispod trupa broda gdje se pri određenoj brzini javlja efekt dodatnog zagažaja ili pak zbog velike brzine broda i visine vala dolazi do zalijevanja palube broda. Imajući to u vidu, razlikujemo prisilno reduciranje brzine i namjerno reduciranje brzine.

Prisilno reduciranje brzine se javlja uslijed povećanja otpora (npr. iznenadne vremenske neprilike). a sigurnost plovidbe postane upitna, dok kod namjernog reduciranja brzine imamo namjeru pozitivno pobuditi odaziv broda na valove u sigurnosnim okvirima pošto je utemeljeno da smanjenje brzine pozitivno utječe na upravljivost broda.

Neodržavanje brodskog trupa uzrokuje obrastanje podvodnog dijela broda različitim organizmima koje povećavaju hrapavost, što povećava trenje, a rezultat toga je smanjenje brzine. Obrastanja trupa se u većoj mjeri pojavljuju kod sporijih brodova, brodova koji manje plove, koji imaju veći gaz, u područjima nižih geografskih širina te morima gdje je slanost veća.

Mjerenja brzine mogu biti progresivne, primopredajne i kontrolne naravi. S gledišta optimizacije, važna su progresivna mjerenja brzine. Zbog različitih upita, vršimo i različita mjerenja: brzine u odnosu na broj okretaja propelera, brzine u odnosu na snagu motora i potrošnju goriva, brzine u odnosu na deplasman te brzine kao elementa manevriranja.

## 2.2. OKOLIŠNI UVJETI OPTIMIZACIJE

Pod okolišne uvjete ubrajamo hidrografska i meteorološka obilježja područja gdje se odvija pomorsko putovanje. Specifična su po tome što su sklona promjenama, stoga ne možemo s dovoljnom sigurnošću predvidjeti raspon varijacija. Neki autori s punim pravnom smatraju da se koristi pogrešna terminologija kod ove tematike te da optimizacija pomorskog putovanja ne zaslužuje taj naziv baš iz razloga nepredvidivosti jer ako se npr. koristi pogrešna ili nedovoljno točna prognoza te se brod nađe u području loših vremenskih uvjeta, način plovidbe nadalje nalaže na prvom mjestu uvjet sigurnosti pa rezultat cijelog putovanja može biti suboptimalan, a čak u nekim slučajevima može dovesti do potpunog napuštanja izabranog načina plovidbe.

Vrlo su bitni čimbenici okruženja kod meteorološkog planiranja putovanja jer mogu promijeniti tranzitni status broda tijekom plovidbe. Kod optimizacije uzima se u obzir utjecaj vjetra, valova, magle, leda i morskih struja. Ovi podaci bazično se dijele na tri skupine:

1. statistički podaci – pojave čija se svojstva ne mijenjaju tijekom duljeg vremenskog intervala kao npr. područje leda, navigacijski opasna područja, područja u kojima plovidba nije moguća ili su ograničena na neki drugi način (širina i dubina plovnog puta);
2. kratkoročni podaci – pojave čija se svojstva često mijenjaju u značajnom iznosu te ih nije moguće dovoljno točno predvidjeti kao npr. vremensko stanje te stanje mora u određenom području kratkoročnim i srednjoročnim prognozama;
3. dugoročni podaci – pojave čija se svojstva mijenjaju tijekom dužeg vremenskog intervala u blagom značaju te sam iznos promijene može ili ne mora biti poznat. Primjeri ovih pojava su klimatološki podaci vremena te podaci morskih struja za određeno područje.

Iako su svi navedeni čimbenici bitni za planiranje pomorske plovidbe, u svrhu optimizacije u obzir se uzimaju utjecaji vjetra i valova jer njima možemo manipulirati u svoju korist, a oni kao okolišni uvjeti izravno utječu na tehnološke uvjete.

### 2.2.1. Vjetar

Utjecaj vjetra prikazujemo kao silu koja djeluje na brod. Kod računanja djelovanja utjecaja vjetra na brod, određene pogreške javljaju se iz razloga što najčešće koristimo krivu površinu nadvodnog dijela broda.

Iako na vjetar, kao vanjsku silu, ne možemo utjecati, njome možemo manipulirati. Kad lagani vjetar (male brzine do 20 čvorova) puše u smjeru pramca, on smanjuje brzinu broda, dok u smjeru krme lagano povisuje brzinu broda. Vjetrovi većih brzina imaju negativan utjecaj na brzinu broda u oba smjera. Nadalje, vjetar većih brzina izravno djeluje na pojavu valova.

Gubitak brzine uslijed djelovanja sile vjetra izraženo je formulom:

$$V_w = V \sqrt{\frac{C_a \times \gamma_a \times A}{C_w \times \gamma_w \times B}} \quad (2)$$

gdje je:

$V_w$  – smanjenje ili povećanje brzine broda uslijed djelovanja sile vjetra (m/s),

$V$  – relativna brzina vjetra (m/s),

$C_a$  - koeficijent otpora zraka,

$\gamma_a$  – specifična gustoća zraka (kg/m<sup>3</sup>),

$C_w$  – koeficijent otpora vode,

$\gamma_w$  – specifična gustoća vode (kg/m<sup>3</sup>),

$A$  – površina nadvodnog djela broda (m<sup>2</sup>),

$B$  – površina podvodnog djela broda (m<sup>2</sup>).

### 2.2.2. Valovi

Jedan od glavnih čimbenika koji utječe na operativnu učinkovitost broda su valovi. Valove izražavamo silom kroz njihovu visinu, frekvenciju i smjer. Utjecaj sile valova promatramo u pogledu odaziva broda na valove.

Ponašanje je slično kao i kod vjetrova kada govorimo o valovima manjih visina. Pramčani valovi smanjuju brzinu broda dok je krmeni valovi blago povisuju do određene točke te nakon toga usporavaju brod.

Pri teškim vremenskim prilikama, teško je odrediti točnu učinkovitost broda. U nastojanju da se što zornije opišu aktualna stanja određenih morskih područja, meteorološki i oceanografski centar američke ratne mornarice (*U.S. Navy Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, Monterey, California*) pomoću GSOWM (eng. GSOWM = *Global Spectral Ocean Wave Model*) prognozira smjer i frekvenciju valova za južnu i sjevernu hemisferu za narednih 72 sata.

Gubitak brzine uslijed djelovanja sile vala izraženo je formulom:

$$\begin{aligned} V &= \gamma_h \times h \times \mu_h \\ \gamma_h &= \lambda / L \\ \mu_h &= \omega / \lambda \end{aligned} \quad (3)$$

gdje je:

$V$  – smanjenje ili povećanje brzina broda (m/s),

$\gamma_h$  – koeficijent signifikantne visine vala,

$\lambda$  – visina vala (m),

$L$  – duljina broda preko svega (m),

$h$  – signifikantna visina vala (m),

$\mu_h$  – višestruki koeficijent,

$\omega$  – frekvencija vala (Hz); 1Hz = 1 val.

### 2.2.3. Magla

Iako magla puno ne utječe na brodsku učinkovitost, valja je što više izbjegavati kako bismo održali nominalnu brzinu sa zadovoljavajućim uvjetima sigurnosti. Izbjegavanjem magle povećavamo udaljenost, ali zato dobivamo na vremenu jer inače reduciramo brzinu zbog slabe vidljivosti koja utječe na sigurnost plovidbe.



#### **2.2.4. Morske struje**

Morske struje ne predstavljaju problem pri planiranju pomorskog putovanja, ali mogu zapravo biti presudan čimbenik u odabiru rute. Odabiremo ih ili izbjegavati ili koristiti njihovu silu u svrhu povećanja brzine broda. Višegodišnjim mjerenjem pomoću oceanografskih plutača te satelitskim snimanjem, utemeljene su brzine i smjerovi morskih struja.

#### **2.2.5. Led**

Kod leda razlikujemo ledenjake te sante leda. Otapanje leda rezultira plutajućim santama koje sve više predstavljaju problem. Teško uočavanje i njihova nepredvidivost kod kretanja stvara određene poteškoće kod odabira rute. Iz navedenih razloga svrstani su među statističke podatke koji onemogućuju plovidbu u određenim područjima te predstavlja izazov optimizaciji.

### **2.3. OTPOR BRODA**

Kako bi zaista shvatili problematiku optimizacije pomorskog putovanja, moramo razjasniti čemu se zapravo odupiremo. Manipulacijom sila otpora u svoju korist uvelike pozitivno doprinosimo cjelokupnom procesu optimizacije pomorskog putovanja. Uz druge otpore, gibanju broda izravno se nameću masa vode i zraka. Komponente otpora posljedica su dviju glavnih sila: okomitog dinamičkog tlaka i tangencijalnih naprezanja na površinu trupa. Ako njihovo nametanje prikažemo kao silu koja pravocrtno djeluje na gibanje broda, a brodski poriv prikažemo kao suprotstavljenu silu koja savladava nametnute otpore, onda možemo zaključiti da je otpor broda zapravo jednak sili tegljenja. Drugim riječima, navedenoj sili otpora se možemo suprotstaviti tek dovoljno jakom silom za održavanje jednolike brzine bez korištenja poriva. Utemeljeno je da propulzori povećavaju silu otpora, stoga je sila tegljenog broda manja od otpora broda koji poriv postiže propulzorom. Ukoliko je podvodni dio trupa bez tzv. privjesaka, onda govorimo o otporu golog trupa (*bare – hull resistance*).

Efektivnom snagom (engl. *effective power*) označavat ćemo potrebnu snagu svladavanja ovih otpora prema formuli:

$$P_E = R_T \times V_S \quad (4)$$

gdje je:

$P_E$  – efektivna snaga (kW),

$R_T$  – ukupni otpor (kN),

$V_S$  – brzina broda (m/s).

Međudjelovanje raznih faktora čini ukupni otpor i on kao cjelina predstavlja kompliciran problem pa ćemo stoga staviti ukupni otpor na pojedine faktore te ih promatrati u mirnoj vodi:

1. otpor trenja (engl. *frictional resistance*) – nastaje kao posljedica naprezanja vode i oplata podvodnog dijela broda;
2. otpor valova (engl. *wave-making resistance*) – nastaje uslijed razlike dinamičkih tlakova podvodnog dijela broda zbog čega dolazi do podizanja i spuštanja morske razine;
3. otpor zraka (engl. *air resistance*) – nastaje posljedicom kretanja broda kroz zrak. Ovaj otpor uvelike ovisi o veličini nadvodnog dijela broda pa brodovi za prijevoz kontejnera o tome posebno trebaju voditi računa;
4. otpor kormila (engl. *rudder resistance*) – nastaje posljedicom strujanja vode oko kormila prilikom otklona. Neotklonjeno kormilo stvara minimalni otpor.

### 2.3.1. Otpor trenja

Ako promatramo brod tijekom plovidbe i obratimo pažnju na okomicu prema vodenoj liniji, primijetit ćemo međudjelovanje trupa i vode koje se manifestira u vrtloge duž cijele linije. Oni su uzrokovani kretanjem broda i otporom trenja. Trenje je definitivno najveći otpor koji se javlja pri plovidbi. Jačina trenja ovisi o hrapavosti odnosno zaglađenosti broskog trupa te je logično da je kod starijih i neodržavanih brodova ovaj otpor jači uslijed trošenja materijala trupa odnosno javljanja određenih neravnina. Ranije spominjano održavanje trupa pomaže sprječavanju rasta ovog otpora.

Istraživanjem je utemeljeno da otpor trenja na brodskim površinama ovisi i o brzini broda. Na sporije brodove trenje iznosi oko 80% ukupnog otpora, dok kod bržih brodova iznosi oko 50% ukupnog otpora. William Froude, britanski inženjer brodogradnje, svojim je istraživanjem uvelike pomogao u shvaćanju hidrodinamike broda. Za otpor trenja, uz brzinu, kao čimbenik je utvrdio da specifični otpor po jedinici površine opada s povećanjem duljine trupa te je stoga utvrdio sljedeću formulu:

$$R=f \times S \times V^n \quad (5)$$

gdje je:

$R$  – sila otpora (kN),

$S$  – površina podvodnog dijela broda ( $m^2$ ),

$V$  – brzina broda (m/s),

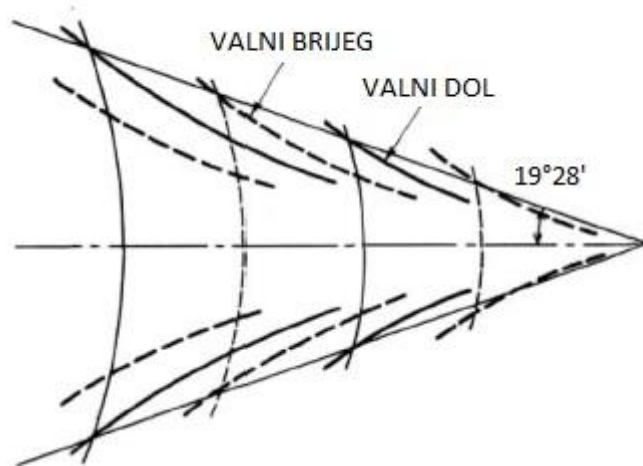
$f, n$  – koeficijenti koji ovise o dužini broda te zaglađenosti.  $n$  predstavlja zaglađenost plohe te njegov koeficijent iznosi između 1,83 – 2,00, dok vrijednost koeficijenta  $f$  opada s porastom dužine broda.

### 2.3.2. Otpor valova

U ovom poglavlju, termin valovi se ne koristi kao opis stanja mora nego kao opis pojave koju stvara brod u interakciji s vodom. Kretanjem broda kroz mirnu vodu uzrokovani su valovi na morskoj površini. Oni sadrže potencijalnu i kinetičku energiju koja je nastala propulzijom te uzrokuju povlačenje odnosno suprotstavljanje kretanju broda. Strujanjem vode duž podvodnog dijela broda stvara se razlika dinamičkih tlakova pa zato raspodjela samih tlakova neće biti ista na pramcu i krmi. Krmeni valovi broda najviše utječu na stvaranja otpora. Pramac zapravo određuje formiranje vala na krmi. Što je ulazni kut vodene linije manji, to se valovi kasnije lome. Ako se poveća brzina broda, do lomljenja neće doći jer se povećava i otpor.

Sustav brodskih valova prvi je objasnio Lord Kelvin promatrajući jednu točku koja putuje po ravnoj liniji na površini vode. Valove koji nastaju iza točke je podijelio na transverzalne (poprečni) i divergentne (razlazni). Utemeljio je da se valovi u odnosu na smjer plovidbe uvijek

šire pod istim kutom sa svake strane broda u vrijednosti od  $19^{\circ}29'$  (vidi slika 1.). Divergentni valovi veće su visine i znatno izraženiji pri većim udaljenostima od broda.



**Slika 1: sustav Kelvinovih valova**

Izvor: <https://www.nap.edu/read/5870/chapter/46>

#### **2.1.1.5. Jamesova krivulja gubitka brzine po stanju mora**

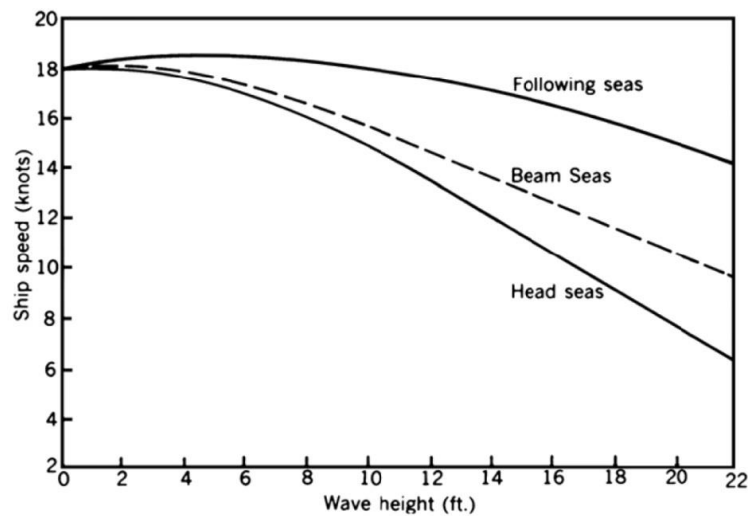
U ovom trenutku već nam je poznata korelacija brzine broda i valova. R. W. James u svojoj publikaciji valove koji udaraju o brod dijeli prema smjeru u tri kategorije:

1. valovi koji udaraju o pramac broda (engl. *head seas*)
2. valovi koji udaraju o krmu broda (engl. *following seas*)
3. valovi koji udaraju okomito na uzdužnicu broda (engl. *beam seas*)

Potom je svaku kategoriju izrazio krivuljom odnosa visine vala s brzinom broda s primjerom da brod postiže brzinu od 18 čvorova (vidi slika 2.). Os ordinate označava brzinu broda u čvorovima dok os apscise označava visinu vala izraženu u stopama.

Iz ovog primjera možemo uočiti da valovi malih visina druge i treće kategorije bilježe blagi porast brzine broda, dok pri većim visinama valova sve tri kategorije imaju međusobno različit

negativan utjecaj na brzinu broda gdje valovi koji udaraju o pramac broda najviše smanjuju brzinu.



Slika 2. krivulja gubitka brzine broda po stanju mora

Izvor: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a041588.pdf>

### 2.3.3. Otpor zraka

Strujanje zraka oko broda bez prisutnosti vjetra predstavlja otpor zraka. Komponenta otpornosti uvjetovana je oblikom i veličinom broda iznad vodene linije. Ovaj otpor u principu predstavlja samo 4-8% ukupnog otpora broda. U novije vrijeme, otpor zraka se svladava dizajniranjem aerodinamičnih oblika nadvodnog dijela broda, ali se postavlja pitanje isplativosti s obzirom na visoke troškove izgradnje broda u cilju postizanja zakrivljenosti brodskog trupa za lakše strujanje zraka.

### 2.3.4. Otpor kormila

Otpor kormila isto pridonosi ukupnom otporu broda. Javlja se zbog strujanja vode oko kormila. Prilikom svakog otklona kormila, povećava se otpor te zavlčenje (engl. *drag*) broda. Iako ova vrsta otpora čini vrlo malu komponentu ukupnog otpora, nepotreban otklon kormila

može imati veliki utjecaj na brodsku učinkovitost. Valja znati da je sila ovog otpora vezana za snagu broskog poriva, te zorno prikazuje činjenicu da što je jači poriv, jače je i „zavlačenje“.

## 2.4. FUNKCIJA CILJA

Funkciju cilja određujemo s obzirom na uvjet koji želimo zadovoljiti. Uvjeti koji se najčešće odabiru su:

1. plovidbeni put najmanje udaljenosti (engl. *least distance route* – LDR);
2. plovidbeni put s najmanjim vremenom plovidbe (engl. *minimum time route* – MTR);
3. plovidbeni put s najmanjim potroškom goriva (engl. *minimum fuel route* – MFR);
4. plovidbeni put koji omogućava najmanje troškove (engl. *minimum cost route* – MCR).

U ovom konceptu, ideja je da krajnji korisnik određuje relativnu važnost odabranih uvjeta. Većina današnjih alata za optimizaciju pomorskog putovanja uzima u obzir samo jedan uvjet dok druge relevantne uvjete tretira kao ograničenja. U generalnom smislu, minimalizacija vremena putovanja i minimalizacija potrošnje goriva su dva konfliktna uvjeta te je gotovo nemoguće udovoljiti oba gledajući da kraće putovanje iziskuje više snage što dalje zahtjeva veću potrošnju goriva.

### 3. JEDNOCILJNE METODE OPTIMIZACIJE

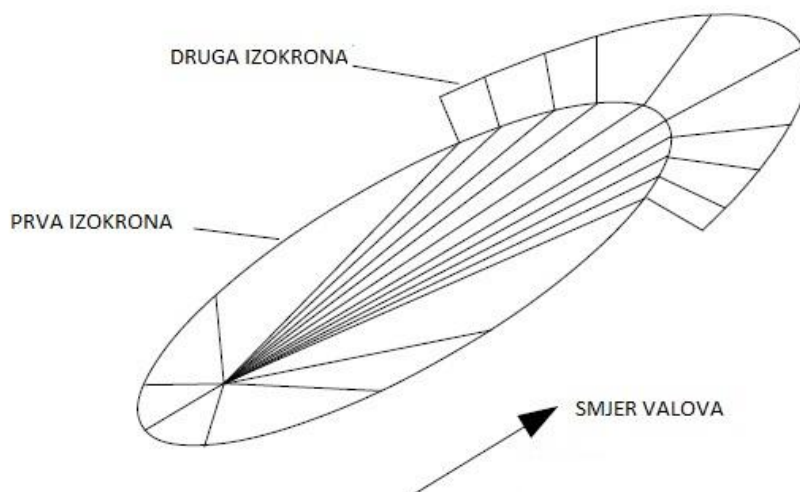
Na početku optimizacije pomorskog putovanja, ne implementiraju se vremenske prognoze nego se bazično računa najkraći put. Računalo se pomoću dinamičkog programiranja i sam koncept najkraćeg puta je jednostavno izračunati. Javljao se problem vremenskih neprilika kao imperativni uvjet sigurnosti te ponašanje broda u zadanim uvjetima. Vremenske prilike su uvedene i modelirane kao stohastičke varijable u dinamičko programiranje i time se podigla kompleksnost problema. Kako bi se podnijelo povećanje računalne složenosti, planiranje pomorske plovidbe rastavilo se na nekoliko iteracija. U jednociljnim metodama optimizacije ideja je za svaku pojedinu iteraciju predvidjeti odstupanja i najbolje rješenje. Za svaki početni korak sljedeće iteracije, koriste se zadnji rezultati prethodne iteracije do finalnog cilja. Time smanjujemo granularnost odstupanja svakog ponavljanja i samim time povisujemo točnost završne solucije. Jedan od prvih pristupa minimalizacije vremenskog trajanja pomorskog putovanja s obzirom na predviđene vremenske prognoze predložio je Reginald William James<sup>1</sup> u svojoj publikaciji. R. W. James razmatra učinke struje, vjetrova i valova na propulziju broda. Prikazuje djelovanje valova najizraženijim reduktorom brzine kroz stvarni otpor vode na brod.

#### 3.1. METODA IZOKRONA

Metoda izokrona, koju je izvorno predložio R. W. James, prikazana je kao skup povezanih točaka koje brod može dosegnuti u određenom vremenskom intervalu na pretpostavljenoj sfernoj mreži preko područja plovidbe. Uzimajući u obzir vremenske prilike (struje, vjetrovi i valovi) i brzinu broda, određuje se prva izokrona, odnosno pravac od ishodišne točke na sljedeću. Simuliraju se svi mogući ishodi s obzirom na jednu funkciju cilja te dobivamo povratnu informaciju najboljeg, odnosno vremenski najkraćeg kursa. Kako bi se odredila druga izokrona, iz svake točke kojoj pripada prva projiciramo okomicu na tangenti. Istim procesom dinamičkog programiranja (od svih mogućih ishoda, odabire se najkraći) određuje se kurs, imajući u vidu da je ishodište druge izokrone zapravo odredište prve izokrone. Svaka sljedeća izokrona generira se jednako (Vidi slika 3).

---

<sup>1</sup> James, R.W. 1957. Application of wave forecast to marine navigation, Washington: US Navy Hydrographic Office.



**Slika 3: Koncept određivanja prve i druge izokrone**

Izvor: Angelica Andersson, Multi-objective optimisation of ship routes

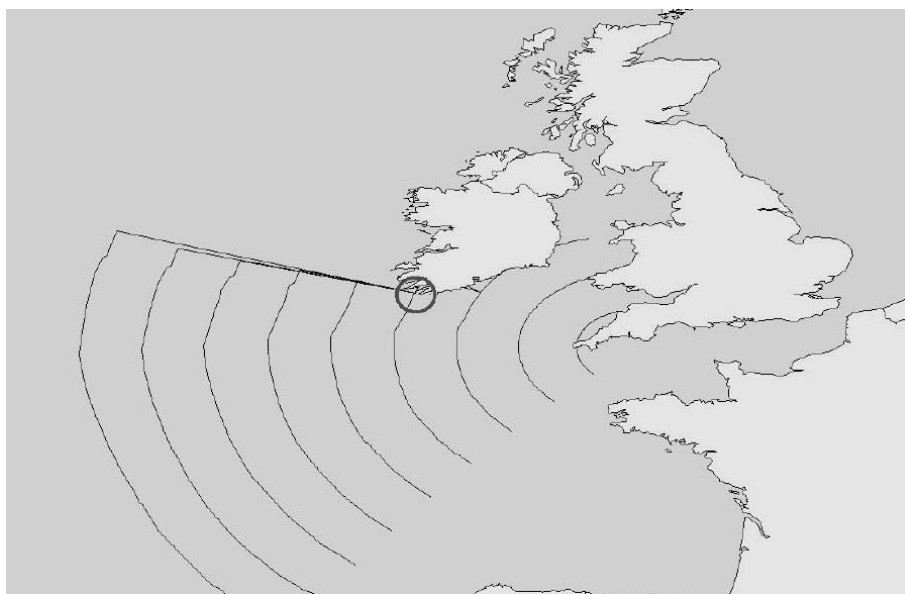
Iako je ova metoda izvorno bila namijenjena ručnom planiranju pomorskog putovanja, implementirajući je kao dio računalnog procesa došlo je do određenih problema. Glavni problem su takozvane „petlje izokrona“ (engl. *isochrone loops*). Takva petlja je zapravo nepravilnost izokrona uzrokovana zbog nekonveksnosti karakteristične brzine broda za zadane vremenske podatke te stoga dolazi do određenih odstupanja. Nažalost, odstupanja kod petlja izokrona se proporcionalno vežu jedna na drugu te cijela metoda postaje neprimjenjiva na računalne programe i kao takva danas nije u upotrebi.

### 3.2. MODIFICIRANA METODA IZOKRONA

Ova metoda je progresivnija i primjenjiva je na računalne programe. Uklanja glavni nedostatak prethodne metode – „petlje izokrona“. Modificirana metoda temelji se na stajalištu da s određene točke izokrona rješenje optimalnog smjera nije uvijek najkraća okomica na sljedeći izokron. Umjesto toga, mijenjamo kurs utoliko da projekcija okomice prema tangenti bude maksimalna. Iako smo time uspjeli riješiti jedan problem, javlja se novi problem kod primjene stroge zabrane prelaska kursa preko obale odnosno zemlje, a najčešće se viđaju kod plovidbe kroz suženi morski prostor odnosno tjesnac (vidi slika 4). Pošto se ishodište sljedeće točke izokrona generira prethodnom točkom, a prethodna se zbog navedenog problema nalazi



na obali, cjelokupni proces je neuporabljiv. Nastavno tome, H. Hagiwara<sup>2</sup> svojom publikacijom uspijeva nadići spomenuti problem tako što pri generiranju nove točke, inicira podjelu područja plovidbe. Područje obale, odnosno zemlje, odvaja se u podskupinu koja ograničava generiranje novih točaka na tom području.



**Slika 4: Primjer točke izokrona koja je „zaglavila“ na obali**

Izvor: Angelica Andersson, Multi-objective optimisation of ship routes

### 3.3. METODA ISOPONE

Metoda isopone predstavljena je publikacijom M. B. Klompstra<sup>3</sup>, a zasnovana je na prethodnoj metodi. Osnovna razlika između metoda isopone i modificirane izokrone je u tome što se umjesto određenog vremenskog intervala kao uvjet uzima u obzir potrošnja određene količine goriva između sfernih točaka što znači da se svaka nova točka određuje po potrošnji energije. Ovim se izravno omogućuje optimizacija potrošnje goriva. Valja napomenuti da mora

---

<sup>2</sup> Hagiwara, H. 1989. Weather routing of (sail-assisted) motor vessels, PhD Thesis, Delft: Technical University of Delft.

<sup>3</sup> Klompstra M.B, Olsde GJ & Van Brunschot Pkqm. 1992. The isopone method in optimal control. Dynamics and Control 2(3):281-301.

biti poznat invertibilan odnos između brzine i potrošnje goriva kako bi se pravilno koristila metoda isopone. Prednost ove metode naspram prethodne je što varijacija brzine plovidbe se primjenjuje pri odabiru rute te u konačnici rezultira boljim rješenjima, ali i većim računalnim troškovima.

### **3.4. RAČUN VARIJACIJE**

Račun varijacije je matematički pristup rješavanju problema optimizacije pomorskog putovanja. Usmjeravanje broda u ovoj metodi se predstavlja kao neprekidni problem kontrole optimalnog između maksimizacije ili minimizacije jedne funkcije. Optimalna kontrola se dobiva poboljšanjem inicijalno planiranog puta po gradijentima funkcije cilja sve dok se ne dosegne određeno ograničenje. Ovi gradijenti su parcijalne derivacije funkcije. Diferencijalna jednačina izražava nepoznatu funkciju jedne ili više varijabli koje su u ovom slučaju nerijetko međuzavisne. Kao posljedica toga, ovaj pristup rezultira problemima konvergencije, a postupak rješavanja često bude neuspješan.<sup>4</sup>

Ova metoda se pokušavala implementirati još 1960-ih u planiranje plovidbe, ali uglavnom je ostala na teorijskoj razini. Konvergencija problema i nepravilnosti koje se javljaju prilikom izračuna diferencijala drugog reda u tom razdoblju, učinili su ovu metodu neupotrebljivom, no gledajući dugoročno uz razvitak tehnologije, metoda će ponovno zaživjeti.

### **3.5. DINAMIČKO PROGRAMIRANJE**

U ovom pristupu, prostor i vrijeme su diskretizirani. To omogućuje razlučivanje u niz manjih i jednostavnijih problema u cilju pronalaska optimalne rute. Problem optimizacije prikazan je rekurzivnom formom za izračun pojedinog prostorno – vremenskog stadija s pogledom na trošak putovanja prethodnog stadija. Na ovaj način odabiremo najjeftiniju rutu. Kao trošak putovanja se gleda trošak u vremenskom intervalu, odnosno troškovi goriva, troškovi luke ili penali zakašnjenja.

Točnost rješenja dinamičkog programiranja uvelike ovisi o kvantiteti stadija koje ulaze u izračun. Veća količina stadija omogućuje veću ispravnost. Međutim, potrebno je uzeti u obzir učinkovitost ove metode imajući u vidu da je potrebno previše vremena za izračun, dok su tada računala imala određena memorijska ograničenja.

---

<sup>4</sup> Haltiner, G.J. et al. (1962), Minimal-time ship routing. Journal of Applied Meteorology, Vol.1, No.1, March 1962.

Mana dinamičkog programiranja je u tome što se može koristiti samo jedan smjer (smjer prema naprijed), stoga na izbjegavanje loših vremenskih uvjeta se može primijeniti samo redukcija brzine.<sup>5</sup>

### **3.6. MODEL DINAMIČKOG TRIMA BRODA**

Dinamički trim broda je potpuno automatizirani sustav koji u primjeni, brodovima u plovidbi pomaže postići minimalni otpor vode. Temelji se na višedimenzionalnoj analizi prikupljenih podataka trima broda s brojnim senzorima koji se obrađuju kroz računalni softver. Sustav se svojim aktivnim korigiranjem trima prilagođava stanju mora te s time umanjuje neugodna brodska gibanja poput ljuljanja ili posrtanja. Ovaj sustav pokazuje iznimne rezultate kod povećanja operativne učinkovitosti broda.

---

<sup>5</sup> Chen, H.T. (1978), A dynamic program for minimum cost ship routing under uncertainty. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.

## 4. VIŠECILJNE METODE OPTIMIZACIJE

Višeciljna optimizacija (engl. MOO = Multi – objective optimisation) za razliku od prethodnih optimizacijskih metoda u izračun najpovoljnijeg plana putovanja uzimaju više od jedne varijable i daju velik broj kompromisnih rješenja. Kompromisna rješenja nastaju zbog činjenice da su različiti ciljevi u sukobu jedan s drugim. Evolucijski algoritmi obrađuju skup rješenja pa imaju mogućnost određivanja potencijalno optimalnog odnosno PARETO – optimalnog. Formulacija karakterističnog MOO problema dana je u formuli:

$$\begin{aligned} \text{minimiziraj } x \quad & f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\} \\ & x \in X, \end{aligned}$$

gdje je  $f(x)$  vektor objektivnih funkcija, a  $X$  izvediv prostor odluke. Prostor odluke je domena u kojoj varijable optimizacije ili varijable odluke mogu poprimiti vrijednost. Izvodljivi prostor odluke stoga je područje u kojem su ispunjena sva ograničenja.

### 4.1. PARETO – OPTIMALNO

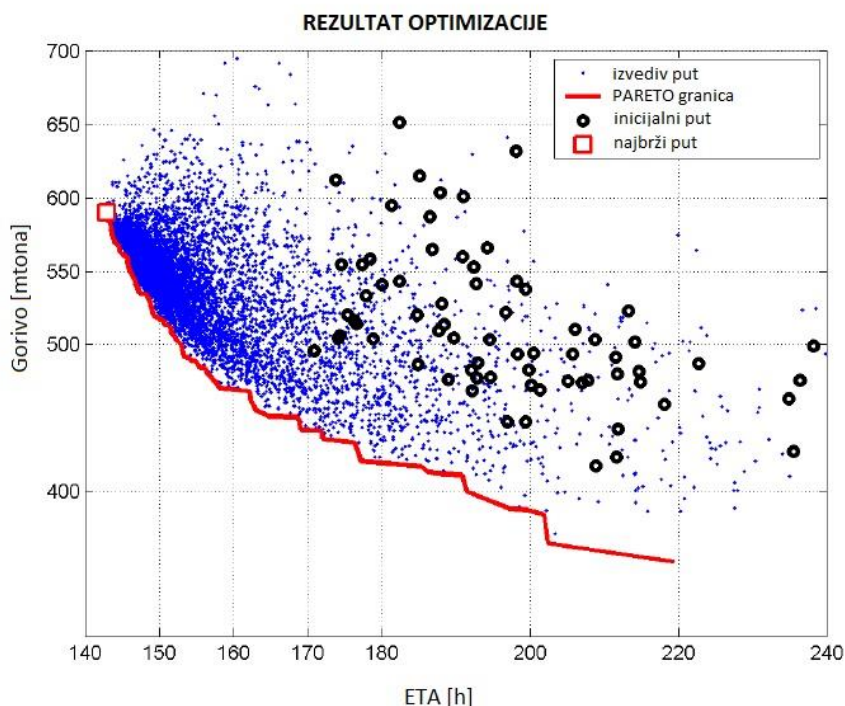
Kako bi riješili problem višeciljne optimizacije, rute u ovoj metodi se generiraju u PARETO granicu (engl. *PARETO frontier*) koja predstavlja grafikon koji vizualno prikazuje razmjenu sukobljenih ciljeva na temelju velikog broja primjera (vidi slika 5.).<sup>6</sup> PARETO granica označava trenutak u kojem nije moguće poboljšanje jedne varijable bez pogoršanja druge. Na slici vidimo PARETO granicu s obzirom na dvije funkcije cilja: potrošnju goriva i vrijeme plovidbe. Plovidba ispod crvene krivulje je neizvediva s obzirom na suprotstavljene uvjete, dok plovidba iznad krivulje je izvediva, no nije optimalna. U MOO generalno nije moguće pronaći jedno jedinstveno rješenje problema, stoga se više potencijalnih rješenja nalazi unutar PARETO – optimalnog. PARETO – optimalni trenutak je onaj u kojem za  $x \in X$ , ne postoji drugi trenutak  $x' \in X$  takav da je

$$f_i(x') < f_i(x), i=1, 2, \dots, m)$$

---

<sup>6</sup> J Hinnenthal. Robust Pareto-Optimum Routing of Ships utilizing Deterministic and Ensemble Weather Forecasts. PhD thesis, Universitätsbibliothek, 2007.

Moguća je varijanta PARETO – slabog, gdje nema drugog rješenja koje poboljšava sve funkcije istodobno. Ali, u PARETO – slabo, barem jedna varijabla može biti poboljšana, a da se ne umanjuje druga.



**Slika 5: grafikon PARETO granice**

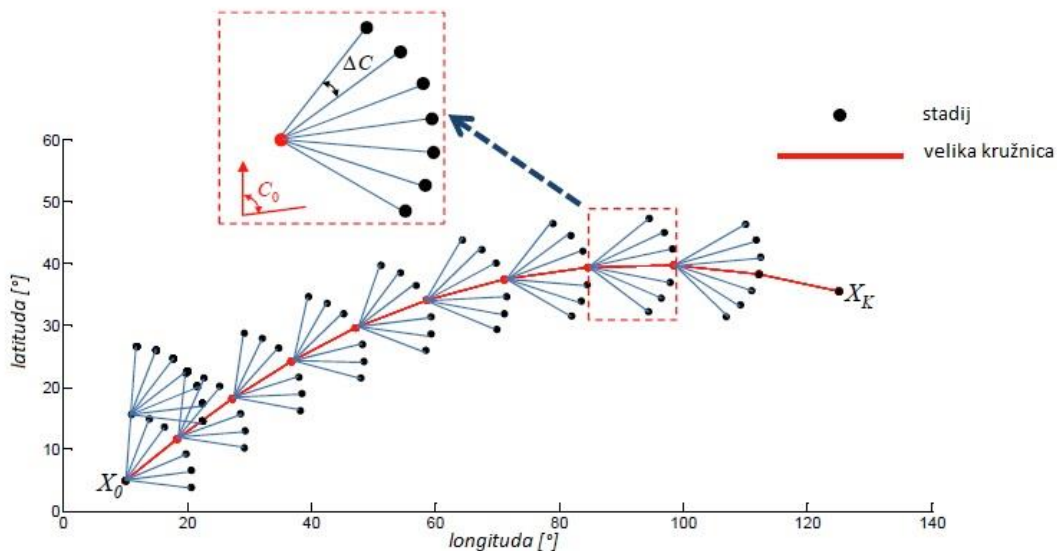
Izvor:

<http://lipas.uwasa.fi/~TAU/AUTO3120/slides.php?Mode=Printer&File=5000Pareto.txt&MicroExam=On&Images=Own&Menu=Off>

#### **4.2. 3DMI METODA (THREE DIMENSIONAL MODIFIED ISOCHRONE)**

Ova metoda koristi Kartezijev trodimenzionalni koordinatni sustav kako bi prikazala prostorno – vremenske putne točke (engl. *waypoint*) optimiziranog navođenja broda budući da se navođenje redovno korigira za trenutne kriterije kao što su dubina mora ili stanje atmosfere. Prema tome, treba dinamički analizirati oceanografska i hidrografska ograničenja planirane rute te je maksimalno prilagoditi zadanim interesima i mogućnostima broda. Isto tako, kao ograničenje se postavlja postizanje kritične brzine koja negativno utječe na plovidbu.

Primarno za referentni put se odabire plovidba po velikoj kružnici pošto se to smatra najkraćim putem od ishodišta do odredišta. Sekundarno, za određivanje pomorskog puta zadužene su morske struje. Povoljnim morskim strujama osim veće brzine, važnost pridodaje smanjenje potroška goriva. Svaka točka prolaza u ovakvom koordinatnom sustavu je označena sa 3 dimenzije – geografska širina i dužina te dubina. Brod se usmjerava s obzirom na udaljenost, vrijeme te kurs. Najdalji stadij od ishodišta je točka koju brod može postići najvećom brzinom u mirnoj vodi unutar određenog vremenskog intervala dok izbjegava vremenske neprilike i ostale zapreke. Valja napomenuti kako je u ovoj metodi brzina broda u mirnoj vodi korigirana s obzirom na prisilno i dobrovoljno reduciranje brzine, a računa se na temelju povratno-rekurzivnog algoritma.<sup>7</sup>



**Slika 6: projekcija 3DMI metode**

Izvor: <https://www.researchgate.net/publication/267621767>

Slika 6. pokazuje primjer projektiranja stadija odnosno točka prolaza plovidbe na geofizičkom koordinatnom sustavu od ishodišta prema odredištu. Kurs slijedi tijekom velike kružnice koja je ispravljena formulom:  $c = c_i \pm i\Delta c$ , gdje je  $i = 0, 1, 2, \dots, N$ . Inicijalni kurs  $c_0$  se korigira kao  $c$  s obzirom na zapažene trenutne vremenske uvjete i brodsku učinkovitost. Temeljem metode izokrone, svaki stadij izračunava od svih mogućih narednih točaka, onu najkraću. Nakon svakog stadija, sustav uzima u obzir novonastala zapažanja te radi novi

<sup>7</sup> Bekker, J. F. and Schmid, J. P. (2006). "Planning the safe transit of a ship through a mapped minefield", JORSSA, Vol. 22, pp. 1-18.

izračun. Ukratko, 3DMI metoda tretira problem optimizacije kao višekriterijske stadije koji se prolaze različitim odabirom brzine.

#### **4.2.1. Odabir težinskog faktora**

Kako bismo ispravno upotrijebili ovu metodu optimizacije, svaku putnu točku treba diskretizirati vremenskim rokom te tehnološkim i okolišnim uvjetima koji utječu na samu plovidbu. Nazivamo ih težinskim faktorima. Pridruživanjem težinskih faktora različitim stanjima tijekom napretka oni utječu na parametre brzine koju treba optimizirati. Kako bi se dobila optimizirana ruta konstantne brzine broda, treba minimizirati gubitak brzine između putnih točaka. Konkretnije, za postizanje minimalne udaljenosti, određuje se težinski faktor temeljem prisilnog gubitka brzine. Jednom kad su težinski faktori dodijeljeni baš svakoj putnoj točki kojoj je sustav pristupio minimiziranjem problema, možemo reći da smo plovidbu uspješno optimizirali prema 3DMI metodi.

Pošto za ograničenja brodskih hidrodinamika treba bogat izvor podataka trenutnog stanja atmosfere, isti moraju biti dostupni. Za lakše praćenje okolišnih uvjeta, sustav koristi WW3 (skraćeno od: *Wawewatch III*): preciznu prognozu valova NCEP-a (skraćeno od: *National Centers for Environmental Prediction*). Uz WW3 koristi se i OSCAR (skraćeno od: *Ocean Surface Currents Analysis – Real time*) globalnu bazu podataka promatranih morskih struja perioda od 1992. godine što znači da podaci morskih struja se ponavljaju po određenom uzorku. OSCAR se implementira na dubine do 15m.

### **4.3. NEDOMINANTAN SORTIRAJUĆI GENETSKI ALGORITAM -NSGA**

Kod prethodne metode običnog genetskog algoritma smo zaključili da pri optimizaciji pomorskog putovanja, korisnik mora odlučiti o težinskom faktoru s obzirom na trenutno stanje s pretpostavkom da korisnik posjeduje određeno predznanje. U metodi nedominantnog sortirajućeg algoritma, način rada je ostao potpuno isti, a jedina razlika je u tome što je način selekcije težinskog faktora postao automatiziran. Ovaj algoritam koristi modus rangiranja selekcije, pri čemu prednost kod selekcije ima nedominantna solucija. Unutar populacije algoritma, raznolikost drži zajednička funkcija.

Kako bi konkretizirali, na osnovi nedominantne uloge rangira se populacija, a zatim se, za pridjeljivanje pogodnosti svakoj jedinki populacije, koristi zajednička funkcija za najbolju

soluciju. Način rangiranja se uspostavlja tako da se uspoređuje nedominantna solucija iz populacije sa svakim drugim kako bi se dobila što veća vrijednost cilja. Nakon identifikacije prvog stupnja nedominantnosti, sva druga rješenja se zanemaruju zbog identificiranja drugog stupnja ne dominantnosti. Vrijednost pogodnosti pridjeljuje se svakoj jedinki iz rangiranja nedominantnosti. Na taj način je selektivno težište određeno na jedinke nižeg stupnja budući da su one bliže pravoj PARETO-optimalnoj granici. Dodjeljivanje pogodnosti odvija se u dvije razine, gdje se pri svakoj razini subordinira naročitim namjenama zajedničke funkcije višeciljne optimizacije. Prva razina distribuira svojevolutni istovjetni bonitet pogodnosti svim solucijama koja pripadaju istom nedominantnom rangu. Posredstvom višeciljne funkcije, druga razina dodjeljivanja pogodnosti izolira individualno rješenje temeljem kumulacije svih rješenja na predmetnoj domeni. Preciznije, za vrijednost pogodnosti svih rješenja početne nedominantne fronte zadaje se vrijednost opsega populacije, stoga nijedna solucija unutar totalne populacije ne može imati veću vrijednost. Ako određena solucija ima obilan broj obližnjih točaka na navedenoj domeni, propozicija zajedničke funkcije normira bonitet pogodnosti putem faktora redukcije. Ovaj faktor zavisi o količini i distanci obližnjih solucijskih točaka. Izračunate reducirane zajedničke solucije pogodnosti iz utvrđene nedominantne uloge nikad neće biti manja od svojevolutno utvrđenog boniteta pogodnosti više razine. Nakon što sve solucije inicijalne razine postignu bonitet pogodnosti, analizira se iduća razina koja također stječe zajedničku pogodnost te se isti proces ponavlja dokad sve solucije svih razina ne postignu zajedničku vrijednost.<sup>8</sup>

Matematički gledano, postupak dodjeljivanja zajedničke pogodnosti za skup  $n_k$  solucija unutar  $k$  nedominantne fronte, gdje svaki pojedini član ima svojevolutnu vrijednost pogodnosti  $f_k$  za svaku soluciju  $i=1,2,\dots, n_k$ . Navedeni postupak zahtjeva određivanje parametara  $\sigma_{share}$  koji simbolizira najveću distancu između dviju točaka koje razdjeljuju svoju pogodnost u više PARETO-optimalnih rješenja.

Razni višeciljni evolucijski algoritmi, među kojima je i nedominantan sortirajući genetski algoritam, posjeduju svojevrsne pogreške u smislu kalkulacijske kompliciranosti. Njihov pristup ne integrira elitizam niti nuždu za uporabom  $\sigma_{share}$  za generativno određivanje funkcije koje se uobičajeno koristi kao garancija populacijske raznolikosti.

---

<sup>8</sup> Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.



#### 4.4. NEDOMINANTAN SORTIRAJUĆI GENETSKI ALGORITAM II - NSGAI

Odstranjivanje pomanjkanja prethodne metode ishodilo je modernijim i oplemenjenijim algoritmom NSGA II. Temeljem kvalitetnijeg očuvanja podataka, vremenski intervali nedominantnih rangiranja su se smanjili te je uveden elitizam koji uvelike ubrzava postupak genetskog algoritma. Ujedno, umjesto zajedničkih funkcija, implementiran je sustav mjerenja gustoće. Kako je već navedeno, običan NSGA je komparirao sve moguće solucije sa svim drugim mogućim solucijama unutar populacije za sve funkcije. Kada su sve solucije provjerene, usporedbom najboljeg se dolazi do nedominantnog skupa solucija. Kod NSGA II, određuje se više skupova solucija unutar jedne operacije odnosno gustoća. Ovdje se selektivno uklanja dominantan skup kako ne bi ušao u nedominantnu domenu. Proces se inicira tako što se prva iteracija u populaciji deklarira pripadnošću nedominantnog skupa. Druga iteracija se komparira sa prvom, dok treća s najviše dvije itd. Procjena gustoće svih solucija koje okružuju određenu soluciju posredstvom kalkulacije prosječne distance između dviju točaka daje format najvećeg kuboida koji zatvara točku bez komponiranja bilo koje druge populacije. Sve solucije odvajaju se ulaznim redom naspram vrijednosti funkcije cilja.<sup>9</sup>

#### 4.5 DIJKSTRA ALGORITAM

Navedeni algoritam se koristi u mnogo varijacija. Originalna varijacija pronalazi najkraću udaljenost dviju točaka na nekom području kao što je slučaj kod svih metoda optimizacije. Konstantnom potrebom za unaprjeđenjem sustava iz raznih motiva, ova metoda optimizira pomorsko putovanje s obzirom na vrijeme trajanja putovanja, na potrošnju goriva, okolišnim uvjetima te prisilnim i dobrovoljnim reduciranjem brzine. Odabir ovih težinskih faktora je, kao i kod NSGA metode, potpuno automatiziran, stoga se od korisnika ne očekuje nikakvo prethodno znanje. Ovakav pristup za sada najviše upotpunjuje potrebe optimizacije. Pouzdanost ove metode ovisi o preciznosti vremenskih i valnih prognoza te ponašanje broda u zadanim uvjetima. Podatke predviđanja vremenske prognoze i valova, sustav pribavlja iz raznih centara koji se bave tom problematikom.

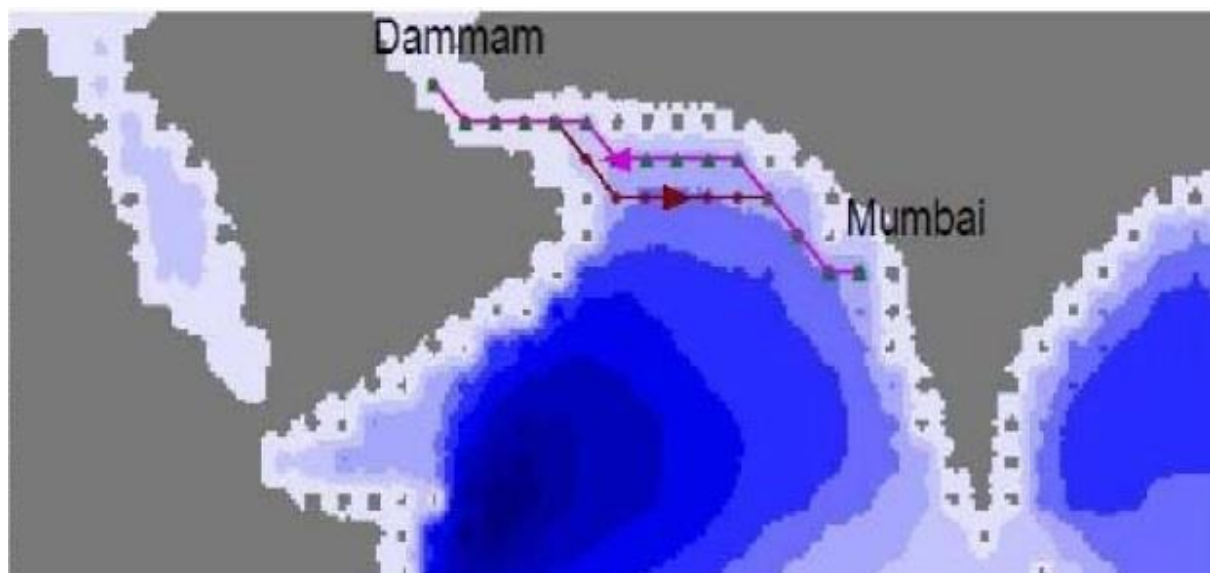
Inicijalni korak ove metode je digitalizacija predviđenog plovnog područja gdje program odmah računa najkraći put od ishodišta do odredišta, a da je pritom, naravno, odvojio more od obale. Uobičajeno se postavlja sferna mreža sa prolaznim točkama zvanim *vertex*-ima. Nakon

---

<sup>9</sup> Deb, K., Multi-objective Evolutionary Algorithms: Introducing Bias Among Pareto-optimal solutions, KanGAL Report Number 99002, 1999.

toga, algoritam podređuje rutu okolišnim uvjetima pristupom bazi podataka vremenskih prognoza i predviđanja valova. Implementiran je sustav koji vrlo realno simulira ponašanje broda na uvjete koji se predviđaju te temelje usmjeravanje u onom pravcu gdje brod ima najbolje manevarske sposobnosti. Vrlo korisna opcija ove metode je kada se na predviđenom plovnom putu očekuju jako loši vremenski uvjeti na kratak period, gdje se inače ruta mijenja u cilju izbjegavanja iz sigurnosnih razloga, Dijkstra algoritam nalaže smanjenje brzine broda prilikom prilaznja tom području do konca vremenskih neprilika. Ovim je postupkom uvjet sigurnosti ispunjen na utaženoj visini. Umanjena je potrošnja goriva zbog smanjenja brzine te se vrijeme trajanja plovidbe nije bitno promijenilo. Zbog nepouzdanosti vremenskih prognoza, tokom samog putovanja, algoritam konstantno podređuje rutu stvarnim uvjetima te prethodno navedeni vertexi dobivaju vrijednost  $v'$  odnosno korigirano prolaznu točku s obzirom na inicijalnu prolaznu točku.

Dakle, od polazišne točke, algoritam uzima sve okolišne uvjete i prilagođava ih tehnološkim uvjetima za najbolju učinkovitost broda te određuje najkraću rutu do sljedeće prolazne točke. Broj prolaznih točaka ovisi o dužini samog putovanja. Tijekom plovidbe, algoritam evaluira trenutno stanje te u slučaju nepodudaranja uvjeta, automatski računa i određuje alternativni put. Ovaj proces se odvija sve do ishodišta.<sup>10</sup>



**Slika 7: Primjer alternativne rute s obzirom na inicijalnu pomoću Dijkstra algoritma**

Izvor: Debabrata Sen and Chinmaya Padhy - Development of a ship weather-routing algorithm for specific application in north Indian ocean region

<sup>10</sup> Zoppoli, R. 'Minimum-time routing as an Nstage decision process' Journal of Applied Meteorology, Vol. 11, pp. 429-435 (1972).

## 5. PRUŽATELJ USLUGA OPTIMIZACIJE

Pružanje usluga optimizacije pomorskog putovanja komercijalizirano je od privatnih organizacija za određenu naknadu. Valja znati da optimizirano pomorsko putovanje ne mora biti obvezan način provedbe plovidbe već je savjetodavne naravi zapovjedniku broda.

Pružatelj usluge optimizacije obvezuje se krajnjem korisniku:

1. dostaviti inicijalnu preporuku plovidbenog puta (engl. initial route recommendation) 48 do 72 sata prije početka samog putovanja. Preporuka se temelji na kontinuiranom procesu nadzora svih bitnih čimbenika sve do trenutka kad brod dosegne svoje odredište. Preporuka je sastavljena od reprezentativnog iskustva, vremenskih prognoza, stanja mora, interesa plovidbenog cilj te brodske učinkovitosti s obzirom na obilježja broda. Planirana ruta pruža najbolju procjenu promjenjivih čimbenika. U cilju što bolje preporuke planiranja putovanja, savjetuje se da predviđeni datum isplovljenja (EDD – Estimated Date of Departure) bude predan zaduženoj organizaciji najmanje 7 dana prije. Preporuka se revidira netom prije isplovljavanja broda;
2. preporučena prilagodba trenutka isplovljavanja (engl. adjustment of departure time) kojom se ranijim ili kasnijim isplovljenjem pokušavaju umanjiti ili potpuno ukloniti nepovoljni vremenski uvjeti. Vrlo vjerojatno se i prvi dio putovanja mijenja s obzirom na promijene EDD-a;
3. izmjena plovidbenog puta (engl. diversion) je prilagođavanje rute na neplanirane izmjene vremenskih uvjeta. U većini slučajeva udaljenost do odredišta se povećava u cilju izbjegavanja štetnih učinaka vremenskih neprilika;
4. izmjena plovidbene brzine (engl. adjustment of speed of advance) kroz povećanje ili smanjenje brzine za cilj ima povećanje operativne učinkovitosti. Ponekad se promjenom brzine izbjegnu loši vremenski uvjeti bez povećanja udaljenosti. Razvoj brodova sve većih brzina daje dotičnim agencijama mogućnost „stvaranja stanja vremena na moru“ prilagodbom brzine na željene vremenske uvjete;

5. u slučaju iznenadnog pogoršanja vremenskih prilika te kad osnovna briga postane sigurnost a ne vođenje broda k odredištu, agencija izdaje zapovjedniku broda posebne upute slobodne izmjene plovidbenog puta (engl. evasion);
6. vremenske upute (engl. weather advisory) izdaju se kao izvješća očekivanih promjena vremenskih uvjeta i stanja mora. Ovakav tip preporuke može sadržavati razmatranje sinoptičke prognoze vjetra, valova ili magle. Mogućnost agencije je da savjetovanjem prvog časnika palube ili zapovjednika broda postigne optimalne uvjete zadane okolnosti.

Glavna prednost kod meteorološkog planiranja plovidbe postiže se pri putovanjima značajne duljine odnosno duljim od 1500 NM, kod neograničenih područja plovidbe, kada postoji niz alternativnih plovidbenih puteva te kada na postizanje željenog cilja utječu vremenski uvjeti.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Zec, D. – Planiranje pomorske plovidbe, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka (1997.)

## 6. ZAKLJUČAK

Tema ovog završnog rada je bila približiti proces optimizacije pomorskog putovanja krajnjem korisniku jer su same metode računalni programi puni algoritama i kodova koji ne moraju biti jasni svakom pomorcu. Ono što se trebalo shvatiti je implementacija programa kroz korisničko sučelje, odnosno način rada na koji optimizacija prilagođava putovanje zadanim uvjetima.

Uvođenje optimizacije u planiranje pomorske plovidbe razvilo je prosperitet pomorstva na globalnoj razini. Većina svjetske robne trgovine odvija se morem pa je iz tog razloga ispravno samu plovidbu izvršiti na najučinkovitiji način uz najmanje moguće troškove.

Iako optimizirani plan uvelike olakšava, svaki zapovjednik broda trebao bi voditi plovidbu temeljem vlastitog znanja i vlastitog iskustva. Općenito, pomorstvo danas je poprilično automatizirano velikom pouzdanošću u računalstvo umjesto u čovjeka.

Kroz razvoj metoda optimizacije, uočili smo koliko pogrešaka te ispravaka tih pogrešaka je potrebno kako bi doveli automatizirani sustav na zadovoljavajuću razinu točnosti. Postavlja se pitanje koliko dugo će trebati da kompletna grana pomorstva postane automatizirana. Napretkom tehnologije trebalo bi doći do značajnog olakšanja provedbe optimizacije pomorskog putovanja i u tom smislu, napredak je dobrodošao, dok bi provedbu plana plovidbe trebalo prepustiti iskusnom pomorcu kroz manipulaciju novim naprednim kompjuterskim algoritmima u svrhu optimizacije.

## LITERATURA

1. R. W. James - Application of wave forecast to maritime navigation, US Navy Hydrographic Office, Washington, 1957.
2. H. Hagiwara - Weather routing of (sail-assisted) motor vessels, Delft University of Technology, Delft, 1989
3. M. B. Klompstra - Time aspects in games and in optimal control. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology; 1992.
4. Haltiner, G.J. et al. (1962), *Minimal-time ship routing*. Journal of Applied Meteorology, Vol.1, No.1, March 1962.
5. Chen, H.T. (1978), *A dynamic program for minimum cost ship routing under uncertainty*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
6. J Hinnenthal. Robust Pareto-Optimum Routing of Ships utilizing Deterministic and Ensemble Weather Forecasts. PhD thesis, Universitätsbibliothek, 2007.
7. Bekker, J. F. and Schmid, J. P. (2006). "Planning the safe transit of a ship through a mapped minefield", JORSSA, Vol. 22
8. Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
9. Deb, K., Multi-objective Evolutionary Algorithms: Introducing Bias Among Pareto-optimal solutions, KanGAL Report Number 99002, 1999.
10. Zoppoli, R. 'Minimum-time routing as an Nstage decision process' Journal of Applied Meteorology, Vol. 11
11. Zec, D. – Planiranje pomorske plovidbe, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka (1997.)

## POPIS ILUSTRACIJA

Slika 1: sustav Kelvinovih valova.....	13
Slika 2. krivulja gubitka brzine broda po stanju mora.....	14
Slika 3: Koncept određivanja prve i druge izokrone.....	17
Slika 4: Primjer točke izokrona koja je „zaglavila“ na obali.....	18
Slika 5: grafikon PARETO granice.....	22
Slika 6: projekcija 3DMI metode.....	23
Slika 7: Primjer alternativne rute s obzirom na inicijalnu pomoću Dijkstra algoritma.....	27

## POPIS KRATICA

Kratika	Puni naziv na stranom jeziku	Puni naziv na hrvatskom jeziku
3DMI	<i>engl. three-dimensional modified isochrone</i>	trodimenzionalna modificirana izokrona
EDD	<i>engl. estimated date of departure</i>	predviđeni dan isplovljenja
LDR	<i>engl. least distance route</i>	ruta najmanje udaljenosti
LOA	<i>engl. lenght over all</i>	duljina preko svega
LPP	<i>engl. lenght between perpendiculars</i>	duljina između perpendikulara
LWL	<i>engl. loaded waterline lenght</i>	duljina na vodenoj liniji
MCR	<i>engl. minimum cost route</i>	ruta s najmanjim troškovima
MFR	<i>engl. minimum fuel route</i>	ruta s najmanjim potroškom goriva
MOO	<i>engl. multi-objective optimisation</i>	višeciljna optimizacija
MTR	<i>engl. minimum time route</i>	ruta s najmanjim vremenom plovidbe
NSGA	<i>engl. nondominated sorting genetic algorithm</i>	nedominantni sortirajući genetski algoritam
SOG	<i>engl. speed over ground</i>	brzina preko dna
STW	<i>engl. speed through water</i>	brzina kroz vodu