

Optimizacija rasporeda tereta na kontejnerskim brodovima u funkciji skraćanja prekrcajnoga procesa

Žuškin, Srđan

Doctoral thesis / Disertacija

2015

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:483965>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

Srđan Žuškin

**OPTIMIZACIJA RASPOREDA TERETA NA
KONTEJNERSKIM BRODOVIMA U FUNKCIJI
SKRAĆENJA PREKRCAJNOGA PROCESA**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2015.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

Srđan Žuškin

**OPTIMIZACIJA RASPOREDA TERETA NA
KONTEJNERSKIM BRODOVIMA U FUNKCIJI
SKRAĆENJA PREKRCAJNOGA PROCESA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Pavao Komadina

Rijeka, 2015.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF MARITIME STUDIES AT RIJEKA

Srđan Žuškin

**OPTIMIZATION OF CONTAINER
STORAGE ALLOCATION FOR
MINIMISING STOWAGE TIME**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2015

Mentor rada: prof. dr. sc. Pavao Komadina

Doktorski rad obranjen je 22. srpnja 2015. na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Izv. prof. dr. sc. Renato Ivče, predsjednik i član
2. Prof. dr. sc. Pavao Komadina, mentor i član
3. Prof. dr. sc. Svjetlana Hess, članica
4. Doc. dr. sc. Igor Rudan, član
5. Prof. dr. sc. Josip Kasum, vanjski član

ZAHVALA

U prvom redu od srca zahvaljujem svome mentoru prof. dr. sc. Pavlu Komadini, redovitom profesoru Pomorskog fakulteta u Rijeci na trajnoj potpori i korisnim savjetima, ne samo u izradi ovoga doktorskog rada, nego i na golemom povjerenju i poticaju u prvim danima rada na Pomorskom fakultetu koje traje još i danas. Od samog početka, njegova vjera davala mi je snagu i sigurnost, a zajednički razgovori izbistrili su brojne znanstvene, ali i ljudske nedoumice i probleme.

Nadalje, zahvaljujem članovima povjerenstva na korisnim savjetima i pozitivnim sugestijama koje su u konačnici podigle kvalitetu ovoga rada.

Od srca zahvaljujem cijenjenim kolegama, odnosno prijateljima dr. sc. Marku Guliću i Martini Badurina, mag. educ. na velikoj i nesebičnoj pomoći, podršci, znanju koje su strpljivo prenosili u rješavanju pojedinih informatičkih i matematičkih problema. Radili ste to bez zadržke, otvoreno i prijateljski. Hvala vam.

Na kraju, posebnu zahvalnost iskazujem svojim roditeljima Diani i Zoranu, na pruženoj moralnoj podršci, financijskoj pomoći te bezuvjetnoj ljubavi tijekom svih ovih godina, njima ujedno i posvećujem ovaj doktorski rad.

Srđan Žuškin

SAŽETAK

U doktorskom radu istražen je problem rasporeda tereta na brodovima za prijevoz kontejnera, a da se pri tome zadovolji što kraći boravak broda u luci uzimajući u obzir čimbenike koji uvjetuju raspored kontejnera. Optimizacija samog procesa temelji se na uspostavljenom modelu krcanja i slaganja tereta uvođenjem unaprijed definiranog vremena iskrcaja pojedinog kontejnera s obzirom na njegovu poziciju na brodu. U modelu su ujedno uspostavljena dva dodatna optimizacijska kriterija: optimizacija plana tereta za luke unutar regionalnog lučkog sustava te optimizacija plana sa željenim trimom u funkciji smanjenja troškova putovanja u određenom kontejnerskom linijskom servisu. Rezultati istraživanja baziraju se na razvoju modela kojim se dobiva raspored tereta na brodu kao i na uspostavi algoritma prekrcajnoga procesa. Optimizacijski proces temelji se na uspostavljenoj objektnoj funkciji cilja, razvoju matematičkog modela te njegove transformacije u programski kod. Za izradu optimalnog plana krcanja i slaganja tereta primijenio se genetski algoritam kao metaheuristička metoda optimiziranja koja se inače koristi za rješavanje različitih problema iz inženjerske prakse.

U ovome radu model je testiran prema planu stvarnog kontejnerskog linijskog servisa za referentni brod. Dobiveno rješenje kroz proces genetskog algoritma konkurentno je stvarnom planu krcanja i slaganja dobivenog od planera na terminalu. Rezultati testiranja pokazuju da je ostvarenom optimizacijom u teoretskom i funkcionalnom smislu skraćen prekrcajni proces u funkciji kraćeg boravka broda u luci te su smanjeni ukupni troškovi putovanja kroz potrošnju goriva u pomorskom plovidbenom procesu. Optimizacija rasporeda tereta na kontejnerskim brodovima direktno udovoljava zahtjevima brodara za realizaciju osnovnog principa racionalnog poslovanja. Uspostavljeni model optimizacije ujedno je ostvario očekivani doprinos u aplikativnom smislu samim ubrzanjem procesa donošenja odluke planerima, te se ujedno povećala efikasnost uz manji postotak ljudske pogreške. Time operativni planer ili bilo koji drugi sudionik procesa ima isključivo ulogu kontrole dobivenog plana rasporeda kontejnera ali ne i samog planiranja.

Ključne riječi:

Plan krcanja i slaganja tereta, optimizacija prekrcajnog procesa, genetski algoritam metaheuristike, optimalni željeni trim

SUMMARY

The PhD thesis has investigated the container allocation problem (CAP) on board container vessels with the aim of reducing the vessel's laytime by taking into consideration the factors which influence the stowage arrangement of containers. Optimization of this process is based on the established cargo stowage model and enhanced by the introduction of the predefined time of discharge for each container in regard to its position on board. This model has also established two additional optimization criteria: cargo optimization plan for ports within the *Multi-port gateway regions* and optimization of trim planning in order to reduce the voyage cost in a container liner service. The results of the research are based on the development of the model which provides the cargo arrangement outline on board as well as the loading and discharging algorithm. Optimization process is based on the objective function of the aim, development of the mathematical model and its translation into a program code. In order to create an optimal cargo stowage plan, a metaheuristic genetic algorithm was applied since this type of algorithm is typically used as a powerful tool in solving various problems in engineering practice.

The model was tested according to a cargo stowage plan of an actual container liner service for a reference vessel. Solution acquired through the process of metaheuristic genetic algorithm application is shown to be competitive with the actual cargo stowage plan obtained from the terminal cargo planner. The results show that the optimization achieved both in theoretical and functional sense shortens the time required for loading and discharging, thus reducing the vessel's laytime, fuel consumption and the overall cost of the voyage. Optimizing container allocation on board container vessels directly meets the requirements of shipping companies pertaining to the realization of the basic principle of rational operation. The established optimization model has simultaneously made an expected contribution application wise by speeding up the decision making process of the planners, thus increasing efficiency and reducing human error. As a result, an operative cargo planner or any other participant in the process only controls the application of the plan, but not the planning itself.

Key words:

Cargo stowage plan, optimization of loading and discharging process, optimal trim, metaheuristic genetic algorithm

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Problem, predmet i objekt istraživanja	1
1.2. Znanstvena hipoteza i pomoćne znanstvene hipoteze	3
1.3. Svrha i ciljevi istraživanja.....	4
1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja	5
1.5. Znanstvene metode istraživanja.....	7
1.6. Struktura doktorskog rada.....	7
2. KONTEJNERIZACIJA U PROMETU I ORGANIZACIJA SUSTAVA.....	10
2.1. Kontejnersko linijsko brodarstvo	10
2.2. Globalni trendovi i kontejnerski promet	11
2.3. Kategorizacija brodova za prijevoz kontejnera.....	15
2.4. Obilježja i podjela kontejnera	22
3. UVJETNI ČIMBENICI U FUNKCIJI OPTIMIZACIJE INICIJALNOG PLANA KRCANJA I SLAGANJA	25
3.1. Utjecaj brodskih čimbenika na inicijalni plan	26
3.1.1. Poprečna stabilnost broda za prijevoz kontejnera	26
3.1.2. Uzdužna stabilnost broda za prijevoz kontejnera	29
3.1.3. Dinamička stabilnost kontejnerskog broda	30
3.1.4. Opterećenje brodske konstrukcije na kontejnerskim brodovima	33
3.1.5. Dopusštena površinska opterećenja nosivih površina na kontejnerskim brodovima	36
3.1.6. Vidljivost sa zapovjedničkog mosta na kontejnerskim brodovima	37
3.2. Utjecaj dimenzija kontejnera i svojstva tereta na inicijalni plan	39
3.2.1. Prijevoz opasnog tereta na kontejnerskim brodovima.....	40
3.2.2. Prijevoz lakopokvarljive robe u kontejnerima	44
3.2.3. Prijevoz izvangabaritnih tereta kontejnerima	45

3.3. Utjecaj čimbenika terminala na inicijalni plan	46
3.4. Utjecaj ekonomsko-komercijalnih čimbenika brodara	47
4. PROCESI I METODOLOGIJA PLANIRANJA KRCANJA I SLAGANJA	
KONTEJNERA	51
4.1. Sistemske razine planiranja.....	51
4.2. Sudionici procesa i metodologija planiranja.....	52
5. MODEL PLANA KRCANJA I SLAGANJA TERETA.....	55
5.1. Problem dodatnih kriterija optimizacije za luke unutar regionalnog lučkog sustava	55
5.2. Problem optimizacije plana željenim trimom u funkciji smanjenja troškova putovanja	62
5.3. Matematička formulacija modela krcanja i slaganja	66
5.4. Razvoj programskog koda za formulaciju modela krcanja i slaganja	80
6. IMPLEMENTACIJA I VALIDACIJA MODELA KRCANJA I SLAGANJA	
TERETA	83
6.1. Primjena heurističkog genetskog algoritma i analiza rezultata.....	91
6.2. Utjecaj optimizacije plana krcanja i slaganja na ekonomske pokazatelje	112
7. ZAKLJUČAK.....	117
BIBLIOGRAFSKA ISTRAŽIVANJA	121
POPIS TABLICA.....	128
POPIS SLIKA.....	130
PRIVITAK 1. PROGRAMSKI KOD GENETSKOG ALGORITMA MODELA	
KRCANJA I SLAGANJA TERETA.....	131

1. UVOD

Konteinerizacija kao najviši stupanj integralnog transporta djelovala je snažno na globalni promet robe morem te je od iznimne važnosti za promjene u tehnologiji i ekonomiji. U tehnološkom smislu brodovi za prijevoz kontejnera bilježe svoj razvitak dok kontejnerski promet u svijetu kontinuirano bilježi svoj rast. Lučki kontejnerski terminali glavna su prometna čvorišta kod prijevoza kontejnera između pomorskog i kopnenog prometa te ujedno moraju pratiti tehničko-tehnološka obilježja brodova koji se razvijaju.

Planiranje lučkih kontejnerskih terminala sastoji se od triju komponenata: strateškog planiranja, taktičkog planiranja i operativnog planiranja. Za funkcionalnost luke potrebno je uskladiti sve tri glavne komponente gdje je za prvi korak potrebno dizajnirati tehnološke procese na operativnoj obali tako da se optimalno iskoriste lučki resursi. Pod resursima smatraju se vezovi za prihvat brodova te obalne kontejnerske dizalice kojima se izvodi prekrcaj robe. Taktičko i operativno planiranje kod lučkih kontejnerskih terminala uključuje dnevno planiranje koje obuhvaća brojne operativne postupke koji se odvijaju na terminalu. Planeri na terminalima imaju značajnu ulogu kod planiranja krcanja i slaganja tereta na brodovima za prijevoz kontejnera uzimajući u obzir sve čimbenike koji uvjetuju raspored kontejnera na brodu. Uz čimbenike koji uvjetuju raspored tereta ujedno se može uzimati u obzir optimizacija plana krcanja i slaganja tereta na kontejnerskim brodovima u funkciji što kraćeg boravka broda u luci. Za postizanje kraćeg boravka broda u luci te poštivajući raspored plovidbe u linijskom plovidbenom transportnom lancu zasebno se razmatra plan krcanja i slaganja tereta uz dodatnu optimizaciju za luke udružene u jedinstvenu regiju odnosno luke udružene kao jedinstven lučki sustav (*engl. Multi-port gateway region*).

Daljnja optimizacija kod planiranja krcanja i slaganja tereta pridonijet će smanjenju potrošnje goriva što direktno utječe na smanjenje ukupnih troškova za brodara u transportnom lancu.

1.1. Problem, predmet i objekt istraživanja

Raspored tereta na brodovima za prijevoz kontejnera predmet je stručnih i znanstvenih istraživanja kojima je svrha unaprijediti efikasnost sustava u funkciji postizanja što ranijeg završetka prekrcajnog procesa. Da bi se ostvario zadovoljavajući raspored kontejnera, odnosno smještaj kontejnera na određenu poziciju broda treba uzeti u obzir brojne čimbenike kao što su

rotacija putovanja, stabilnost i opterećenje brodske konstrukcije, količina i vrsta kontejnera s posebnim osvrtom na opasni teret koji se prevozi u kontejnerima i dr. Nezaobilazni čimbenici ujedno su tehničko-tehnološka obilježja pristana, lučki obalni prekrcajni sustav kao i efektivno vrijeme prekrcaja tereta te vrijeme stajanja broda u luci.

Glavni problem koji se javlja je kako najbolje rasporediti teret na brodovima za prijevoz kontejnera (engl. *Container Stowage Problem* - CSP), a da se pri tome postigne što kraći boravak broda u luci uzimajući u obzir čimbenike koji uvjetuju raspored kontejnera.

U ovoj doktorskoj disertaciji razmatrano je zasebno uvođenje dvaju novih dodatnih ograničenja za dodatnu optimizaciju krcanja i slaganja tereta:

- Problem dodatnih kriterija optimizacije za luke unutar regionalnog lučkog sustava (*Multi-port gateway regions*).
- Problem optimizacije plana u funkciji smanjenja troškova putovanja na određenoj liniji.

Uvođenje novog kriterija optimizacije za luke unutar regije razmotreno je na primjeru sjevernojadranskih luka: Rijeka, Trst, Kopar, Venecija i Ravena (engl. *North Adriatic Multiport gateway region* - NA). S obzirom na zajedničko gravitacijsko zaleđe ovi kontejnerski terminali nastupaju kao međusobno konkurentne luke naglašavajući svaka svoje pogodnosti i prednosti, međutim s druge strane djelujući kao zajednički lučki sustav Jadranskog prometnog pravca nalaze se u ulozi međusobne konkurencije.

Novi kriterij zasniva se na novoj metodologiji krcanja i slaganja tereta gdje se kontejneri, za određene luke u sastavu udruženog regionalnog lučkog sustava, raspoređuju na određenu poziciju na brodu na način da se njima može neovisno manipulirati.

Velika prednost kod takvog unaprijed definiranog plana krcanja i slaganja tereta na kontejnerskim brodovima očituje se u mogućnosti da brodar u svome linijskom servisu može izabrati redoslijed luke ticanja u sklopu regionalnog lučkog sustava. Predikcija zauzeća kontejnerskog pristana ima značajnu ulogu u određivanju novog vremena dolaska broda u luku te organizacije ticanja kontejnerskih terminala u određenoj regiji.

Drugi temeljni problem je uvođenje kriterija optimizacije trima broda u funkciji manje potrošnje goriva, odnosno smanjenje ukupnih troškova putovanja za brodara u transportnom lancu. U novijim istraživanjima brodarski instituti definirali su trim broda za određene veličine brodova za prijevoz kontejnera kod kojeg je potrošnja goriva najmanja.

Linijsko brodarstvo moglo bi se prilagoditi novom načinu optimizacije kod krcanja i slaganja tereta dovođenjem broda na točan željeni trim. S ovim dodatnim kriterijem direktno se utjecalo u organizacijskom smislu na optimalno vođenje broda smanjivanjem troškova putovanja. Jedan od ključnih čimbenika koji se brodarima nametnuo je smanjenje ukupnih troškova putovanja što je moguće direktno unaprijed postići kod operativnog plana krcanja i slaganja tereta.

Kroz navedene probleme optimizacije, u ovome doktorskom radu istražio se operativni problem planiranja krcanja i slaganja tereta na brodu, a samo istraživanje usmjereno je na dobivanje modela optimizacije. **Predmet istraživanja** je optimizacija plana krcanja i slaganja tereta na kontejnerskim brodovima gdje su uzeti u obzir čimbenici koji utječu na inicijalni plan. Predmet istraživanja se ujedno proširio s istraživanjem dodatnih čimbenika prema različitim kriterijima kojima se može optimizirati plan krcanja i slaganja tereta u svrhu smanjivanja vremena prekrcaja. Kraćim boravkom broda u luci smanjeni su ukupni troškovi u linijskom transportnom lancu.

Iz prethodnog razmatranja **objekt istraživanja** su planovi krcanja i slaganja brodova za prijevoz kontejnera, odnosno raspodjela kontejnera na brodu uzimajući u obzir gore navedene uvjete.

1.2. Znanstvena hipoteza i pomoćne znanstvene hipoteze

U skladu s definiranim problemima i predmetom istraživanja postavlja se radna hipoteza koja glasi: *Moguće je optimizirati raspored tereta na kontejnerskim brodovima s ciljem skraćivanja ukupnog vremena boravka broda u luci te smanjenja ukupnih troškova putovanja u pomorskom plovidbenom procesu izradom modela optimizacije krcanja i slaganja tereta primjenom metaheurističke metode genetskog algoritma.*

Tako postavljena znanstvena hipoteza izravno se odnosi na predmet istraživanja i implicira na nekoliko pomoćnih teza:

1. Moguće je optimizirati raspored plana krcanja i slaganja tereta u funkciji kraćeg prekrcajnog procesa.
2. Moguće je optimizirati raspored plana krcanja i slaganja tereta da se pri tome minimizira broj repozicioniranih kontejnera na brodu u funkciji kraćeg boravka broda u luci.

3. Korištenjem dodatnih ograničenja optimizacije za terminale unutar regionalnog lučkog sustava prilikom lučkog kašnjenja moguće je smanjiti vrijeme čekanja broda u linijskom transportom lancu.
4. Metodologijom krcanja i slaganja tereta gdje se uvodi točna vrijednost trima broda moguće je smanjiti potrošnju goriva u funkciji smanjenja ukupnih troškova putovanja.
5. Korištenjem metaheurističkih metoda moguće je ubrzati proces izrade plana u funkciji traženja optimalnog rješenja gdje je ujedno i moguća praktična primjenljivost na terminalima.
6. Proces krcanja i slaganja moguće je unaprijediti korištenjem modela optimizacije što ujedno ubrzava proces donošenja odluke planerima na terminalu.

Potvrda postavljene hipoteze ovisi o složenosti problema s obzirom na mogućnost dobivanja optimalnog rješenja. U ovome doktorskom radu za rješenje se podrazumijeva objektna funkcija cilja s određenim parametrima i ograničenjima gdje se u konačnici dobio model optimizacije krcanja i slaganja tereta na brodovima za prijevoz kontejnera.

1.3. Svrha i ciljevi istraživanja

Svrha istraživanja je rješavanje problema krcanja i slaganja tereta na brodovima za prijevoz kontejnera uzimajući u obzir sve čimbenike koji na njega utječu te dodatno unaprjeđenje metodologije dodajući nove dodatne kriterije za optimizaciju krcanja i slaganja tereta.

Glavni cilj ovog dokorskog rada je izrada modela optimizacije krcanja i slaganja tereta uz smanjenje ukupnih troškova za brodara unutar transportne linije. Samim time ubrzan će se proces donošenja odluke planerima na terminalu te povećati efikasnost uz manji postotak ljudske pogreške prilikom slaganja.

Za ostvarivanje svrhe i cilja istraživanja postavljeni su sljedeći zadaci istraživanja:

- analizirati procese planiranja i funkciju između planera na terminalu i brodskog planera
- utvrditi i analizirati sve čimbenike zasebno koji uvjetuju raspored kontejnera na određene pozicije broda
- postaviti i analizirati nove kriterije optimizacije koji se mogu adaptirati u model
- izvršiti transformaciju matematičkog modela u programski kod
- izvršiti strukturiranje dobivenog rješenja problema
- izvršiti validaciju modela na osnovi realnih podataka iz gospodarstva.

Ispunjavanje navedenih zadataka proveden je kroz plan istraživanja u četiri faze:

- I. FAZA – obrada zasebno svih čimbenika koji uvjetuju raspored tereta na brodovima za prijevoz kontejnera,
- II. FAZA – izrađivanje inicijalnog plana krcanja i slaganja tereta gdje su uzeti u obzir čimbenici koji uvjetuju raspored u funkciji kraćeg prekrcajnog procesa,
- III. FAZA – proširivanje problema s uvođenjem novih kriterija optimizacije (zasebno uvođenje dodatnih kriterija optimizacije plana za luke unutar regionalnog lučkog sustava te uvođenje problema optimizacije trima broda u funkciji smanjenja troškova putovanja na određenoj liniji),
- IV. FAZA – verifikacija dobivenih rezultata uz potvrdu hipoteze.

1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja

Razvoj različitih metoda u funkciji što boljeg razmjesta kontejnera na brodu predmet je stručnih i znanstvenih istraživanja kojima je svrha unaprijediti efikasnost sustava. U tu kategoriju spadaju radovi koji proučavaju optimizaciju i dobivanje ekstrema funkcije proučavajući različite ulazne parametre.

Istraživanje čimbenika i dobivanje osnovnog razmjesta kontejnera za ukrcaj na brod u znanstvenom radu spominje **Bischoff i Ratcliff** (1995). U radu autori ističu brojne faktore koji utječu na krcanje i slaganje tereta koji, prema autorima, u praksi nisu dovoljno uzeti u obzir.

Autori **Gehring i Bortfeldt** (1997) uzimaju u svom znanstvenom radu masu kontejnera kao najvažniji faktor kod raspodjele, te među prvima prikazuju rješenje koristeći genetski algoritam.

Značajan doprinos imaju **Avriel i suradnici** (1998) koji u svom radu istražuju problem krcanja i slaganja kontejnera na brod u funkciji smanjenja troškova gdje se model dinamički prilagođava te temelji na metaheurističkim metodama.

Značajan doprinos ujedno imaju **Ambrosino i suradnici** (2004, 2010) koji u svom radu optimiziraju krcanje i slaganje kontejnera s obzirom na unaprijed definirano vrijeme iskrcaja s obzirom na poziciju kontejnera na brodu. U cilju optimizacije autori koriste metodu cjelobrojnog linearnog programiranja.

Junqueira i suradnici (2011) prikazali su u svom znanstvenom radu matematički model za razmještaj tereta uzimajući u obzir stabilnost broda i dopušteno površinsko opterećenje nosivih površina. Izrađeni model temelji se na metodi linearnog binarnog programiranja.

Značajan doprinos imali su **Dubrovsky i suradnici** (2002), **Gonçalves i suradnici** (2009, 2010, 2012), **Bortfeldt i suradnici** (2001, 2002), **Gehring i suradnici** (2002) koji su u svojim radovima analizirali optimalni raspored kontejnera na brodu te su ponudili rješenje koristeći genetski algoritam.

U novije vrijeme značajan rad objavili su **Monaco i suradnici** (2014) koji su krcanje i slaganje tereta na brodove prikazali kroz faze terminalnog planiranja u funkciji smanjenja troškova prekrcaja. Za rješavanje modela prikazan je odgovarajući metaheuristički algoritam.

Za brodove veće od 12 000 TEU plan krcanja i slaganja tereta postaje ključan faktor u izračunavanju operativnih troškova. Zapravo, kao što je navedeno u radu **Delgado i suradnici** (2012) za tako velike brodove planiranje razmještaja tereta direktno je u funkciji što kraćeg boravka broda u luci te znatnog smanjenja lučkih pristojbi.

Rodrigue i suradnici (2011) u svom radu obrazložili su da kraći boravak broda u luci u odnosu na predviđeno vrijeme pruža mogućnost plovidbe po smanjenoj brzini što direktno ima za funkciju smanjenje potrošnje goriva te ujedno smanjenje emisije štetnih plinova.

Model koji su definirali **Imai i suradnici** (2008) s obzirom na raspored tereta unaprijed je određeno vrijeme prekrcajnog procesa i zahtijevani broj dizalica po brodu. Problem dodjeljivanja broja dizalica se riješio pomoću metaheurističkog algoritma u funkciji ranijeg završetka prekrcajnog procesa.

U ovome doktorskom radu uvođenje novih dodatnih kriterija optimizacije za luke unutar regionalnog lučkog sustava obrađivao je autor **Notteboom** (2009, 2010) koji ističe organizacijsku i ekonomsku prednosti udruživanja specifičnih luka u određenu regiju. Njegovu ideju nastavili su **E. Twrđy i suradnici** (2014) koji su analizirali sjevernojadransku regiju s udruženim lukama (Rijeka, Trst, Kopar, Venecija i Ravena) gdje se analizirala međusobna konkurentnost luka, ali i konkurentnost zajedničkog lučkog sustava u odnosu na druge prometne pravce.

Zbog povećanja cijene goriva sve je više studija i znanstvenih radova koji se bave optimizacijom u funkciji smanjenja potrošnje goriva. Autor **Armstrong** (2013) u svom radu prikazao je mogućnosti značajne uštede goriva na način optimizacije trima kao jedne od

metoda, dok **Notteboom i Varnimmen** (2009) proučavaju kako se efekt visoke cijene goriva odražava na linijski kontejnerski servis. Od značajnih studija potrebno je naglasiti dvije; prva studija govori o uštedi goriva koja se postiže optimizacijom trima – izrađena od strane DET NORSKE VERITAS Maritime Advisory (2010), druga studija temelji se na optimizaciji putovanja u funkciji smanjenja potrošnje goriva te smanjenja ispušnih plinova – izrađena od strane OCIMF-a (*Oil Companies International Marine Forum*) u 2010. godini.

1.5. Znanstvene metode istraživanja

U ovome doktorskom radu će se tijekom znanstvenog istraživanja, formuliranja i prezentiranja rezultata istraživanja, koji polaze od optimizacije plana krcanja i slaganja tereta, koristiti brojne znanstvene metode pomoću kojih će se istražiti postavljeni problem i predmet istraživanja, te dokazati postavljena znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze.

U obradi ove tematike koristit će se sljedeće metode istraživanja bitne za izučavanje pojedinih tema: metoda analize i sinteze, indukcija i dedukcija, metoda deskripcije, metoda klasifikacije i komparacije, statističke metode, metoda kompilacije, opća teorija sustava, metoda generalizacije i specijalizacije. Korištenjem spomenutih metoda omogućeno je određivanje svih utjecajnih čimbenika, relevantnih za navedenu problematiku istraživanja.

Glavni dio ovog dokorskog rada odnosi se na optimizaciju plana krcanja i slaganja tereta temeljen je na postavljenom modelu cjelobrojnog linearnog programiranja koji je riješen uporabom metaheurističkog genetskog algoritma. Za dokazivanje koriste se numerički eksperimenti te realni podaci od strane planera na terminalu. Za potrebe znanstvenog istraživanja korištene su sve raspoložive baze podataka, dokumentacija, bibliografija i drugi izvori.

1.6. Struktura dokorskog rada

Doktorski rad pod naslovom OPTIMIZACIJA RASPOREDA TERETA NA KONTEJNERSKIM BRODOVIMA U FUNKCIJI SKRAĆENJA PREKRCAJNOGA PROCESA sastoji se od sedam poglavlja.

U uvodnom poglavlju definiran je problem, predmet i objekt istraživanja. Postavljena je znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze istraživanja te svrha i cilj ovoga dokorskog rada.

Pri kraju uvodnog dijela uz osnovni pregled dosadašnjih istraživanja, postavile su se osnovne metode istraživanja koje su korištene u izradi ovoga rada.

U drugom poglavlju analiziran je razvoj kontejnerizacije i organizacija sustava, prikazani su svjetski kontejnerski trendovi razvoja, kontejnersko linijsko brodarstvo i globalni promet kontejnera morem. Pri kraju ovoga poglavlja opisana su tehnička obilježja brodova, konstrukcijske karakteristike te obilježja i podjela kontejnera kao tereta koji se prevozi.

U trećem poglavlju sustavno su se definirali i analizirali čimbenici koji uvjetuju raspored kontejnera na određene pozicije broda s naglaskom na optimizaciju. Nakon formuliranja čimbenika u četiri cjeline: brodski čimbenici, čimbenici svojstva tereta i dimenzije kontejnera, čimbenici terminala, te ekonomsko-komercijalni čimbenici, pristupilo se metodološkom pristupu rješavanja problema krcanja i slaganja.

U četvrtom poglavlju prikazani su sadašnji generalni procesi planiranja krcanja i slaganja tereta. Uz uspostavljenu metodologija sustava opisane su sistemske razine planiranja te osnovna funkcija svih sudionika u procesu planiranja.

Peto poglavlje predstavlja glavno poglavlje, odnosno model optimizacije plana krcanja i slaganja tereta na kontejnerskim brodovima s ciljem skraćivanja boravka broda u luci te smanjenja ukupnih troškova putovanja za brodara. Značajni doprinos ovoga rada je uspostava modela kojim se skratio prekrcajni proces u funkciji kraćeg boravka broda u luci. Također, dodatna optimizacija postigla se dodavanjem dodatnih kriterija optimizacije za luke unutar regionalnog lučkog sustava. Za navedeni kriterij proučavala se mogućnost uspostave procesa planiranja gdje je predstavljen novi algoritam procesa. Nadalje, u ovome dijelu uspostavio se kriterij optimizacije trima broda u funkciji smanjenja troškova putovanja na određenom kontejnerskom linijskom servisu, te je nakon postavljanja matematičke formulacije modela prikazano modeliranje i razvoj programskog koda.

Validacija modela prikazana je u šestom poglavlju kao i implementacija na primjeru sjevernojadranskih luka. Implementacija i validacija modela prikazana je kroz analizu rješenja (planova krcanja i slaganja) dobivenih primjenom metaheurističkog genetskog algoritma.

Uzimajući u obzir podatke iz lokalnih područja prikazan je utjecaj optimizacije plana krcanja i slaganja na ekonomske pokazatelje s jasno prikazanim značajnim uštedama, što je ujedno aplikativni doprinos ovog doktorskog rada.

U zaključnom poglavlju objedinila se cjelovita izražena problematika s istaknutim znanstvenim doprinosima do kojih se došlo tijekom cjelovitog ciklusa izrade ovoga doktorskog rada te je ujedno istaknuta preporuka za daljnja istraživanja.

2. KONTEJNERIZACIJA U PROMETU I ORGANIZACIJA SUSTAVA

2.1. Kontejnersko linijsko brodarstvo

Sustav pomorskog brodarstva općenito je definiran kao skup elemenata, tehnološke, tehničke, organizacijske, ekonomske i pravne prirode kojemu je svrha obavljanje morskih gospodarstvenih djelatnosti te je usmjeren ciljevima organiziranja i unaprjeđivanja svih djelatnosti u svezi s morem.¹ Morsko brodarstvo definira se kao podsustav pomorskog brodarstva, a izražava se kroz gospodarsku djelatnost koja morem prevozi teret i putnike od luke ukrcaja do luke iskrcaja. Morsko brodarstvo može se zasebno razmatrati kao teretno i putničko brodarstvo, dok teretno brodarstvo možemo podijeliti u dvije osnovne kategorije:

- slobodno brodarstvo
- linijsko brodarstvo.

U kontekstu doktorskog rada potrebno je definirati linijsko brodarstvo i jasno prikazati razlike između obalnog linijskog i kontejnerskog brodarstva.

Linijsko brodarstvo² je organizirana djelatnost prijevoza robe morskim i vodenim putom jednim brodom ili više brodova opremljenih za siguran ukrcaj, prijevoz i iskrcaj roba namijenjenih pomorskom prijevozu, dijelom ili cijelim kapacitetom, između luka opremljenih za ukrcaj i iskrcaj takvih roba, najkraćim sigurnim plovnom putom prema unaprijed objavljenom redu plovidbe.

Obalno linijsko brodarstvo smatra se ono putovanje koje nije prekooceansko, a izvodi se također između luka opremljenih za ukrcaj i iskrcaj najkraćim sigurnim plovnom putom prema unaprijed definiranom plovidbenom redu.

Kontejnersko brodarstvo postaje najviše zastupljeno u obalnom linijskom brodarstvu te je prisutno na tržištu više desetljeća gdje su konstantno vidljivi trendovi rasta. Današnji razvoj i organizacija linijskog kontejnerskog brodarstva proširila se u opsegu pružanja usluga na način da se umjesto „od luka do luka“ prijevozna usluga pruža od proizvođača do potrošača, odnosno „od vrata do vrata“ kombiniranim transportom. Zasižno, naziv kombinirani transport je od najšireg značaja i obuhvaća sve varijante korištenja različitih transportnih sredstava na putu

¹ Mrnjavac, E., Pomorski sustavi, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 1998.

² Bukša, J., *Upravljanje poslovno-tehnološkim rizicima u obalnom linijskom kontejnerskom brodarstvu*, doktorski rad, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2011.

robe od proizvođača do tržišta, stoga je potrebno definirati razliku između integralnog i multimodalnog transporta.

Kontejnerizacija, kao najviši stupanj integralnog transporta je oblik rukovanja i prijevoza generalnog tereta u kojem se teret objedinjuje i okrupnjuje u veće jedinice pomoću posebnih tehničkih sredstava trajne prirode, čime se omogućuje primjena suvremene mehanizacije i postizanje neobično visoke produktivnosti, odnosno vrlo visokih pretovarnih učinaka.³ Paralelno s razvojem integralnog transporta javlja se i multimodalni transport koji se definira kao istovremena upotreba dvaju transportnih sredstava iz dviju različitih grana transporta, kod čega prvo transportno sredstvo s teretom, predstavlja teret glavnom transportnom sredstvu.⁴

Kontejnersko linijsko brodarstvo podrazumijeva organiziranu djelatnost prijevoza morskim i vodenim putom kontejnera brodom namijenjenim za prijevoz kontejnera između lučkih kontejnerskih terminala najkraćim sigurnim plovnom putom prema unaprijed objavljenom redu plovidbe. Nadalje, poslovanje brodara u linijskom brodarstvu temelji se ujedno na predaji kontejnera do krajnjeg potrošača različitim tehnologijama prijevoza i prekrcaja, koristeći zasigurno integralni i/ili multimodalni transport.

U sljedećim poglavljima ovoga doktorskog rada temeljito se prikazuje i analizira svjetski kontejnerski promet koji je prikazan na najznačajnijim prekoceanskim pravcima kako bi se lakše shvatila uloga i značaj kontejnerskog linijskog brodarstva u pomorstvu.

2.2. Globalni trendovi i kontejnerski promet

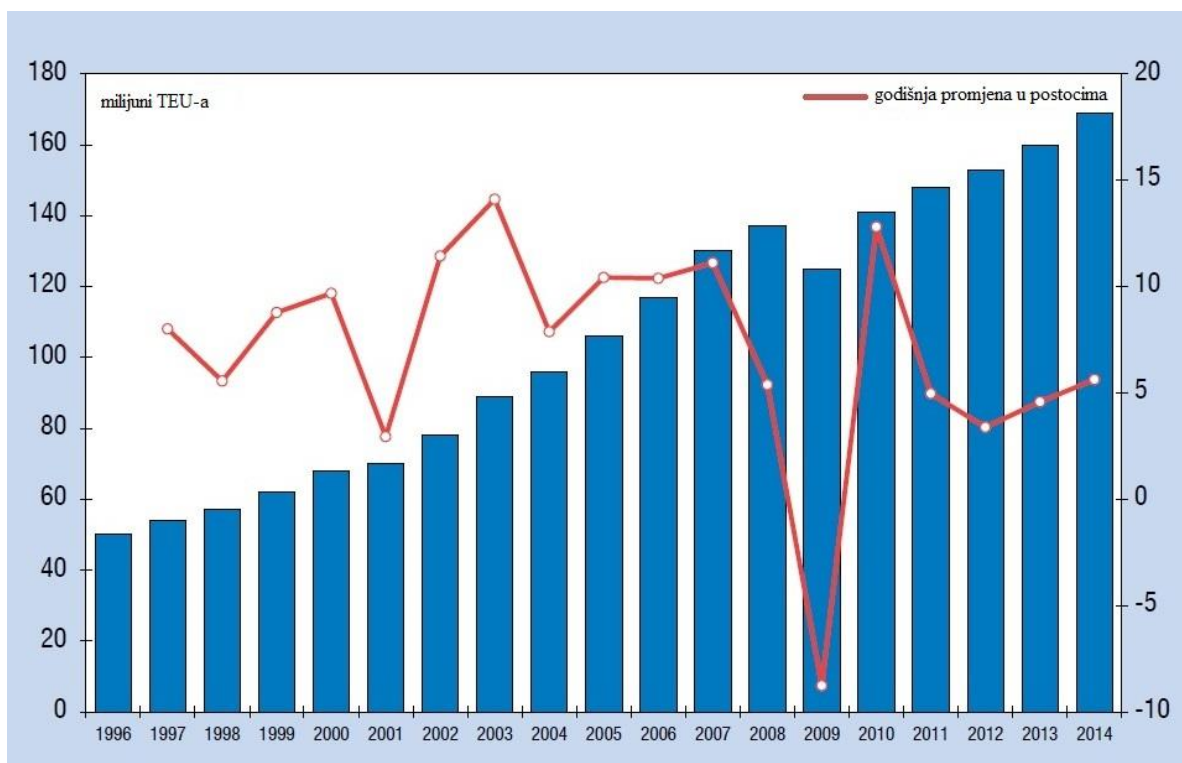
U tehnološkom smislu brodovi za prijevoz kontejnera bilježe svoj razvitak dok globalni kontejnerski promet kontinuirano bilježi svoj rast. Svjetska globalna ekonomija i međunarodni promet robe direktno je povezan s trendom razvoja linijskog kontejnerskog brodarstva.

Prema UCTAD-u (engl. *United Nations Conference on Trade and Development*) analizirajući globalnu prekomorsku trgovinu uzimajući u obzir sve vrste tereta u 2014. godini prevezeno je 9,54 milijardi tona tereta, gdje kontejneriziranom teretu pripada 1,52 milijarda tona tereta, odnosno 15,93 % od ukupne svjetske trgovine.

³ Komadina, P., *Brodovi multimodalnog transportnog sustava*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2001.

⁴ Ibidem

Na slici 1 prikazan je svjetski prekomorski prijevoz kontejnerima izražen u milijunima TEU-a kao i postotak godišnje promjene. U promatranom razdoblju najveći svjetski promet prevezenih kontejnera zabilježen je u 2014. godini od približno 170 milijuna TEU-a. Najveći pad zabilježen je u 2009. godini kao posljedica svjetske ekonomske krize koja se direktno odrazila na svjetski kontejnerski promet.



Slika 1. Svjetski kontejnerski promet u razdoblju od 1996. do 2014. godine
Izvor: Review of Maritime Transport 2014, UNCTAD, United Nations, Geneva, 2014.

Na svjetskom kontejnerskom tržištu zaključno s 2014. godinom aktivno je 490 redovitih kontejnerskih linijskih servisa⁵, međutim cijeli globalni linijski kontejnerski promet odnosi se na tri glavna linijska preookeanska robna pravca:

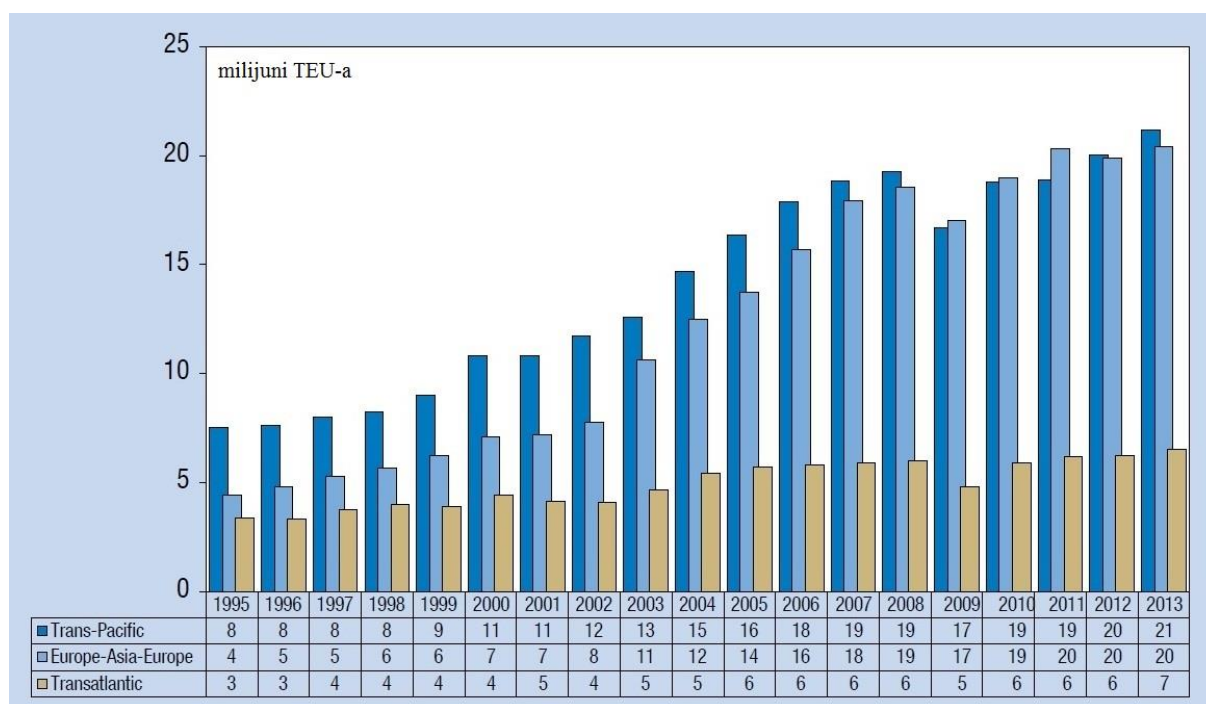
- Transpacički pravac (engl. *Transpacific*)
- Transatlantski pravac (engl. *Transatlantic*)
- Pravac Europa – Azija.

Transpacički pravac odnosi se na glavni pravac između Dalekog istoka i Sjeverne Amerike, dok se Transatlantski pravac odnosi na pravcu između Europe i Sjeverne Amerike. Također jedan od najintenzivnijih pravaca uspostavljen je između Europe i Dalekog istoka

⁵ Drewry Container Forecaster Q1 and Q2
(<http://www.worldshipping.org/about-the-industry/global-trade/trade-routes>)

brodskim linijama koji uključuju najveće novosagrađene kontejnerske brodove kapaciteta većeg od 11 000 TEU-a.

Slika 2 prikazuje kretanje kontejnerskog prometa na glavnim linijskim prekooceanskim pravcima za razdoblje od 1995. do 2013. godine gdje je vidljiv najveći kontejnerski promet na transpacičkom pravcu.



Slika 2. Kontejnerski promet po najznačajnijim prekooceanskim pravcima
Izvor: Review of Maritime Transport 2014, UNCTAD, United Nations, Geneva, 2014.

Prema UNCTAD-u ukupan kontejnerski promet koji je ostvaren ovim prometnim pravcima za 2013. godinu približno iznosi 48,3 milijuna TEU-a⁶ ili 30,2 % od ukupne globalne trgovine kontejnerima.

Nakon statističke analize kontejnerskog prometa promatrajući glavne linijske prekooceanske tokove potrebno je prikazati ostvareni kontejnerski promet vodećih svjetskih luka.

⁶ (TEU – Twenty-foot Equivalent Unit - volumen standardnog 20-stopnog ISO kontejnera)

Tablica 1. Kontejnerski promet vodećih svjetskih luka u 2013. godini

Br.	Ime luke	Promet [TEU]	Postotak promjene [%]
1.	Shanghai (Kina)	36.617.000	+2,62
2.	Singapore (Singapore)	32.600.000	+5,72
3.	Shenzhen (Kina)	23.279.000	+1,64
4.	Hong Kong (Hong Kong)	22.352.000	-5,20
5.	Busan (Korea)	17.686.000	+5,32
6.	Ningbo (Kina)	17.351.000	+6,70
7.	Qingdao (Kina)	15.520.000	+11,39
8.	Guangzhou (Kina)	15.309.000	+2,39
9.	Dubai (UAE)	13.641.000	+2,08
10.	Tianjin (Kina)	13.000.000	+6,96

Izvor: Autor prema Review of Maritime Transport 2014, UNCTAD, United Nations, Geneva, 2014.

U tablici 1 prikazan je kontejnerski promet u TEU jedinicama analizirajući deset vodećih svjetskih luka u 2013. godini te postotak promjene u odnosu na 2012. godinu. Analizirajući podatke vidljivo je da se globalna kontejnerizacija bazira na tržištu Dalekog istoka odakle se uz međuregionalnu trgovinu uspostavilo i glavno svjetsko prekrcajno središte. Navedene odredišne luke baziraju se na velikim ulaganjima u moderna i brojna lučka prekrcajna sredstva, razvoj infrastrukture i kontejnerskih privezišta koja omogućuju prihvatanje najvećih brodova za prekrcaj kontejnera, kao i dobru prometnu povezanost koristeći cestovni i željeznički promet. Ukupni kontejnerski promet Kine, izuzev Hong Konga, čini 26,8 % od ukupnog svjetskog kontejnerskog prometa dok je najveća vodeća svjetska kontejnerska luka Shanghai (Kina) u 2013. godini ostvarila promet od 36.617.000 TEU-a s tendencijom rasta u odnosu na 2012. godinu od 2,62 %.⁷ Analizirajući postotak rasta u odnosu na prethodnu godinu, najveći rast kontejnerskog prometa zabilježen je u luci Qingdao (Kina) dok je negativan trend kontejnerskog prometa zabilježen u Hong Kongu.

⁷ Review of Maritime Transport 2014, UNCTAD, United Nations, Geneva, 2014.

U ovome doktorskom radu nakon prikaza ostvarenog kontejnerskog prometa vodećih svjetskih luka te prikaza globalnih linijskih kontejnerskih servisa potrebno je analizirati i podijeliti brodove za prijevoz kontejnera kao i strukturu svjetskih kontejnerskih kapaciteta.

2.3. Kategorizacija brodova za prijevoz kontejnera

Brodovi za prijevoz kontejnera mogu se podijeliti i svrstati u različite grupacije prema; svojstvima koja brodovi posjeduju, tehnici prekrcanja s različitim podgrupama, tehnološkim razvojnim ciklusima, konstrukcijsko-tehničkim karakteristikama, te tehnološko eksploatacijskim parametrima. Različiti autori^{8,9} su različito definirali podjelu, stoga ne postoji istoznačna podjela brodova za prijevoz kontejnera.

Kroz povijest razvoja od 1966. godine potrebno je prvenstveno definirati podjelu brodova koji krcaju kontejnere Lo-Lo sustavom (engl. *Lift on-Lift off*, vertikalni način manipulacije):¹⁰

- **Klasični trgovački brodovi** – brodovi bez namjenske opreme za prihvat i učvršćenje,
- **Preuredivi višenamjenski brodovi** – preuredivi kontejnerski brodovi (engl. *Multipurpose ships - convertible container ships*); njihova je specifičnost da se prema potrebi mogu preurediti za prijevoz kontejnera, a opremljeni su kontejnerskom opremom koja se može koristiti u razne svrhe,
- **djelomično kontejnerski brodovi** (engl. *Partial container ships ili semi container ships*) – konstruirani su tako da se dijelom mogu upotrebljavati za prijevoz kontejnera, a dijelom za prijevoz klasičnog generalnog tereta; imaju stalnu opremu za prijevoz kontejnera iako su u osnovi građeni i opremljeni i za druge namjene,
- **potpuno kontejnerski brodovi** (engl. *Full container ships*) – imaju ćelije za smještaj kontejnera u unutrašnjosti broda (engl. *Cellular type*) te više redova na palubi; to su usko specijalizirani brodovi namijenjeni isključivo za prijevoz kontejnera.

U ovom doktorskom radu proučavaju se potpuno kontejnerski brodovi i njihov optimalni raspored kontejnera kojima je svrha unaprijediti efikasnost sustava. Radi boljeg razumijevanja ove problematike potrebno je analizirati veličine i cikluse razvoja kontejnerskih brodova.

⁸ Cullinane, K., Khanna, M., Economics of Scale in Large Containership, Journal of Transport Geography, Vol. 8, 2000.

⁹ Syafi, I., Tendeny of world container transportation, Simposium XI FSTPT, University Diponegoro Semarang, 2008.

¹⁰ Vranić, D., Kos, S., Morska kontejnerska transportna tehnologija I., Pomorski fakultet u Rijeci, 2008.

Ciklusni razvoj potpuno kontejnerskih brodova po klasama ovisno o prijevoznom kapacitetu, širini i duljini broda prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Ciklusni razvoj kontejnerskih brodova kroz generacije

Razvojni ciklus (generacije)	Klase kontejnerskih brodova	Kapacitet [TEU]	Duljina [m]	Širina [m]
I. generacija	Konvertirani (Preuredivi višenamjenski brodovi)	do 1.000	od 135 do 200	od 17 do 23
II. generacija	Potpuno kontejnerski brodovi (Celularni)	od 1.000 do 2.500	od 200 do 250	od 23 do 30
III. generacija	Panamax klasa	od 2.500 do 4.500	od 250 do 290	32,2
IV. generacija	Postpanamax klasa	od 4.500 do 10.000	od 290 do 370	od 32 do 49
V. generacija	Nova Panamax klasa (VLCV)	od 10.000 do 13.000	366	49
VI. generacija	Nova Postpanamax klasa (ULCV)	od 13.000 do 18.000	od 370 do 400	od 49 do 56
VII. generacija	Malacca klasa	od 18.000 do 20.000	od 370 do 400	od 56 do 60
VIII. generacija	Postmalacca klasa	od 20.000	veća od 400	veća od 60

Izvor: Autor prema dostupnim podacima (www.alphaliner.com)

Prva generacija brodova bili su zapravo konvertirani, odnosno preuredivi višenamjenski brodovi koji su se mogli upotrebljavati za prijevoz kontejnera, a ujedno su dijelom služili za prijevoz klasičnog generalnog tereta.

Druga generacija kontejnerskih brodova nedvojbeno je začetak razvoja potpuno kontejnerskih brodova koja se počela razvijati 1970-ih godina.

Treća generacija kontejnerskih brodova pripisuje se Panamax klasi, odnosno brodovima koji svojim tipičnim maksimalnim dimenzijama mogu proći Panamskim kanalom. (duljina broda 290 m, širina broda 32,2 m i gaz do 12,05 m).

Četvrtu generaciju u 80-im godinama prošlog stoljeća obilježili su kontejnerski brodovi Postpanamax klase, odnosno brodovi koji svojim dimenzijama ne mogu proći Panamskim

kanalom. Peta generacija povezuje se s novim dimenzijama Panamskog kanala koji će kompletno biti u funkciji početkom 2016. godine.

Generacija kontejnerskih brodova nove Panamax klase imat će nove tipične maksimalne dimenzije (duljina preko svega 366 m, širina broda 49 m, gaz broda 15,2 m).¹¹

Petu generaciju kontejnerskih brodova ujedno nazivamo *Very Large Container Vessel* (VLCV), dok šestu generaciju nove Postpanamax klase nazivamo *Ultra Large Container Vessel* (ULCV). Brodovi šeste generacije dimenzija većih od širine novog Panamskog kanala obavljaju redoviti linijski servis od 2008. godine. Predstavnik ove generacije je E klasa¹² od kompanije *Maersk* koja je za razliku od pete generacije značajno promijenjena u konstrukcijskim karakteristikama.

Brodovi šeste generacije nadgrađe imaju na sredini broda kao i strojarnicu što se kasnije pokazala konstrukcijskom negativnom izvedbom radi predugačke osovine koja je nakon određenog perioda imala zabilježenu deformaciju. Brodovi s nadgrađem na sredini ujedno imaju limitiran broj kontejnera po visini smještenih na palubi radi vidljivosti s zapovjedničkog mosta po SOLAS-u (minimalno 500 m).¹³

Brodovi sedme generacije bilježe značajne konstrukcijske promjene iz razloga što je kontejnerski brod konstruiran s dva nadgrađa (jedno po pramcu i drugo po krmi). S ovakvom izvedbom, sa strojarnicom smještenom po krmi, smanjila se duljina osovine čime se povećao kapacitet skladišnog prostora. Smještajem nadgrađa po pramcu povećala se vidljivost s zapovjedničkog mosta prema SOLAS-u te ujedno dobila mogućnost da se slaže više kontejnera u visinu na palubi. Predstavnik generacije Malacca klase je prvi brod izgrađen u Triple E klasi; *Maersk Mc-Kinney Møller* (kapacitet 18.270 TEU-a, duljina preko svega 399 m, širina 59 m). Značajna razlika kod kontejnerskih brodova u ovoj klasi je izvedba pogona s dva stroja (2 x 29.680 kW - MAN-B&W), ujedno i sa dva vijka i dva lista kormila.

Brodar *Maersk* predstavio je Malacca klasu brodova kroz Triple E klasu što znači:

- Ekonomičnost veličine (engl. *Economy of scale*)
- Energetska učinkovitost (engl. *Energy efficient*)
- Ekološko poboljšanje (engl. *Environmentally improved vessel*).

¹¹ Najveći brod za prijevoz kontejnera koji će moći proći novim Panamskim kanalom bit će npr. brod *Maersk Edison* čiji je kapacitet 13.100 TEU-a, duljine preko svega 366 m, širine broda 48,3 m.

¹² Predstavnik šeste generacije je prvi brod u E klasi; *Emma Maersk* (kapacitet 13.000 TEU-a, duljina preko svega 397 m, širina 56 m).

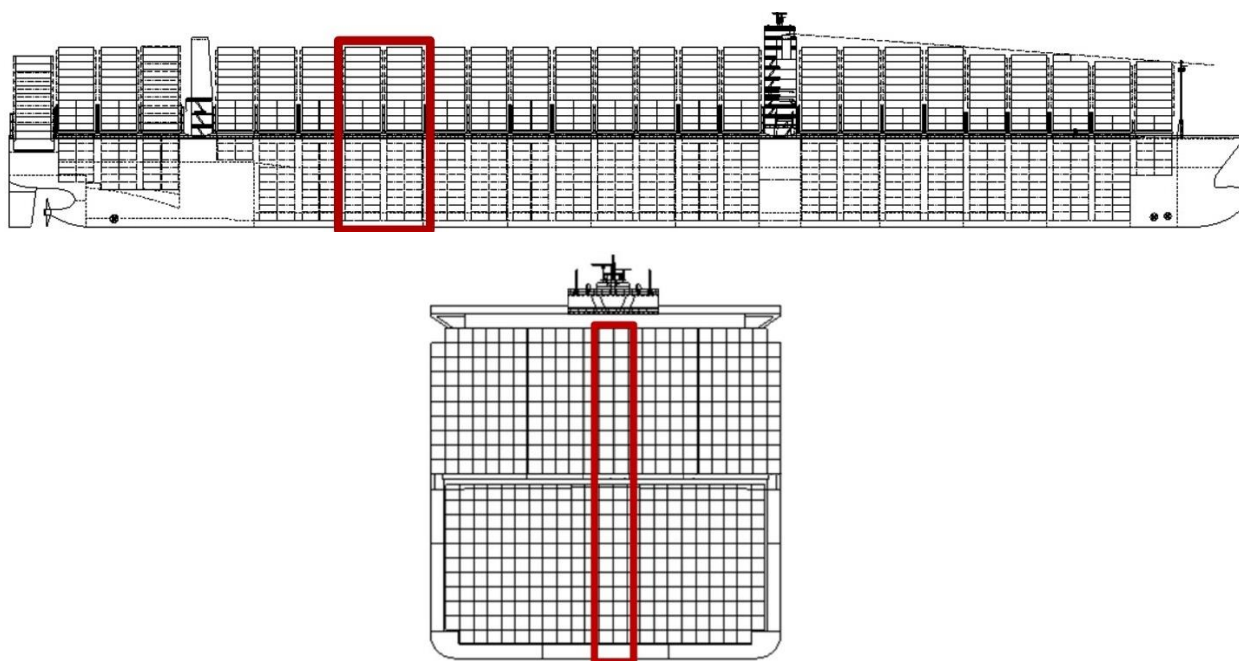
¹³ SOLAS (eng. Safety of life at sea, Chapter V, Regulation 22 – Navigation Bridge Visibility).

Najveći brod za prijevoz kontejnera u eksploataciji u vrijeme pisanja ovog doktorskog rada je *MSC Oscar* koji također pripada sedmoj generaciji čiji je kapacitet 19.224 TEU-a, duljina preko svega 395,4 m, širina 59 m te maksimalni gaz broda 16 m.

Osma generacija brodova za prijevoz kontejnera još nije u eksploataciji, međutim njihova gradnja počela je s početkom 2015. godine. Generacija Postmalacca klasa ograničena je prolaskom kroz Malacca tjesnac gdje su radi operativne efikasnosti postavljena ograničenja za kontejnerske brodove na maksimalnu duljinu broda od 400 m, širinu od 60 m i gaz broda od 14,5 m.¹⁴

Osma generacija kontejnerskih brodova već do 2018. godine postići će značajno povećanje prijevoznog kapaciteta od 22.750 TEU-a čije su dimenzije broda: duljina preko svega 429,2 m i širina 63,8 m, stoga ova generacija brodova za prijevoz kontejnera izabrat će alternativni put između Dalekog istoka i Europe kroz indonezijski prolaz *Makassar*.

Na slici 4 vidljivo je da će ovi brodovi imati 25 kontejnera u redu u odnosu na širinu broda, 11 kontejnera vertikalno po visini u skladištu te 10 kontejnera vertikalno po visini na palubi broda.



Slika 3. Uzdužni i poprečni presjek kontejnerskog broda VIII. generacije
Izvor: Bergmann, J., Future development of ultra large container ships, DNV, GL, 2014.

¹⁴ <http://maritime-connector.com/malaccamax/>

Kontejnerski brodovi osme generacije značajno će povećati profitabilnost i smanjiti trošak prijevoza po TEU jedinici, međutim javit će se značajna ograničenja jer većina svjetskih lučkih kontejnerskih terminala neće biti opremljena s adekvatnom infrastrukturom te suprastrukturom, odnosno odgovarajućim mostnim dizalicama s dovoljnom visinom i maksimalnim radnim dohvatom, dovoljnom duljinom pristana, odgovarajućim gazom na terminalu s dovoljno velikim područjem okreta za takve brodove. Lučki kontejnerski terminali glavna su prometna čvorišta u prijevozu kontejnera morem te stoga moraju pratiti razvoj tehničko-tehnoloških obilježja brodova.

Porastom kapaciteta kontejnerskih brodova mijenja se također i način održavanja servisnih linija. Brodovi većih kapaciteta u kružnom servisu uplovljavaju u svega nekoliko prekrcajnih luka zbog prethodno navedenih ograničenja. Brodovi većeg kapaciteta ujedno imaju i veće lučke troškove koji su ovisni o obilježjima broda, stoga je za očekivati da broj ticanja luka takvih brodova bude ograničen.

Analizirajući 2014. godinu prema UNCTAD-u ukupna nosivost svih brodova za prijevoz kontejnera iznosi 216.345.000 DWT-a¹⁵, dok ukupna nosivost cjelokupne svjetske flote iznosi 1.691.628.000 DWT-a, što znači da 12,8 % pripada brodovima za prijevoz kontejnera u odnosu na svjetsku flotu. Ukoliko se uspoređuju ovi podaci s 2013. godinom, ukupna nosivost svih kontejnerskih brodova ima trend rasta za 4,7 %.

Prema statističkim podacima iz 2014. godine ukupan broj potpuno kontejnerskih brodova u eksploataciji iznosi 5.008 brodova, dok njihov ukupni prijevozni kapacitet iznosi 18.059.924 TEU-a.¹⁶

¹⁵ Ukupna nosivost (engl. DEADWEIGHT-DWT, [t])

¹⁶ <http://www.alphaliner.com/top100/>

Tablica 3. Pregled veličine i ukupan broj potpuno kontejnerskih brodova u 2014. godini

Potpuno kontejnerski brodovi prema kapacitetu [TEU]	Ukupan broj potpuno kontejnerskih brodova	Ukupan broj TEU-a
13.300 – 19.000	88	1.291.438
10.000 – 13.299	162	1.949.666
7.500 – 9.999	397	3.463.292
5.100 – 7.499	496	3.054.534
4.000 – 5.099	743	3.367.590
3.000 – 3.999	256	881.523
2.000 – 2.999	653	1.660.757
1.500 – 1.999	565	964.002
1.000 – 1499	680	792.751
500 – 999	763	568.120
100 – 499	205	66.251
Ukupno	5.008	18.059.924

Izvor: Pineiro, R., G., The containership market, FONASBA Annual meeting, Gothenburg, 2014.

Iz prethodne tablice vidljivo je da su najbrojniji potpuno kontejnerski brodovi prema kapacitetu od 500 do 999 TEU-a. Najmanji broj potpuno kontejnerskih brodova je onih iz VI. i VII. generacije razvojnog ciklusa prema kapacitetu od 13.300 do 19.000 TEU-a, no međutim njihov ukupni kapacitet iznosi 1.291.438 TEU-a.

U 2013. godini na dan 1. siječnja 2013. godine broj potpuno kontejnerskih brodova iznosio je 4.961, a njihov brodski kapacitet (engl. *vessel container capacity*) iznosi 16.335.045 TEU-a.¹⁷ Analizirajući prethodnu godinu vidljiv je porast broja potpunih kontejnerskih brodova od približno 1 % dok je za 9,5 % porastao ukupan broj brodskog kapaciteta u TEU jedinicama.

Prema statističkim podacima u 2014. godini od ukupnog broja potpuno kontejnerskih brodova 2.735 brodova je u najmu odnosno 45,4 % što je značajno za poslovanje brodara. U tablici 4 prikazano je 10 najvećih svjetskih brodara koji upravljaju globalnom kontejnerskom flotom i linijskim kontejnerskim servisom.

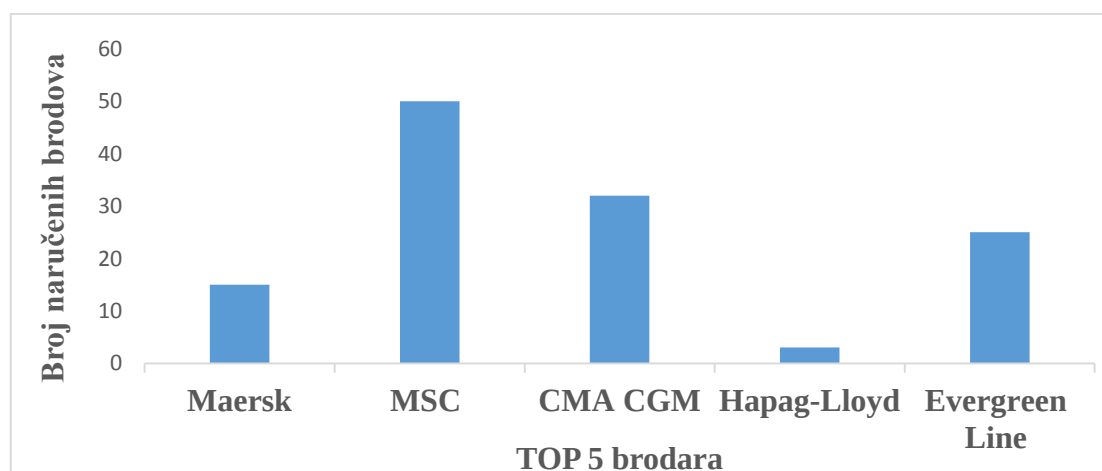
¹⁷ Karmelić, J., Određivanje konkurentskih sposobnosti linijskog kontejnerskog servisa, doktorski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, 2014.

Tablica 4. Najveći svjetski kontejnerski brodari u 2014. godini

Br.	Svjetski brodari	Vlastiti brodovi	Brodovi u najmu	Ukupan broj brodova	Naručeni brodovi
1.	Maersk Group	252	358	610	16
2.	Mediterranean Shipping Company S.A. (MSC)	190	313	503	52
3.	CMA CGM Group	82	375	457	33
4.	Evergreen Line	111	91	202	24
5.	Hapag-Lloyd	79	104	183	3
6.	COSCO Container Line	90	70	160	10
7.	CSCL	69	71	140	2
8.	MOL	30	81	111	12
9.	Hanjin Shipping	38	63	101	4
10.	APL	50	39	89	0

Izvor: Autor prema dostupnim podacima (www.alphaliner.com)

Iz prethodne tablice vidljivo je da se poslovanje svjetskih brodara temelji na brodovima u najmu s kojima se održava određeni linijski servis. Brodarske kompanije koje se sastoje od više kontejnerskih brodova i većim kapacitetom imaju mogućnost postavljanja manje brodova u isti linijski kontejnerski servis čime se smanjuje trošak po TEU jedinici. U linijskom kontejnerskom brodarstvu ujedno su značajne određene grupacije između pojedinih svjetskih brodara kako bi se povećala kooperativnost, a time i povećala pokrivenost područja. Prednosti brodarskih kooperacija su između ostalog i podjela troškova održavanja na određenoj liniji, veća pojedina kapitalna ulaganja u brodske kapacitete, konkurentnost prema ostalim brodarima te smanjenje vozarina. Vodeći svjetski brodari prema podacima iz 2014. godine su danski *Maersk*, talijanski *MSC* te francuski *CMA CGM*.



Slika 4. Broj naručenih brodova za 2015. godinu (TOP 5 brodara)

Izvor: Autor prema dostupnim podacima (www.alphaliner.com)

Prema dostupnim podacima UNCTAD-a naručeno je za 2015. godinu 321 brod za prijevoz kontejnera gdje najveći udio naručenih brodova čini brodarska kompanija MSC od 16,2 % s ukupnim brojem od 52 naručena kontejnerska broda. Brodogradilišta Republike Koreje dominiraju u izgradnji kontejnerskih brodova sa 69 %, a zatim Kina sa 22 % te Japan sa 4 % od ukupno izgrađenih brodova za prijevoz kontejnera koji su danas u eksploataciji. Južnokorejska brodogradnja naglo se razvila u posljednjih 20 godina te je preuzela vodeće mjesto na svjetskom tržištu udruživanjem vodećih brodogradilišta (*Hyundai, Daewoo i Samsung*) u veliku kooperaciju kako bi bili konkurentni gledajući globalnu brodograđevnu industriju.

Nakon generalno prikazane podjele brodova za prijevoz kontejnera, strukture svjetskih kontejnerskih kapaciteta te analize svjetskih brodara koji upravljaju globalnom kontejnerskom flotom, u ovome radu nadalje je prikazan kontejner kao teret koji se prevozi linijskim kontejnerskim servisom.

2.4. Obilježja i podjela kontejnera

Nakon prvog kontejnera koji je konstruiran 1956. godine od strane Malcom McLeana, Međunarodna pomorska organizacija (engl. *International Maritime Organization*) utvrdila je definiciju kontejnera¹⁸ – transportna jedinica trajnog oblika dovoljno otporna za višestruku upotrebu, posebno konstruirana s čime je omogućen prijevoz robe s jednim ili više transportnih sredstava, opremljena uređajima za lako rukovanje najmanjeg kapaciteta od 1 m³.

U kontejnerizaciji postoje razne definicije, međutim sa stajališta pomorskog prijevoza morem kontejner je čvrsta, najčešće zatvorena, na vremenske prilike otporna, stalno upotrebljiva transportna jedinica s najmanje jednim vratima, izrađena od različitih materijala po određenim međunarodnim ISO normama gdje se komercijalno iskorištava njezin prostor u prijevozne svrhe kao bazična jedinica čime se ujedno postiže sigurnost prijevoza tereta.

Kontejnerski kapacitet broda je osnovno tehnološko-eksploatacijsko obilježje potpunog kontejnerskog broda koji se izražava u TEU jedinicama. Osnovna TEU jedinica, dakle predstavlja prostorni prijevozni kapacitet broda za prijevoz kontejnera kao i kapacitet ili promet lučkog kontejnerskog terminala.

¹⁸ IMO Resolution MSC. 328(90)

Dimenzije koje je ISO prihvatio za standardizaciju 1966. godine su najčešće duljine koje se koriste od 20 stopa i 40 stopa, širina 8 stopa te visina 8,5 stopa. Danas se u pomorstvu često koriste i kontejneri duljine od 45 stopa te visinom od 9,5 stopa dok je širina kontejnera ostala nepromijenjena. Kontejner kao transportnu jedinicu možemo podijeliti prema različitoj klasifikaciji: prema namjeni, materijalu gradnje, korisnoj nosivosti, konstrukciji, mjestu korištenja te prema vrsti robe koja se prevozi. Svi tipovi kontejnera koji se koriste u pomorskom transportu mogu se generalno klasificirati u 6 grupa (Vranić, Kos):¹⁹

- **Kontejneri za prijevoz generalnog tereta** – u ovu kategoriju spadaju kontejneri s vratima na jednoj ili obje strane, vratima sa strane, kontejneri s otvorenim krovom ili s otvorenim stranicama, skeletni kontejneri, kontejneri s prirodnom ventilacijom
- **Temperaturni kontejneri** – u ovu kategoriju spadaju izolacijski, rashladni i grijani kontejneri
- **Tank kontejneri ili kontejneri cisterne** za prijevoz tekućina i komprimiranih plinova
- **Kontejneri za prijevoz rasutog tereta (bulk kontejneri)** – u ove kontejnere teret se može ukrcati slobodnim padom ili pod pritiskom
- **Kontejneri platforme** – u ovu kategoriju spadaju kontejneri koji se sastoje samo od platforme odnosno podloge ili baze
- **Kontejneri specijalne namjene.**

Iz ove klasifikacije kontejnera vidljivo je da se kontejnerom može prevesti bilo koji teret bez obzira na njegova svojstva (suhi rasuti ili generalni teret te tekući teret).

Prema podacima Dynamar B. V. između 2008. i 2012. godine broj kontejnera u svijetu porastao je za 22,58 % odnosno od 24 do 31 milijun TEU-a.²⁰ Sukladno statističkim podacima luke Rotterdam²¹ na tržištu je procijenjeno u opticaju oko 25 % praznih kontejnera (2,5 milijuna). U poslovanju brodara jedan od većih troškova otpada upravo na repozicioniranje praznih kontejnera. Naime, uspoređujući kretanje kontejnera od Dalekog istoka prema npr. Europi uočene su značajna odstupanja iz razloga što su određena tržišta po statistikama strogo izvozna, za razliku od nekog drugog tržišta gdje se roba pretežito uvozi. Gledajući međunarodnu razmjenu i tržište kontejnera uočene su značajne razlike po tipu, odnosno dimenzijama kontejnera.

¹⁹ Vranić, D., Kos, S., Morska kontejnerska transportna tehnologija I., Pomorski fakultet u Rijeci, 2008.

²⁰ Dynamar, B., V., Containers, Alkmaar, 2012.

²¹ <http://www.portofrotterdam.com/en/News/pressreleases-news/Pages/transport-empty-containers.aspx>

Radi specifičnosti tereta i cijene vozarina pojedina tržišta pretežno izvoze u 20-stopnim kontejnerima dok je npr. izvoz s Dalekog istoka uglavnom u 40-stopnim kontejnerima što u konačnici rezultira neuravnoteženost. Kooperacija između kontejnerskih brodara doskočila je visokim troškovima repozicioniranja praznih kontejnera zajedničkim vođenjem linijskog servisa i podjelom troškova.

U ovom poglavlju posebno se analizirao utjecaj svojstva tereta, veličine i tip kontejnera na inicijalni plan krcanja i slaganja tereta. Svojstva tereta na inicijalni plan imaju značajnu ulogu ukoliko se radi o opasnom ili temperaturnom kontejneru koji se prevozi. U sljedećem poglavlju analizirani su svi uvjetni čimbenici koji utječu na smještaj kontejnera na određenu poziciju na brodu.

3. UVJETNI ČIMBENICI U FUNKCIJI OPTIMIZACIJE INICIJALNOG PLANA KRCANJA I SLAGANJA

Temeljno polazište za brodara je da brod što više vremena provede u navigaciji prevozeći teret te što manje vremena boravi u luci prekrcajući teret. Na raspored krcanja i slaganja kontejnera na brodu utječu brojni čimbenici i ograničenja međutim u ovome doktorskom radu uzeta su u obzir i dodatna ograničenja u funkciji kraćeg boravka broda u luci. Uvjetni čimbenici podijeljeni su i analizirani u četiri generalne cjeline kao njihov direktni utjecaj na inicijalni plan krcanja i slaganja:

- 1) utjecaj brodskih čimbenika
- 2) utjecaj tereta/kontejnera
- 3) utjecaj čimbenika terminala
- 4) utjecaj ekonomsko-komercijalnih čimbenika brodara.

Prethodno navedeni utjecaji imaju osnovnu funkciju osigurati maksimalnu sigurnost ljudi i tereta na brodu te da udovolje zahtjevima brodara za realizaciju osnovnog principa racionalnog poslovanja, tj. rentabilnost, ekonomičnost i produktivnost. Rentabilnost je pokazatelj financijskog učinka, a općenito se definira kao omjer između dobiti i angažiranih sredstava, odnosno u kontejnerizaciji kao omjer između ukupnih prihoda ostvarenih kroz brodsku vozarinu te uložena sredstva (vrijednost broda). Ekonomičnost je pokazatelj ekonomskog učinka poslovanja brodara. Izražava se kao odnos između ostvarenih učinaka i za njih utrošenih elemenata proizvodnje, tj. odnos između ukupnog prihoda putovanja od vozarina i ukupnih troškova putovanja. Produktivnost je pokazatelj tehničkog učinka koji ovisi o ljudskom faktoru, tehničkom napretku te organizacijskom i društvenom faktoru. Prikazano je povećanje produktivnosti i ekonomičnosti za kontejnerskog brodara. Produktivnost se povećala utjecajem na organizacijski faktor, točnije skraćenje prekrcajnog procesa u funkciji kraćeg boravka broda u luci dok je povećana i ekonomičnost smanjenjem troškova putovanja, tj. troškova pogonskog goriva. Unatoč racionalnom poslovanju brodara ipak je primaran zahtjev osigurati najvišu sigurnost tereta i ljudskih života na moru, stoga su u sljedećim poglavljima detaljno analizirani uvjetni čimbenici koji utječu na plan krcanja i slaganja tereta.

3.1. Utjecaj brodskih čimbenika na inicijalni plan

Brodski čimbenici koji utječu na inicijalni plan su: stabilnost kontejnerskog broda, različita opterećenja brodske konstrukcije te dopuštena površinska opterećenja nosivih površina. U svim stanjima nakrcanosti kontejnerskog broda različite sile i odgovarajući momenti moraju biti ispod maksimalnih vrijednosti. Sile, odnosno momenti djelovanja na kontejnerski brod mogu biti statički ili dinamički stoga razlikujemo statičku i dinamičku stabilnost kontejnerskog broda. Stabilnost broda s obzirom na os oko koje se brod nagine podijeljena je na poprečnu stabilnost i uzdužnu stabilnost.

3.1.1. Poprečna stabilnost broda za prijevoz kontejnera

Poprečna stabilnost može se podijeliti na početnu poprečnu stabilnost te stabilnost pri većim kutovima nagiba. Početna poprečna stabilnost je stabilnost koju brod ima pri manjim kutovima nagiba, približno do 10 ili 12 stupnjeva bočnog nagiba. Pokazatelj početne poprečne stabilnosti je početna poprečna metacentarska visina (M_0G), dok je pokazatelj poprečne stabilnosti pri većim kutovima nagiba poluga statičke stabilnosti GH .

Prema Rezoluciji IMO A.749(18), kodeks o stabilnosti u neoštećenom stanju za sve vrste brodova koji su u skladu s IMO propisima, minimalni zahtjevi za stabilnost su:²²

1. Površina ispod krivulja poluga statičke stabilnosti ne smije biti manja od 0,055 m-radijana do kuta nagiba $\varphi = 30^\circ$ i ne manja od 0,09 m-radijana do kuta nagiba $\varphi = 40^\circ$ ili kuta naplavljivanja²³ φ_n , ako je ovaj kut manji od 40° . Pored toga, površina ispod krivulje poluga statičke stabilnosti, između kutova nagiba od 30° do 40° ili između 30° i φ_n , ako je ovaj manji od 40° , ne smije biti manja od 0,03 m-radijana.
2. Poluga statičke stabilnosti mora iznositi najmanje 0,20 m pri kutu nagiba jednakom ili većem od 30° .
3. Najveća poluga statičke stabilnosti treba se javiti pri kutu nagiba po mogućnosti iznad 30° , ali ne manjim od 25° .
4. Početna poprečna metacentarska visina ne smije biti manja od 0,15 m.

²² Grupa autora, Vademecum maritimus, Podsjetnik pomorcima, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, 4. izd., Rijeka, 2014.

²³ Kut naplavljivanja je kut koji pokazuje koliko se stupnjeva brod može nagnuti lijevo ili desno bez obzira na razlog nagnuća, pri čemu će najniži otvor koji nema svojstvo nepropusnosti biti u razini mora.

Rezolucija IMO A.749 (18) također je propisala minimalne kriterije stabilnosti brodova za prijevoz kontejnera gdje je dodatno potrebno odrediti parametre koji ulaze u izraz za određivanje koeficijenta C koji predstavlja faktor forme broda.

Pored ovih minimalnih zahtjeva postavljeni su viši zahtjevi za minimalnu početnu poprečnu metacentarsku visinu s obzirom na mjere, dimenzije i formu broda. Za primjer, kontejnerski brod klase 11.000 TEU-a, duljine preko svega od 363 m te širine 45,6 m, mora imati minimalnu metacentarsku visinu ispravljenu za utjecaj slobodnih površina od 0,7 m, dok kontejnerski brod klase 16.200 TEU-a, duljine preko svega 396 m te širine 53,6 m, mora imati minimalnu metacentarsku visinu ispravljenu za utjecaj slobodnih površina od 1,2 m.

Početna poprečna metacentarska visina ispravljena za utjecaj slobodnih površina (M_0G_{corr}) izračunava se prema opće poznatom izrazu:

$$M_0G_{corr} = KM_0 - KG - FSC. \quad (3.1)$$

Vrijednost visine poprečnog metacentra iznad kobilice (KM_0) dobiva se iz dijagramnog lista ili iz tablice hidrostatskih numeričkih podataka za srednji gaz. Vrijednost korekcije metacentarske visine za slobodne površine (engl. *Free Surface Correction* - *FSC*) dobiva se izrazom (3.2):

$$FSC = \frac{\sum I}{D} \quad (3.2)$$

$$I = i \cdot \rho, \quad (3.3)$$

gdje oznaka $\sum I$ predstavlja zbroj momenata slobodnih površina svih tankova koji nisu potpuno ispunjeni tekućinom, oznaka i moment tromosti slobodne površine u pojedinom tanku te oznaka ρ specifičnu gustoću tekućine u tanku. Visina sustavnog težišta broda iznad kobilice (KG) dobiva se računom centracije kao omjer između ukupnog vertikalnog momenta ($\sum M_v$) i deplasmana broda (D):

$$KG = \frac{\sum M_v}{D}. \quad (3.4)$$

Stoga se može zapisati sljedeći izraz:

$$M_0 G_{corr} = KM_0 - \frac{\sum M_v}{D} - FSC. \quad (3.5)$$

U objektu funkciju cilja matematičkog modela ovoga rada uvršten je modificiran izraz (3.5) te minimalna vrijednost početne poprečne metacentarske visine ($M_0 G_{min}$) kao pokazatelj početne poprečne stabilnosti.

Prilikom inicijalnog plana krcanja i slaganja tereta potrebno je voditi računa o vertikalnoj raspodjeli masa što podrazumijeva piramidalno slaganje kontejnera. Teži kontejneri se slažu ispod lakših kako bi se direktno utjecalo na visinu sustavnog težišta iznad kobilice, odnosno na metacentarsku visinu što je kasnije u matematičkom modelu ovoga doktorskog rada postavljeno kao ograničenje. Također se postavlja ograničenje zbog vertikalnog rasporeda masa kako bi u svakom trenutku veća masa ukrcanih kontejnera bila u skladištu, a ne na palubi.

Na poprečnu stabilnost broda utječe i raspored masa koje čine posrednu nosivost: teško i lako gorivo, ulje za podmazivanje, balast, voda za pranje i hlađenje, mrtve težine i dr. Stoga je potrebno znati njihov smještaj na brodu, vertikalne i horizontalne momente, momente inercije te momente slobodnih površina. U eksploataciji broda potrebno je voditi računa o svima masama, a posebice o većinskim masama posredne nosivosti koje su promjenjive (gorivo i balast). Balast bez obzira što smanjuje korisnu nosivost broda omogućuje dovođenje broda na odgovarajući gaz, odnosno dovodi brod na željeni trim te utječe na metacentarsku visinu. Osnovno pravilo tijekom eksploatacije je da tankovi balasta budu ili puni ili potpuno prazni ukoliko je to moguće kako bi se izbjegao učinak slobodnih površina koje smanjuju metacentarsku visinu. Razmještaj kontejnera na brodu, tj. plan krcanja i slaganja nastojat će se napraviti uz što manje krcanja balastnih tankova. Direktno reguliranje metacentarske visine ovisit će o vertikalnom rasporedu masa, odnosno o pravilno složenim kontejnerima po njihovoj masi i po pojedinim pozicijama na brodu, dok se balastom može indirektno utjecati na metacentarsku visinu i ostale relevantne parametre. Na brodovima za prijevoz kontejnera potrebno je paziti na vrijednost metacentarske visine da u pojedinim slučajevima ne bude prevelika – prestabilan brod. Zbog kratkog perioda ljuljanja broda dolazi do velikih akceleracija što direktno utječe na pričvršćene kontejnere na palubi.

Pokazatelj poprečne stabilnosti pri većim kutovima nagiba je poluga statičke stabilnosti koja se označava GH . Osnovna je svrha poluge stabilnosti omogućiti crtanje krivulje poluga za bilo koji slučaj krcanja kontejnerskog broda pri većim kutovima nagiba. Iz GH krivulje mogu se očitati sve veličine karakteristične za brodsku stabilnost broda za prijevoz kontejnera: veličina poluge statičkog stabiliteta za pojedine kutove nagiba φ , početna poprečna metacentarska visina, površina ispod krivulje te opseg krivulje, stoga je krivulja poluga najmjerodavnije sredstvo za određivanje stabilnosti kontejnerskog broda.

3.1.2. Uzdužna stabilnost broda za prijevoz kontejnera

Uzdužna stabilnost je stabilnost koja se javlja kad se brod naginje oko svoje poprečne osi pri uzdužnom naginjanju broda. Numerički pokazatelj uzdužne stabilnosti je uzdužna metacentarska visina (M_LG), međutim, u pomorskoj praksi značajniji je trim i ukupna promjena trima. Neginjanje broda u uzdužnom smjeru izražava se trimom broda. Trim broda je razlika između gazova na pramcu i krmi, dok je ukupni trim broda zbroj promjene gaza nastalog na pramcu te promjene gaza koja je nastala na krmi. Ukupni trim možemo ujedno definirati kao zbroj pramčanog i krmenog trima. Trim broda u metrima računa se po izrazu:

$$TRIM(t) = \frac{D \cdot l}{M_j}, \quad (3.6)$$

gdje oznaka l predstavlja polugu trima koja se dobiva kao horizontalna udaljenost težišta istisnine od težišta sustava mjerena u uzdužnom smislu te je izražena formulom:

$$l = XG - XB, \quad (3.7)$$

gdje oznaka XG predstavlja udaljenost težišta sustava od krmene okomice, XB udaljenost težišta istisnine od krmene okomice u metrima, a oznaka M_j jedinični moment pretege koji uzrokuje promjenu trima za 1 metar.

Udaljenost sustavnog težišta broda od krmene okomice (XG) dobiva se računom centracije kao omjer između ukupnog uzdužnog momenta ($\sum M_u$) i deplasmana broda (D):

$$XG = \frac{\sum M_u}{D}. \quad (3.8)$$

Za računanje trima stoga se može zapisati sljedeći izraz:

$$TRIM(t) = \frac{\sum M_u - D \cdot XB}{M_J}. \quad (3.9)$$

U ovome doktorskom radu unaprijeđenje plana krcanja i slaganja tereta dobiveno je uvođenjem dodatnog kriterija optimizacije, točnije dovođenjem broda na željeni trim gdje je tako smanjena potrošnja goriva u funkciji smanjenja troškova putovanja na određenom linijskom servisu. Dovodjenje broda na željeni trim moguće je postići direktno unaprijed planiranim krcanjem i slaganjem kontejnera prilikom izrade plana. U plovidbi između dviju luka dolazi do promjene trima s obzirom na potrošnju goriva, ulja, vode i drugih potrošnih masa u tankovima na brodu, stoga će se balastiranjem održavati željeni trim broda u plovidbi u linijskom servisu.

U objektu funkciju cilja matematičkog modela ovoga rada uvrstio se modificirani izraz (3.9) gdje se izračunao trim kao pokazatelj uzdužne stabilnosti. U izraz se ujedno uvrstila nova oznaka $TRIM_{FUEL}$ u funkciji smanjenja potrošnje pogonskog goriva.

3.1.3. Dinamička stabilnost kontejnerskog broda

Dinamička stabilnost kontejnerskog broda javlja se pri naginjanju broda kada dolazi do nagle promjene, odnosno ubrzanja masa prouzrokovane djelovanjem sila odnosno momenata na brod koji potječu od vjetra, valova, posljedica opterećenosti broda ukrcanim teretom ili prodorom vode. Zbog dinamičkog djelovanja vanjskih sila nastaje kinetička energija, a za njezino svladavanje mjerodavna je površina ispod krivulje momenta statičke stabilnosti. Opće je poznato da krivulja dinamičke stabilnosti broda je prvi integral krivulje momenata statičke stabilnosti.

Prema (Kos, Vranić) najmanji proračunski dinamički moment nagibanja koji nagiba brod do kuta naplavljivanja ili kuta prevrtanja, ovisno koji je kut manji, naziva se moment prevrtanja (M_c) koji se može odrediti po dijagramu dinamičke i po dijagramu statičke stabilnosti. Valja naglasiti da će najveći utjecaj na sigurnost kontejnerskih brodova u plovidbi i tijekom boravka na mjestu priveza, uz utjecaj momenta vjetra, imati i utjecaj morskih struja i valova.

Moment vjetra (M_v) izračunava se na sljedeći način:²⁴

$$M_v = 0,001 \cdot p_v \cdot A_v \cdot h_v, \quad (3.10)$$

gdje je p_v specifični tlak vjetra, A_v površina izložena vjetru i h_v udaljenost težišta površine izložene vjetru od vodene linije. Vrijednost specifičnog tlaka vjetra uzima se s obzirom na područje plovidbe (ograničena ili neograničena) i udaljenost težišta površine izložene vjetru.

U pomorstvu računaju se ujedno i sile vjetra iz dinamike fluida (F_v) koje djeluju na brod prema izrazu:

$$F_v = C_{v(\alpha)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_z \cdot v_r^2 \cdot A, \quad (3.11)$$

gdje su $C_{v(\alpha)}$ koeficijent otpora zraka tijela izloženog djelovanju vjetra, ρ_z gustoća zraka, v_r relativna brzina vjetra i A površina nadvodnog djela broda u m^2 .

Koeficijent $C_{v(\alpha)}$ je bezdimenzionalan te ovisi o obliku tijela izloženog vjetru i o kutu djelovanja vjetra. Pri proračunu djelovanja vjetra na lateralnu površinu brodova koji prevoze kontejnere na palubi za koeficijent otpora može se pretpostaviti vrijednost 0,86 za djelovanje vjetra na lateralnu površinu i 0,75 za djelovanje na frontalnu površinu.²⁵

Brodovi za prijevoz kontejnera pripadaju u brodove s velikim nadvodnim površinama koje se stvaraju uslijed velikog broja kontejnera složenih u visinu na palubi. Pri proračunu površine izložene vjetru, projekcija palubnih kontejnera računa se u površinu izloženu vjetru kao vanjska stjenka bez razmaka između pojedinih kontejnera. Osnovne dimenzije nadvodne i podvodne površine broda za prijevoz kontejnera kapaciteta 11.000 TEU-a, duljine 366 m, pri gazu od 11 m prikazane su u sljedećoj tablici.

²⁴ Kos, S., Vranić, D., Morska kontejnerska transportna tehnologija II., Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2006.

²⁵ Mohović, R., et al., Mjere maritimne sigurnosti na kontejnerskom terminalu Brajdica, Maritimna studija, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2013.

Tablica 5. Osnovne dimenzije te nadvodne i podvodne površine kontejnerskog broda od 11.000 TEU-a, duljine 366 m pri gasu od 11 m

Duljina preko svega - LOA (m)				336
Širina (m)				45,60
Gaz broda (m)				11,00
NADVODNA POVRŠINA PLOVILA	Lateralna površina i težišta	Površina (m ²)		10.510
		Težište	VLF (m)	16,20
			XF (m)	154,20
	Frontalna površina i težište	Površina (m ²)		1.880
		Težište	VLF (m)	21, 20
PODVODNA POVRŠINA PLOVILA	Lateralna površina i težišta	Površina (m ²)		3.700
		Težište	KF (m)	6,40
			XF (m)	150,80
	Frontalna površina i težište	Površina (m ²)		400
		Težište	KF (m)	5,70

Izvor: Mohović, R., et al., Mjere maritimne sigurnosti na kontejnerskom terminalu Brajdica, Maritimna studija, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2013.

Prilikom rasporeda krcanja i slaganja tereta već se uzima utjecaj vjetera te se analizira njegov utjecaj na brod, točnije na njegovu nadvodnu površinu kako u plovidbi tako i tijekom boravka na mjestu priveza ovisno o luci iskrcaja. Kod kontejnerskih brodova s povećanjem kuta nagiba pada efikasnost prekrcajnih operacija radi nagnuća vertikalnih vodicica što onemogućuje krcanje kontejnera u skladište. S povećanjem kuta nagiba broda povećava se i gaz broda. Povećanje gaza za kontejnerski brod kapaciteta 11.000 TEU-a, duljine 366 m, širine 45,6 m prikazano je u sljedećoj tablici.

Tablica 6. Povećanje gaza kontejnerskog broda od 11.000 TEU-a, duljine 366 m te širine 45,6 m

Kut nagiba broda (°)	Promjena gaza broda širine 45,60 m (m)
1	0,40
2	0,79
3	1,18

Izvor: Modificirao autor prema Mohović, R., et al., Mjere maritimne sigurnosti na kontejnerskom terminalu Brajdica, Maritimna studija, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2013.

Iz prethodne tablice vidljivo je da za kut nagiba referentnog broda od $\varphi = 3^\circ$ oko uzdužne osi gaz broda će se povećati za 1,18 m. Prikazano povećanje gaza može prouzročiti značajnu štetu jer postoji mogućnost oštećenja brodskog trupa ukoliko je u pitanju kontejnerski brod s velikim gazom, dok je ograničena dubina pristana na lučkom kontejnerskom terminalu. Kod planiranja krcanja i slaganja kontejnera na brod potrebno je voditi računa da se teret ukrca što ravnomjernije na lijevu i desnu stranu prema širini broda gledajući od središnje linije kako bi kut nagiba broda bio što manji. Brodovi za prijevoz kontejnera danas su praktično svi opremljeni protunagibnim sustavom (engl. *Anti-Heeling System*) kojim dovode brod u savršeno uspravan položaj.

U objektu funkciju cilja matematičkog modela ovoga rada uvrstilo se ograničenje da se kontejneri s pripadajućim masama ravnomjerno rasporede odnosno da se minimalizira razlika u masi između ukrcanih kontejnera na lijevoj strani od središnje linije u odnosu na ukrcane kontejnere na desnoj strani. U objektnoj funkciji tendencija je da vrijednost razlike bude što manja kako bi brod bio uspravan sa što manjim kutom nagiba φ .

3.1.4. Opterećenje brodske konstrukcije na kontejnerskim brodovima

Opterećenje na brodsku konstrukciju brodova za prijevoz kontejnera može se podijeliti na statičko opterećenje (opterećenje u mirnoj vodi) i dinamičko opterećenje (plovidba po valovima). Zbog nejednolike raspodjele sila uzgona i masa po dužini broda u pojedinim presjecima broda nastaju poprečne sile (engl. *shear forces*) i momenti savijanja (engl. *bending moments*). Raspodjela uzgona po duljini broda ovisna je o podvodnoj formi brodskog trupa dok raspodjela masa po duljini broda najviše ovisi o smještaju svih pojedinih masa na brodu, a posebice smještaju ukrcanih kontejnera u skladištu i na palubi. Nejednolika raspodjela uzgona doći će i više do izražaja promatrajući dinamičko opterećenje kada je brod u plovidbi na valovima, međutim, u pomorstvu prvenstveno se promatra statičko opterećenje.

Za odabrani presjek broda na određenoj udaljenosti x od krmene okomice poprečna sila (Q_x) u mirnoj vodi računa se na sljedeći način:²⁶

$$Q_x = Q_{tx} - Q_{ux}, \quad (3.12)$$

²⁶ Uršić, J., Čvrstoća broda, I. dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1972.

gdje su Q_{tx} dio poprečne sile masa koje se rasprostiru s jedne strane odabranog presjeka, a Q_{ux} dio poprečne sile dijela uzgona koji djeluje s jedne strane odabranog presjeka.

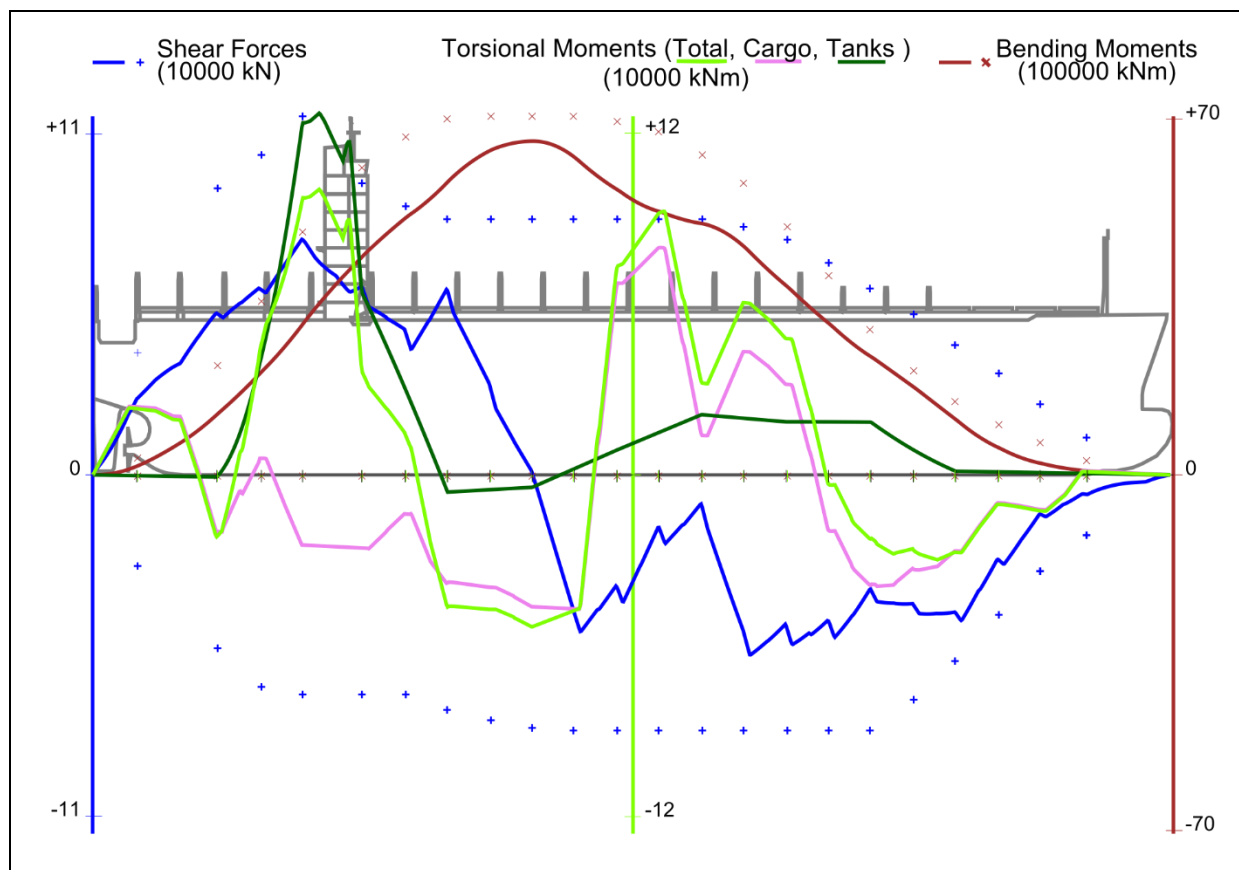
Momenti savijanja računaju se za iste presjeke za koje su računane i poprečne sile. Za odabrani presjek broda x od krmene okomice, moment savijanja (M_x) računa se prema sljedećem izrazu:²⁷

$$M_x = M_{tx} - M_{ux}, \quad (3.13)$$

gdje su M_{tx} dio momenta savijanja od masa koje se nalaze samo s jedne strane odabranog presjeka, a M_{ux} dio momenta savijanja onog dijela uzgona koji se nalazi samo na jednoj strani odabranog presjeka. Ukoliko moment savijanja (M_x) prema izrazu (3.12) ima pozitivan predznak, tada je i većina uzgona koncentrirana na sredini broda pa na tom mjestu nastaje pretičak uzgona nad masom što uzrokuje **pregib broda** (engl. *hogging*). Ukoliko moment savijanja ima negativan predznak, tada je većina uzgona koncentrirana na krajevima broda pa na tim mjestima nastaje pretičak uzgona nad masom što uzrokuje **progib broda** (engl. *sagging*).

Osim savijanja u okomitoj ravnini, brod je također izložen savijanju u uzdužnoj ravnini zbog različitih nagiba vodene linije u raznim presjecima prilikom plovidbe broda na valovima. Horizontalne sile uzrokuju savijanje trupa u horizontalnoj ravnini, dok vertikalne sile u uzdužnoj simetrali broda uzrokuju torzijske momente (engl. *torsional moments*). U većini slučajeva ovi momenti u uzdužnoj ravnini su puno manji za razliku od naprezanja savijanja u okomitoj ravnini, pa se u većini slučajeva ne uzimaju u obzir. Međutim, brodovi za prijevoz kontejnera koji spadaju u V. generaciju i više, već 75 % od cjelokupne dužine broda otpada na otvore grotla na palubi, stoga torzijski momenti mogu proizvesti veća naprezanja zbog smanjenja torzijske krutosti broskog trupa pa se moraju uzeti u obzir. Na sljedećoj slici prikazan je dijagram s maksimalnim i trenutačnim poprečnim silama, torzijskim momentima i momentima savijanja za kontejnerski brod kapaciteta 11.000 TEU-a, duljine 366 m, širine 45,6 m za određeno stanje nakrcanosti.

²⁷ Uršić, J., Čvrstoća broda, I. dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1972.



Slika 5. Dijagram poprečnih sila, torzijski i momenti savijanja za određeno stanje nakrcanosti kontejnerskog broda

Izvor: Autor prema programu za krcanje i slaganje tereta (MACS3)

Iz slike 5 vidljivo je da su najveće vrijednosti poprečnih sila kao i dobiveni momenti manji od maksimalnih dopuštenih vrijednosti, stoga se smatra da je brodski trup pravilno opterećen bez naprezanja. Maksimalne dopuštene vrijednosti poprečnih sila i momenata savijanja navedene su u knjizi trima i stabilnosti za svaki kontejnerski brod.

Prilikom krcanja i slaganja kontejnera potrebno je ravnomjerno rasporediti teret po dužini broda, odnosno prilagoditi razmještaj kontejnera tako da bi se izbjegao višak mase na određenim dijelovima broda jer o tome ovisi hoće li brod u plovidbi biti izložen većim ili manjim uzdužnim naprezanjima. Značajnu ulogu kod uravnoteženosti poprečnih sila, momenata savijanja i torzija ima raspored morske vode u tankovima balasta. Opterećenje brodske konstrukcije nije predmet istraživanja ovoga rada, stoga se neće direktno uzeti u obzir prilikom izrade modela plana krcanja i slaganja tereta, međutim, provjerit će se jesu li dobivena rješenja ispod granice zadanih maksimalnih vrijednosti naprezanja.

3.1.5. Dopusštena površinska opterećenja nosivih površina na kontejnerskim brodovima

Jedan od bitnijih čimbenika koji utječe na plan krcanja i slaganja tereta na brodovima za prijevoz kontejnera je dopušteno površinsko opterećenje nosivih površina. Prilikom loše raspodjele kontejnera na brodu javlja se preveliko opterećenje koje može prouzročiti pucanje, lom ili trajne deformacije broskog okoliša ili samih kontejnera. Nosive površine na brodu smatramo one površine na kojima se može slagati teret, odnosno kontejneri, a to su poklopci grotla, krmene platforme, te brodska skladišta. Promatrajući nosive površine potrebno je razlučiti dvije vrijednosti: dopušteno neprekidno opterećenje (engl. *permissible continued loading*) i maksimalno vršno opterećenje (engl. *maximum loading point*). Dopusšteno neprekidno opterećenje nosivih površina kao i maksimalno vršno opterećenje može se očitati iz knjige trima i stabilnosti ili iz plana kapaciteta za svaki kontejnerski brod. Dopusšteno neprekidno opterećenje izražava se u kN po m², međutim u praksi navedeno opterećenje izražava masu svih kontejnera po jednom stupcu na palubi ili u skladištu kao što je prikazano u sljedećoj tablici te se izražava u tonama (engl. *Permissible Stack Weight/Loads*).

Tablica 7. Dopusšteno neprekidno opterećenje referentnog kontejnerskog broda od 368 TEU-a

Lokacija	Poklopac grotla	Kontejner	Dopusšteno neprekidno opterećenje
Paluba (poklopac grotla)	Svi	20' 40'	90 t po stupcu 120 t po stupcu
Skladište	Svi	20' 40'	30 t po jedinici/120 t po stupcu 30 t po jedinici/160 t po stupcu

Izvor: Modificirao autor prema knjizi trima i stabilnosti za referentni brod

U matematičkom modelu ovoga rada uvršteno je ograničenje tako da se razlikuju dva skupa: skup svih kontejnera u stupcu na palubi te skup svih kontejnera u stupcu u skladištu. Kao ograničenje modela postavile su se vrijednosti dopuštenih neprekinutih opterećenja za palubu i skladište uzimajući referentni kontejnerski brod od 368 TEU-a čije su vrijednosti zapisane u tablici 7.

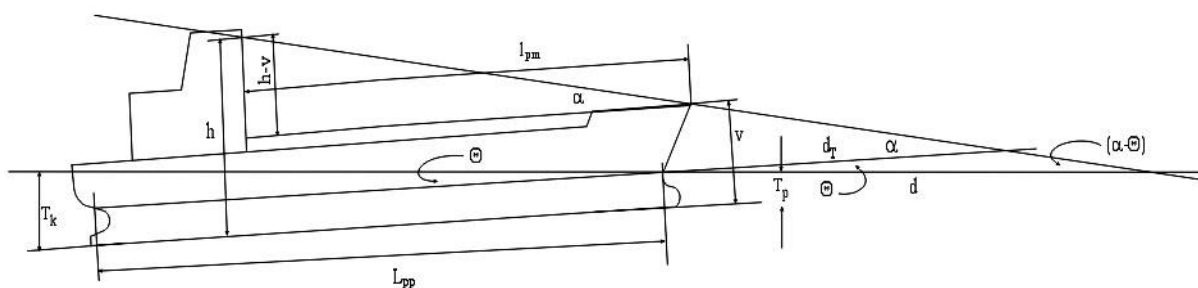
3.1.6. Vidljivost sa zapovjedničkog mosta na kontejnerskim brodovima

Najveća udaljenost slijepog sektora ispred pramca određena je Pravilom 22 u glavi V. SOLAS konvencije – *Navigation bridge visibility*. Po tom Pravilu svaki brod dužine 45 metara ili više, a koji je izgrađen 1. srpnja 1998. godine ili nakon tog roka, pod teretom ili u balastu, s osmatračkog položaja na zapovjedničkom mostu ne smije imati ispred pramca slijepi sektor koji je duži od dvije dužine broda ili 500 metara, ovisno o tomu koja je veličina manja.²⁸

Gledajući po pramcu od zapovjedničkog mosta također je Konvencijom propisana zona vidljivosti u lukovima horizonta od 10° , sa svake strane gledajući od uzdužnice broda, pod teretom ili u balastu za bilo koji gaz i trim broda.

Brodovi kojima je nadgrađe sa zapovjedničkim mostom postavljeno bliže sredini ili po pramcu broda, slijepi sektor je redovito manji od propisanih 500 metara ili dviju dužina broda. Međutim, kontejnerski brodovi od prve do pete generacije razvoja imaju nadgrađe na krmi stoga se javlja značajan problem sa slijepim sektorom. Vidljivost sa zapovjedničkog mosta ujedno se postavlja kao ograničavajući faktor prilikom krcanja i slaganja kontejnera u visinu na palubi. Prilikom izrade inicijalnog plana potrebno je voditi računa o količini kontejnera složenih u visinu na palubi na pramčanom dijelu broda.

Vrijednost udaljenosti slijepog sektora (d_T) može se odrediti grafički ili prema Klarinu i Komadini, računskom metodom za brod na ravnoj kobilici prema izrazu (3.14):



Slika 6. Vidljivost sa zapovjedničkog mosta

Izvor: Klarin, M., Komadina, P., Vidljivost sa zapovjedničkog mosta, Pomorski zbornik, br. 43, Vol. 1, 2005.

²⁸ Klarin, M., Komadina, P., Vidljivost sa zapovjedničkog mosta, Pomorski zbornik, br. 43, Vol. 1, 2005.

$$d_T = \frac{l_{pm}(v - T)}{h - v}, \quad (3.14)$$

gdje je l_{pm} horizontalna udaljenost od oka opažača do najviše točke pramca, oznaka v visina od kobilice do najviše točke pramca uključujući i teret složen na palubi, oznaka T gaz broda na ravnoj kobilici i oznaka h visina od kobilice do oka opažača na mostu.

Određene vrijednosti prema formuli za izračun udaljenosti slijepog sektora navedene su u knjizi trima i stabilnosti za svaki kontejnerski brod uzimajući u obzir stanje nakrcanosti broda.

Vidljivost sa zapovjedničkog broda prilikom prolaska Panamskim kanalom je manja za razliku od vidljivosti koja je propisana SOLAS konvencijom u funkciji veće sigurnosti prolaska samim kanalom. Analizirajući minimalne propise za kontejnerske brodove vidljive su razlike ovisno o duljini broda. Kontejnerski brod čija je duljina manja od 213,36 metara mora ispuniti sljedeće uvjete:²⁹

- slijepi sektor sa zapovjedničkog mosta kod kontejnerskog broda s teretom, prilikom prolaska Panamskim kanalom, mora biti manji od jedne dužine broda bez obzira na gaz i trim broda
- slijepi sektor sa zapovjedničkog mosta kod kontejnerskog broda u balastu, prilikom prolaska Panamskim kanalom, mora biti manji od 1,5 dužine broda preko svega bez obzira na gaz i trim broda.

Na kontejnerske brodove koji prolaze Panamskim kanalom čija je duljina veća od 213,36 metara odnose se ista pravila propisana SOLAS konvencijom.

Brodovi koji pripadaju petoj i višim generacijama uglavnom imaju dva nadgrađa, od kojih nadgrađe po pramcu na vrhu nosi zapovjednički most, stoga potpuno nakrcani kontejnerski brodovi tako konstruirani nemaju problema sa slijepim sektor jer je redovito manji od propisanih 500 metara, stoga se prilikom izrade plana krcanja i slaganja prethodno ograničenje ne uzima u obzir.

²⁹ Agreement No. 13, Maritime Regulations for the Operations of the Panama Canal, Panama Canal Authority Organic Law, 1999.

3.2. Utjecaj dimenzija kontejnera i svojstva tereta na inicijalni plan

Dimenzije klasičnog ISO kontejnera imaju značajan utjecaj na izradu inicijalnog plana krcanja i slaganja. Najčešće duljine koje se koriste u kontejnerizaciji su duljine od 40 i 20 stopa, sa standardnom širinom 8 stopa te visinom 8,5 stopa. Uz dimenzije kontejnera, prilikom krcanja i slaganja kontejnera, potrebno je definirati poziciju kontejnera na brodu. U pomorstvu se koristi nekoliko različitih sustava označavanja, međutim, najčešće se koriste oznake *bay*³⁰, *row*³¹ i *tier*³². Prilikom krcanja i slaganja parni *bay* se koristi za slaganje 40-stopnog kontejnera i odgovara slaganju dva spojena 20-stopna kontejnera. Neparni *bay* koristi se za slaganje kontejnera od 20 stopa, stoga se u matematičkom modelu definiraju dva skupa: $B_{20'}$ skup neparnih i $B_{40'}$ skup parnih *bayeva*. U kontejnerizaciji su ujedno zastupljene i različite duljine kontejnera s obzirom na potražnju tržišta; 45, 48, 53 i 60 stopa. U kontejnerskom linijskom servisu danas su najviše zastupljeni kontejneri od 40 i 20 stopa duljine, stoga prilikom izrade plana tereta prvenstveno će se njima posvetiti pozornost. Prilikom izrade plana krcanja i slaganja potrebno je voditi računa o tzv. povišenim kontejnerima (engl. *High Cube* – HC) čija visina iznosi 9,5 stopa. U matematičkom modelu ograničila se maksimalna visina svih kontejnera u jednom stupcu na palubi i u skladištu. Ukupna visina na palubi može biti ograničavajući faktor prilikom izračuna vidljivosti sa zapovjedničkog mosta, dok u skladištu ograničavajući faktor je vertikalna udaljenost između dna i vrha skladišta. Drugim riječima gledajući brod za prijevoz kontejnera kapaciteta 11.000 TEU-a i duljine 366 m u skladištu može krcati 12 klasičnih kontejnera ili 9 povišenih kontejnera složenih vertikalno u visinu. Referentni kontejnerski brod prijevoznog kapaciteta 368 TEU-a u skladištu može krcati tri klasična ili tri povišena kontejnera jer raspolaže s dovoljnom visinom skladišta te maksimalno 3 kontejnera vertikalno po visini na palubi.

Uz dimenzije kontejnera, teret koji se brodom prevozi ima veliki utjecaj na inicijalni plan krcanja i slaganja s obzirom na klasifikacijsku grupu i njegova svojstva. Kontejnerom se može prevesti bilo koji teret bez obzira na njegova svojstva; opći (generalni), rasuti, tekući, rashlađeni i teški teret.

³⁰ (engl. *bay*) – označava poziciju kontejnera u odnosu prema uzdužnici broda gledajući od pramca prema krmi.

³¹ (engl. *row*) - označava poziciju kontejnera u odnosu prema širini broda gledajući lijevo i desno od središnje linije.

³² (engl. *tier*) - označava poziciju kontejnera u odnosu prema njegovoj poziciji po vertikali gledajući od kobilice do glavne palube i kontejnera smještenih po visini iznad glavne palube.

3.2.1. Prijevoz opasnog tereta kontejnerskim brodovima

Svako posebno svojstvo tereta iziskuje zaseban način rukovanja, međutim najviše pažnje potrebno je posvetiti krcanju, slaganju i prijevozu opasnog tereta koji može biti u kontejneru u krutom ili tekućem obliku. Opasni teret je svaki onaj teret koji po svojim svojstvima može prouzročiti opasnost po zdravlje ljudi te ugroziti sigurnost osoba i imovine tijekom odvijanja transportnog procesa na posredan ili neposredan način.³³

Uz brojne propise i međunarodne konvencije prijevoz opasnih tvari morem prvenstveno je temeljen na Međunarodnom pravilniku o opasnim teretima (engl. *International Maritime Dangerous Goods Code* – IMDG Code) koji je temeljem SOLAS konvencije s odredbom II-2/19 od 2004. godine postao obvezujući za:³⁴

- putničke brodove koji su izgrađeni na dan ili nakon 1. rujna 1984. godine
- teretne brodove od 500 BT ili više koji su izgrađeni na dan ili nakon 1. rujna 1984. godine
- teretne brodove čija je tonaža manja od 500 BT, koji su izgrađeni na dan ili nakon 1. veljače 1992.

Prema IMDG Codu opasni tereti podijeljeni su u devet osnovnih klasa: klasa 1. eksplozivi, klasa 2. plinovi, klasa 3. zapaljive tekućine, klasa 4. zapaljive krute tvari, klasa 5. oksidirajuće tvari, klasa 6. otrovne tvari ili otrovi, klasa 7. radioaktivne tvari, klasa 8. tvari koje izazivaju koroziju, klasa 9. raznovrsne opasne tvari.

U pomorskom prijevozu, međutim opasne terete dijelimo na dvije grupe: klasične opasne terete koji ne zahtijevaju direktnu manipulaciju i posebne uvjete prijevoza te na opasne terete koji zahtijevaju direktnu manipulaciju i posebni tretman. U klasične opasne terete spadaju svi tereti koji su propisno pakirani u kontejner s odgovarajućim oznakama dok u opasne terete s posebnim tretmanom spadaju svi tereti iz klase I. i klase VII. (eksplozivi i radioaktivne tvari) koji zahtijevaju strogu kontrolu u svima fazama transporta.

³³ Vranić, D., Ivčević, R., Tereti u pomorskom prometu, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, 2007.

³⁴ IMDG Code, 2010., Vol. 1, IMO, London, 2010.

Temeljni dokument broda na osnovi kojeg se vrši prihvata i prijevoz opasnog tereta je *Svjedodžba o osposobljenosti za prijevoz opasnih tereta morem* koju izdaje Klasifikacijski zavod, a njome se određuje klasa opasnog tereta koja može biti prihvaćena na brod te uvjetuje razmještaj opasnih tereta na brodu. Svaki kontejner s opasnim teretom mora imati svoj *manifest tereta* gdje je upisana vrsta opasnog tereta, količina opasnog tereta, oznaka kontejnera, UN broj, tehnički naziv opasnog tereta i druge informacije. Na osnovi tih informacija definira se pozicija na brodu kontejnera s opasnim teretom prilikom izrade plana.

Tablica 8. Segregacija kontejnera s opasnim teretom sukladno klasifikaciji

	IMO - KLASA																	
		1.1. 1.2. 1.5.	1.3. 1.6.	1.4.	2.1.	2.2.	2.3.	3.	4.1.	4.2.	4.3.	5.1.	5.2.	6.1.	6.2.	7.	8.	9.
	1.1. 1.2. 1.5.	*	*	*	4	2	2	4	4	4	4	4	4	2	4	2	4	X
	1.3. 1.6.	*	*	*	4	2	2	4	3	3	4	4	4	2	4	2	2	X
	1.4.	*	*	*	2	1	1	2	2	2	2	2	2	X	4	2	2	X
	2.1.	4	4	2	X	X	X	2	1	2	X	2	2	X	4	2	1	X
	2.2.	2	2	1	X	X	X	1	X	1	X	X	1	X	2	1	X	X
	2.3.	2	2	1	X	X	X	2	X	2	X	X	2	X	2	1	X	X
	3.	4	4	2	2	1	2	X	X	2	1	2	2	X	3	2	X	X
	4.1.	4	3	2	1	X	X	X	X	1	X	1	2	X	3	2	1	X
	4.2.	4	3	2	2	1	2	2	1	X	1	2	2	1	3	2	1	X
	4.3.	4	4	2	X	X	X	1	X	1	X	2	2	X	2	2	1	X
	5.1.	4	4	2	2	X	X	2	1	2	2	X	2	1	3	1	2	X
	5.2.	4	4	2	2	1	2	2	2	2	2	2	X	1	3	2	2	X
	6.1.	2	2	X	X	X	X	X	X	1	X	1	1	X	1	X	X	X
	6.2.	4	4	4	4	2	2	3	3	3	2	3	3	1	X	3	3	X
	7.	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	2	X	3	X	2	X
	8.	4	2	2	1	X	X	X	1	1	1	2	2	X	3	2	X	X
	9.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Izvor: IMDG Code, 2010., Vol. 1, IMO, London, 2010.

Prilikom izrade inicijalnog plana krcanja i slaganja, potrebno je uzeti u obzir odijeljivanje (segregaciju) kontejnera s opasnim teretom prema IMO – klasifikaciji kao što je prikazano u tablici 8. Kodne oznake za klasične zatvorene kontejnere s opasnim teretom u prethodnoj tablici imaju sljedeće značenje:³⁵

* Specijalna segregacija (eksplozivi)

X – Nema posebnih zahtjeva za odjeljivanje.

1 – *Daleko od* – Oznaka se odnosi na odgovarajuću segregaciju tako da opasni tereti koji nisu kompatibilni moraju se udaljiti uzdužno i poprečno jednim kontejnerskim prostorom ili minimalno 3 metra, te mogu biti prevoženi u istom *bayu* skladišta ili otvorene palube.

2 – *Odijeljeno od* – Oznaka se odnosi na odgovarajuću segregaciju tako da opasni tereti koji nisu kompatibilni moraju se odijeliti; uzdužno s jednim kontejnerskim prostorom ili minimalno 3 metra, poprečno dvama kontejnerskim prostorima ili minimalno 6 metra, te mogu biti prevoženi u istom *bayu* skladišta ili otvorene palube,

3 – *Odijeljeno čitavim odjeljkom ili skladištem* – Oznaka se odnosi na odgovarajuću segregaciju tako da opasni tereti koji nisu kompatibilni moraju se odijeliti; uzdužno s jednim kontejnerskim prostorom ili minimalno 3 metra, poprečno trima kontejnerskim prostorima ili minimalno 12 metra na palubi. U skladištu opasni kontejneri moraju se odvojiti vatrootpornom i vodonepropusnom pregradom.

4 – *Odvojeno uzdužno čitavim odjeljkom ili skladištem* – Oznaka se odnosi na odgovarajuću segregaciju tako da opasni tereti koji nisu kompatibilni moraju se odijeliti; uzdužno i poprečno do udaljenosti od najmanje 24 metra na palubi. U skladištu opasni kontejneri moraju se odvojiti najmanje dvjema vodonepropusnim i vatrootpornim pregradama.

Prilikom izrade plana krcanja i slaganja, opasni teret ima značajan utjecaj kod definiranja pozicije kontejnera na brodu. Pravilna segregacija tereta sukladno IMO klasifikaciji mora se poštivati. U pomorskoj praksi opasni teret najčešće se prevozi u 20-stopnom kontejneru iz sigurnosnih razloga (manja količina opasnog tereta po kontejnerskoj jedinici) stoga je u funkciji jednostavnijeg matematičkog modela plana krcanja i slaganja generirano da se opasni

³⁵ IMDG Code, 2010., Vol. 1, IMO, London, 2010.

teret prevozi u kontejneru duljine 20 stopa. U tom slučaju skup svih kontejnera s opasnim teretom definirat će se oznakom K_{DG} (engl. *Dangerous Goods*).

Kodne oznake za klasične zatvorene kontejnere s opasnim teretom dopuštaju krcanje opasnog tereta u skladište i na palubu. Za krcanje i slaganje kontejnera s opasnim teretom u skladištu kodne oznake sukladno IMO-u ukazuju na dodatnu segregaciju, tj. dodatno odijeljivanje dvaju kontejnera jednom ili dvjema vatrootpornim i vodonepropusnim pregradama. Za krcanje i slaganje klasičnih kontejnera s opasnim teretom na palubu, kontejneri se moraju odijeliti pravilnim uzdužnim i poprečnim razmacima. Preporuka IMO-a je slaganje opasnog tereta na palubi tako da je moguća neprekidna kontrola prilikom prekrcaja i transporta, slobodan pristup i brža intervencija prilikom: oštećenja kontejnera, curenja i onečišćenje okoliša, požara i dr. U ovome doktorskom radu neće se razmatrati klasa I. (eksplozivni) i klasa VII. (radioaktivne tvari) jer zahtijevaju dodatni nadzor prilikom prekrcaja i transporta, te moraju se uzeti u obzir dodatni zahtjevi prilikom izrade inicijalnog plana krcanja i slaganja. U pomorstvu ove klase nisu učestale, a lučki prekrcajni terminali u tim slučajevima moraju biti posebno opremljeni – područjem luke za prihvata, odgovarajućom manipulacijom opasnog kontejnera u funkciji sigurne otpreme, novom infrastrukturom i suprastrukturom za prihvata opasnih tereta, novim proširenim kapacitetima u skladu sa zaštitom zdravlja ljudi, imovine i okoliša. Ukoliko se pojavi kontejner s opasnim teretom klase I. ili VII. zasebno će biti pozicioniran neovisno o modelu.

U matematičkom modelu prilikom izrade inicijalnog plana kontejner s opasnim teretom pozicionirat će se isključivo na palubi na određenim *bayevima* u kontejnerima duljine 20 stopa. Uz objektne funkcije cilja, uvest će se sljedeće dodatno ograničenje s kojim će se ispoštovati segregacija uzimajući u obzir uzdužni i poprečni razmak. Uvedeno ograničenje zadovoljit će kodnu oznaku 2 prema pravilima segregacije, a samim time zadovoljit će se kodne oznake X, 1 i 2. Drugim riječima, ograničenje se sastoji od minimalnog uzdužnog odjeljivanja na palubi 3 metra dužine, što znači jedan kontejnerski prostor, te minimalnog poprečnog odjeljivanja na palubi 12 metara, što znači tri kontejnerska prostora. Dobiveni inicijalni plan prije dodatne optimizacije zadovoljit će osnovna pravila segregacije prilikom krcanja i slaganja opasnog tereta. Uz slaganje kontejnera s opasnim teretom, u sljedećem poglavlju analizirat će se utjecaj slaganja kontejnera s lakopokvarljivom (osjetljivom) robom na inicijalni plan.

3.2.2. Prijevoz lakopokvarljive robe u kontejnerima

Prilikom izrade plana krcanja i slaganja, uz opasni teret, također i lakopokvarljiva roba ima značajan utjecaj kod definiranja pozicije kontejnera na brodu. Pod lakopokvarljivom robom podrazumijeva se sva roba koja se pri transportu treba održavati na preciznoj temperaturi kako bi sačuvala svoja svojstva, a dijeli se prema temperaturnom pojasu na tri stanja:³⁶

- rashlađeni tereti – temperaturni pojas od -2°C do $+13^{\circ}\text{C}$
- smrznuti teret – temperaturni pojas od -7°C do -15°C
- dubokosmrznuti tereti – temperaturni pojas od -18°C do -30°C .

U transportu lakopokvarljive robe na kontejnerskim brodovima koriste se dvije osnovne vrste kontejnera za prijevoz hlađenih tereta: izolacijski (izotermički) i rashladni (frigo) kontejner gdje se najčešće u pomorstvu koristi rashladni kontejner radi precizne kontrole temperature robe u svim vremenskim uvjetima. Frigo kontejneri mogu biti u dvije osnovne veličine, međutim u pomorstvu se najčešće koriste duljine frigo kontejnera od 40 stopa. Na današnjim modernim potpuno kontejnerskim brodovima rashladni kontejneri pozicioniraju se na palubi jer ovise o priključnici brodske naponske mreže koja je najčešće na palubi. Priključnica može biti i ispod palube u skladištu stoga se rashladni kontejneri moraju krcati na pozicije čim više, tj. što bliže poklopcu skladišta. U funkciji jednostavnijeg matematičkog modela plana krcanja i slaganja generirano je da se rashlađeni teret prevozi u kontejneru duljine 40 stopa isključivo na palubi. U tom slučaju skup svih rashladnih kontejnera definirat će se oznakom K_{RF} (engl. *Reefer Container*). Prilikom izrade inicijalnog plana u matematičkom modelu potrebno je pune rashladne kontejnere ograničiti po visini po stupcu iznad glavne palube. Maksimalna pozicija rashladnog kontejnera po vertikali gledajući na palubu direktno je ovisna o palubnom mostiću za učvršćivanje tereta, a njegova konstrukcijska visina ovisna je o dimenzijama broda. Gledajući kontejnerski brod kapaciteta 11.000 TEU-a, duljine 366 m i širine 45,6 m, palubni mostić doseže do treće pozicije po visini u odnosu na palubu, čime je omogućena neprekidna kontrola temperature kao i slobodan pristup za popravak rashladnog kontejnera na toj visini. Referentni kontejnerski brod kapaciteta 368 TEU-a nije opremljen palubnim mostićima, stoga rashladni kontejneri mogu maksimalno biti skladišteni do druge pozicije vertikalno po visini na palubi.

³⁶ Vranić, D., Kos, S., Morska kontejnerska transportna tehnologija I., Pomorski fakultet u Rijeci, 2008.

Prilikom izrade inicijalnog plana potrebno je stoga uvrstiti ograničenje kod krcanja i slaganja rashladnog kontejnera na palubu na maksimalno drugu poziciju po visini za referentni brod.

3.2.3. Prijevoz izvangabaritnih tereta kontejnerima

Prijevoz izvangabaritnog tereta na kontejnerskim brodovima može imati značajan utjecaj kod definiranja pozicije kontejnera na brodu prilikom izrade plana krcanja i slaganja tereta. Pod izvangabaritnim teretima u kontejnerizaciji podrazumijevaju se tereti čije dimenzije (širina, dužina, visina, masa) nadilaze dimenzije i maksimalnu nosivost standardnog 20-stopnog i 40-stopnog ISO kontejnera te se mogu klasificirati u četiri kategorije:³⁷

- teret prevelike duljine (engl. *Overlength cargo*) – teret čija je ukupna dužina veća od dužine 20 ili 40-stopnog kontejnera,
- teret prevelike visine (engl. *Overhigh cargo*) – teret čija je ukupna visina veća od visine standardnog ISO kontejnera,
- teret prevelike širine (engl. *Overwidth cargo*) – teret čija je ukupna širina veća od širine standardnog ISO kontejnera,
- teret prevelike mase (engl. *Overweight cargo*) – teret čija je ukupna masa veća od maksimalne dopuštene mase 20 ili 40-stopnog kontejnera (> 30 tona).

Prilikom izrade inicijalnog plana najpogodnija pozicija za slaganje vangabaritnog tereta sa svojim dimenzijama je u skladištu na najvišoj mogućoj visini gledajući od dna skladišta na već ukrcane kontejnere. Tereti izvangabaritnih dimenzija mogu se ujedno postaviti na najvišu visinu kontejnera ukrcanih na palubi. Ukoliko se radi o teretu prevelike mase, njegova pozicija prilikom izrade plana krcanja i slaganja najčešće je na prvoj visini na palubi vodeći računa o dopuštenom površinskom opterećenju nosivih površina. Pored ove vrste tereta ne može se složiti drugi kontejner, stoga se redovito gubi prostor za ukrcaj o čemu treba voditi računa kao dodatno ograničenje. U ovome radu neće se razmatrati ukrcaj vangabaritnih tereta jer zahtijevaju dodatni nadzor prilikom prekrcaja i transporta, te se moraju uzeti u obzir dodatni zahtjevi prilikom izrade inicijalnog plana krcanja i slaganja. Ukoliko se pojavi kontejner s vangabaritnim teretom, bit će zasebno pozicioniran neovisno o modelu.

³⁷ Vranić, D., Kos, S., Morska kontejnerska transportna tehnologija I., Pomorski fakultet u Rijeci, 2008.

Nakon analiziranih svojstva tereta te brodskih čimbenika, nadalje u ovome radu analizirat će se utjecaj čimbenika terminala na inicijalni plan kao i utjecaj ekonomsko-komercijalnih čimbenika.

3.3. Utjecaj čimbenika terminala na inicijalni plan

Prilikom izrade inicijalnog plana krcanja i slaganja potrebno je voditi računa o utjecaju čimbenika terminala na inicijalni plan. Odgovarajuću pažnju potrebno je posvetiti maksimalno dopuštenom gazu kojim se može ući u luku i nesmetano obaviti prekrcaj tereta. Količina tereta ukrcana na brod direktno je ovisna o maksimalnom gazu, stoga na nekim lučkim terminalima to može biti ograničavajući faktor. Na ovaj faktor mogu utjecati i brodari prilikom određivanja rotacije dviju bližih luka u linijskom kontejnerskom servisu na način da prva luka bude bez ograničenja gaza, a druga luka s preostalim teretom, luka znatno ograničenog gaza. Ukoliko su prisutne veće količine tereta za prekrcaj, kod rješavanja ograničenja dubina mora na terminalu, uvodi se pojam dvostruko ticanje jedne luke na jednom linijskom kontejnerskom servisu. (Primjer rotacije luka u jednom linijskom servisu: Trst – Kopar – Rijeka – Trst). Ponovno ticanje luke predstavlja dodatne troškove po pitanju potrošnje goriva i produljenje trajanja servisa, međutim time se zadovoljavaju drugi komercijalni i logistički interesi.

Odgovarajuću pažnju potrebno je posvetiti i mogućnosti niskih prolaza npr. ispod mostova prilikom prilaza kontejnerskim lučkim terminalima gdje gaz broda ima direktan utjecaj na zračni gaz broda (engl. *Air draft*). Pri plovidbi ovaj ograničavajući faktor može se riješiti i balastiranjem kada se brod dovodi na željeni gaz da bi sigurno prošao ispod mosta.

Pojedini lučki kontejnerski terminali nisu opremljeni adekvatnom infrastrukturom odnosno: odgovarajućim mostnim dizalicama s dovoljnom visinom, adekvatnim maksimalnim radnim dohvatom dizalice te adekvatnim duljinom samoga pristana. Prilikom izrade inicijalnog plana potrebno je usporediti odnos između:

- referentne duljine broda i duljina pristana
- referentne širine broda i maksimalnog radnog dohvata mostne dizalice
- ukupne visine svih ukrcanih kontejnera po visini na palubi i maksimalne visine dohvata mostne dizalice.

Ukoliko na lučkom kontejnerskom terminalu postoji neki od ovih ograničavajućih faktora, plan krcanja i slaganja tereta direktno će se prilagoditi za nesmetani rad. Kod

ograničavajućeg faktora – duljina pristana, kontejneri se neće moći rasporediti cijelom dužinom broda nego će se rasporediti na jednom dijelu broda gledajući po uzdužnici (npr. po krmi broda). Ukoliko postoji ograničavajući faktor maksimalnog radnog dohvata mostne dizalice teret će se adekvatno rasporediti po širini broda stavljajući veći broj kontejnera na stranu pristana broda. Ukoliko postoji ograničavajući faktor maksimalne visine dohvata mostne dizalice, kontejneri će se rasporediti do određene visine na palubi kako bi se izvršio nesmetan ukrcaj ili iskrcaj.

Prilikom izrade plana krcanja i slaganja tereta potrebno je napomenuti da lučki kontejnerski terminali mogu imati ograničenja po pitanju prihvaćanja određene količine kontejnera s opasnim teretom kao i ograničenja po pitanju prihvaćanja frigo kontejnera s obzirom na broj električnih priključaka na pojedinom terminalu.

U ovome radu prilikom krcanja i slaganja tereta uzet će se u obzir ograničavajući čimbenici terminala za određena ticanja u linijskom kontejnerskom servisu za koje će se izvršiti validacija i implementacija plana krcanja i slaganja tereta.

3.4. Utjecaj ekonomsko-komercijalnih čimbenika brodara

Ekonomski i komercijalni čimbenici imaju značajnu ulogu prilikom izrade plana krcanja i slaganja tereta. U tu kategoriju spadaju raspored kontejnera s obzirom na rotaciju putovanja što podrazumijeva točan raspored ticanja luka u jednom linijskom kontejnerskom servisu te raspored kontejnera s obzirom na vrijeme stajanja broda u luci.

Na uspostavu linijskog kontejnerskog servisa utječu brojni elementi kao što su frekvencija i tip servisa, potražnja za brodskim kapacitetom na određenoj liniji, odabir luka s najvećim potencijalom uvoza/izvoza, udaljenost luka u linijskom servisu u nautičkim miljama i vrijeme plovidbe određenom brzinom, geografska pokrivenost linijskog servisa frekvencijom ticanja i ostalo.

Prema UNCTAD-u postoje tri glavna kriterija prema kojemu brodari odlučuju koji će lučki kontejnerski terminali biti u servisu:³⁸

- zemljopisni položaj luke u odnosu na globalnu mrežu pravaca
- očekivana količina tereta pojedine luke gledajući njezino zaleđe
- lučki troškovi i pružana kvaliteta servisa.

³⁸Review of Maritime Transport 2014, UNCTAD, United Nations, Geneva, 2014.

Prema Karmeliću prilikom planiranja linijskog servisa potrebno je odrediti redoslijed luka ticanja u kontejnerskom servisu koji je određen s više faktora:³⁹

- zemljopisnim (redoslijed luka ticanja u jednoj regiji uvjetovan je zemljopisnim položajem pojedinih luka, te redoslijed ticanja u pravilu prati zemljopisnu logiku i izbjegavanje *cik-cak* plovidbe, odnosno devijacije i gubitak vremena u plovidbi između luka)
- komercijalnim (uzima se u obzir količina punih kontejnera u uvozu i izvozu po pojedinim lukama i potreba kraćega tranzitnog vremena za izvozne terete)
- logističkim (potreba ukrcaja praznih kontejnera iz luka u kojima je uvoz punih kontejnera bio veći od izvoza, i gdje se akumuliraju prazni kontejneri pa ih je potrebno na optimalan način repozicionirati u luke u kojima je izvoz punih kontejnera veći od uvoza i gdje nedostaje prazne opreme)
- operativnim (optimalan plan slaganja kontejnera)
- restrikcijama u pojedinim lukama (najčešći razlog je mala dubina, odnosno ograničeni maksimalni gaz broda, ali postoje i druge vrste restrikcija).

U ovome doktorskom radu analizirat će se optimalan plan s obzirom na unaprijed definirani redoslijed luka ticanja kao osnovni uvjet prilikom izrade inicijalnog plana krcanja i slaganja tereta. U matematičkom modelu prilikom izrade plana potrebno je spriječiti krcanje i slaganje kontejnera koji imaju iskrcajnu luku ranije ispod onih kontejnera koji imaju kasniju iskrcajnu luku. Kod izrade inicijalnog plana prilikom veće količine tereta u pravilu bilo bi poželjno zauzeti kompletan *bay* kontejnerima samo jedne luke iskrcaja. Međutim, kontejnere je potrebno rasporediti na što više *bayeva* u funkciji ranijeg iskrcaja.

Radi jednostavnosti modela, a slijedeći pomorsku praksu, pojedini *bayevi* na brodu grupirani su u određenu grupu *bayeva* (*klaster bayeva*) te su dodijeljeni pojedinim lukama u linijskom kontejnerskom servisu.

Pojedini *bayevi* koji su grupirani za jednu luku ciljano nisu neposredno jedan pored drugog radi nesmetanog istovremenog rada kontejnerskih dizalica. U matematičkom modelu kao ograničenje se uvodi da se teret za jednu iskrcajnu luku može rasporediti u klaster *bayeva* iz određenog skupa, pod uvjetom da budu ujedno zadovoljeni brodski čimbenici (stabilnost

³⁹Karmelić, J., Određivanje konkurentskih sposobnosti linijskog kontejnerskog servisa, doktorski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, 2014.

kontejnerskog broda, različita opterećenja brodske konstrukcije te dopuštena površinska opterećenja nosivih površina).

Raspored tereta s obzirom na trajanje prekrcajnih operacija jedan je od važnijih kriterija o kojemu je potrebno voditi računa prilikom izrade inicijalnog plana. Cilj je rasporediti teret u funkciji smanjenja boravka broda u luci na način da se postigne veća brzina manipulacije kontejnera.

Prema Meiselu trajanje prekrcajnih operacija može biti:⁴⁰

- fiksno određeno trajanje prekrcajnog procesa
- varijabilno trajanje prekrcajnog procesa ovisno o dodijeljenom vezu
- varijabilno trajanje prekrcajnog procesa ovisno o broju dizalica
- varijabilno trajanje prekrcajnog procesa ovisno o redoslijedu rada dizalica.

Iz podjele je vidljivo da prekrcajni procesi direktno ovise o radu obalnih mostnih dizalica, njihovom broju te redoslijedu rada ovisno o rasporedu kontejnera na brodu sukladno inicijalnome planu. Vrijeme prekrcajnog procesa može biti unaprijed definirano, odnosno fiksno određeno s obzirom na zauzetost pristana. U tom slučaju lučki kontejnerski terminal mora biti opremljen adekvatnom infrastrukturom. Planiranje operacija izvodi se unaprijed, a to podrazumijeva planiranje unaprijed zauzetosti pristana, unaprijed planirana prekrcajna sredstva i mostne dizalice, mehanička i druga postrojenja za otpremu kontejnera unutar terminala i ostalo. Vrijeme prekrcajnog procesa najčešće je varijabilno te ovisi o broju dizalica i njihovom redoslijedu rada. Najmanji broj dizalica koji će biti pridodan jednom brodu obično je unaprijed definiran i dogovoren između brodarka i lučkog kontejnerskog terminala, dok najveći broj dizalica ovisi o rasporedu tereta na brodu te predviđenom boravku broda na vezu.

Prema Grubišiću raspored rada obalnih dizalica na kontejnerskom terminalu s nezavisnim pristanima predstavlja dodatni optimizacijski problem koji izvan opsega ovoga rada, a direktno je ovisan o rasporedu tereta na brodu.⁴¹

Ekonomsko-komercijalni čimbenici proučavaju ukupne troškove brodarka u linijskom kontejnerskom servisu s naglaskom na troškove broda u luci. S ovakvom raspodjelom tereta u matematičkom modelu izbjegnuto je repozicioniranje tereta (engl. *restow*), stoga troškovi preraspodjele tereta su minimalizirani. Ujedno povećala se produktivnost utjecajem na

⁴⁰ Meisel, F., *Seaside Operations Planning in Container Terminal*, Springer, 2009.

⁴¹ Grubišić, N., *Optimizacija raspodjele vezova i obalnih dizalica na lučkim kontejnerskim terminalima*, doktorski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, 2013.

organizacijski faktor, skraćanjem prekrcajnog procesa u funkciji kraćeg boravka broda u luci što će se direktno odraziti na financijski rezultat poslovanja.

U sljedećem poglavlju ovoga rada analizirat će se metodologija procesa planiranja krcanja i slaganja tereta te će se opisati systemske razine planiranja kao i komunikacija između sudionika koji sudjeluju u planiranju.

4. PROCESI I METODOLOGIJA PLANIRANJA KRCANJA I SLAGANJA KONTEJNERA

U ovome poglavlju sistemske razine planiranja podijeljeni su u tri skupine koje se najčešće koriste dok je metodologija planiranja krcanja i slaganja tereta prikazana kroz sudionike procesa planiranja uz njihove osnovne funkcije.

4.1. Sistemske razine planiranja

Autori Christiansen i suradnici u svojem su radu bazično podijelili planiranje kontejnerskog linijskog servisa u tri dijela:⁴²

- Strateška razina planiranja
- Taktička razina planiranja
- Operativna razina planiranja.

Raspodjela tereta u funkciji skraćanja prekrcajnog procesa je optimizacijski problem koji je sastavni dio operativne razine planiranja.

Strateška razina planiranja kontejnerskog linijskog servisa najčešće je dugoročni proces od jedne do deset godina koja ima svrhu uložena sredstava vratiti kako bi poslovni cilj bio ispunjen i ekonomski isplativ. Ovo planiranje zahtijeva brojne aktivnosti poput: istraživanje globalnog tržišta, praćenje robnih pravaca, ispitivanje konkurentnosti drugih servisa i ostalo. Također, strateška razina obuhvaća planiranje tipa kontejnerskog linijskog servisa za određeni period gdje je posebnu pažnju potrebno posvetiti stanju vozarine te njihovom indeksu rasta ili pada. Za određeni period potrebno je isplanirati sredstva pomorskog prometa kojima će se obavljati prijevoz tereta morem, odnosno potrebno je razmotriti gradnju novih ili najam postojećih brodova za određeni linijski servis.

Taktička razina za razliku od strateške razine planiranja smatra se kratkoročnim procesom do godine dana. Ovo planiranje za taj period zahtijeva: izradu plovidbenog reda s redoslijedom luka ticanja, određivanje brodova po kapacitetu i veličini za određeni servis, sukladno transportnom lancu zauzeće pristana za nadolazeće brodove s obzirom na predviđeno vrijeme dolaska i ostalo.

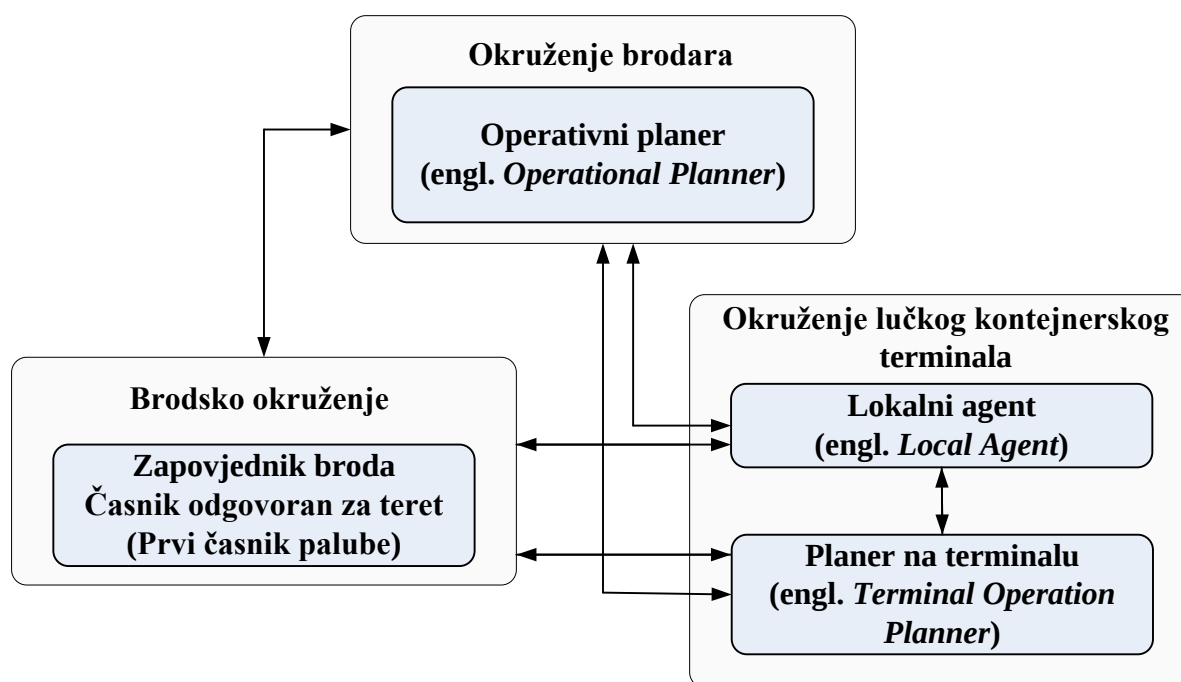
⁴² Anderson, M.W., Service Network Design and Management in Liner Container Shipping Application, DTU Transport, Kongens Lyngby, 2010.

Operativna razina podrazumijeva procese koji su predviđeni za period do nekoliko mjeseci. Ova razina podrazumijeva planiranje i raspodjelu tereta te izradu inicijalnog plana vodeći računa o svim čimbenicima i ostalim logističkim smjernicama po pitanju plovidbe.

Operativna razina također određuje brzinu broda u servisu s obzirom na potrošnju goriva te određuje režim plovidbe. Ovisna je o vremenu definiranom za plovidbu u linijskom servisu kao i ostalim definiranim vremenskim domenama: vrijeme manevriranja za pojedine luke, vrijeme stajanja, tj. vrijeme boravka broda u luci, vrijeme pojedinog čekanja (kanali, plima i oseka, zauzetost pristana), te rezervno vrijeme plovidbe.

4.2. Sudionici procesa i metodologija planiranja

Prilikom izrade inicijalnog plana krcanja i slaganja tereta postoji više sudionika u procesu. Na slici 7 vidljiva je njihova međusobna komunikacija.



Slika 7. Shematski prikaz komunikacije sudionika u izradi plana krcanja i slaganja tereta
Izvor: Autor

Proces planiranja krcanja i slaganja kontejnera započinje tako da brodar, odnosno brodarov lokalni agent (engl. *Shipowner local agent*) u njegovo ime obavijesti lučki kontejnerski terminal o dolasku broda u linijskom kontejnerskom servisu koji ima unaprijed utvrđeni raspored. Obavješćavanje mora biti na tjednoj bazi i dnevnoj (48, 24, 8 sati prije dolaska broda).

Brodarev lokalni agent šalje informacije operativnom planeru (engl. *Operational Planner*) u sjedište kompanije o količini kontejnera za ukrcaj (engl. *Container Booking List*) s pripadajućim informacijama kao što su dimenzije i tip kontejnera, ukupna masa kontejnera, luka ukrcaja/iskrcaja, te posebne informacije ukoliko se radi o kontejneru koji prevozi opasni, lakopokvarljivi, izvangabaritni ili neki drugi teret. Planiranje samog plana primarno je u funkciji operativnog planera te samim time brodar ima kontrolu nad ukrcajem tereta. Pri krcanju i slaganju kontejnera na brodu potrebno je sagledati sve uvjetne čimbenike koji su opisani u drugom poglavlju ovoga doktorskog rada, a koji utječu na plan krcanja i slaganja tereta. S obzirom na zahtjeve stabilnosti broda, uzdužnog i poprečnog opterećenja brodske konstrukcije, ukrcaja i rasporeda specijalnih kontejnera, zapovjednik broda mora poslati operativnom planeru:

- raspored balasta, vode, goriva i maziva po tankovima
- raspored ostalih masa uključujući i mrtve težine na brodu.

Na kraju završenih operacija iz prethodne luke, planer na terminalu dostavlja brodu završni plan tereta koji uključuje teret na brodu odnosno položaj svi kontejnera s pripadajućim masama koji se obuhvatio operacijama u toj luci. Ujedno, planer na terminalu nadopunjeni plan s ukranim teretom šalje operativnom planeru.

Na temelju tih podataka operativni planer stvara inicijalni plan za sljedeću luku (engl. *Pre-stow plan*) koristeći standardizirani program za izradu plana tereta (engl. *Cargo plan*). U kontejnerizaciji standardizirani programi koji se najčešće koriste su Cargo Optimizator, MACS3/Belco/Easeacon, PowerStow, Navis i ostali.

Ovi programi najčešće zapisuju plan krcanja i slaganja tereta u jedinstvenu Baplie datoteku (engl. *Baplie* odnosno *.edi file) kako bi ona bila kompatibilna i dostupna svim sudionicima u procesu planiranja.

Nadalje, operativni planer inicijalni plan šalje na daljnju provjeru planeru na terminalu (engl. *Terminal Operation Planner*) u sljedeću luku kojemu je najčešće sjedište na lučkom kontejnerskom terminalu, ali i prvom časniku palube na brod koji je odgovoran za teret na suglasnost. Kad se usuglase svi sudionici procesa planiranja, tada inicijalni plan postaje plan dolaska (engl. *Arrival Plan*) koji sadržava glavne informacije te liste o iskrcaju i ukrcaju kontejnera.

Za vrijeme samoga prekrcaja mogu se pojaviti promjene u rasporedu kontejnera zbog određenih poteškoća, stoga se ovaj plan nadopunjuje novim informacijama uz suglasnost svih sudionika procesa u toku rada te se u konačnici prilikom završetka prekrcaja, a prije odlaska broda iz luke, radi završni plan tereta (engl. *Final stow plan*) s točnim pozicijama o svim kontejnerima na brodu.

Prilikom izrade plana krcanja i slaganja tereta operativni planer ima funkciju posložiti teret uz ispunjenje svih uvjeta koji izlaze iz sigurnosnih razloga. Međutim, osnovni cilj svakog brodarka je ostvarivanje većeg financijskog rezultata. U tržišnim uvjetima povećanje financijskih rezultata može se ostvariti kraćim boravkom broda u luci što je u velikoj mjeri uvjetovano kvalitetom rasporeda kontejnera na brodu.

Pored sigurnosnih uvjeta koji utječu na optimalan raspored kontejnera u ovome doktorskom radu razmatrat će se i uvjeti koje nameće komercijalni aspekt prijevoza kontejnera. S uvođenjem dodatnih kriterija optimizacije raspodjela tereta bit će u funkciji skraćivanja prekrcajnog procesa. Sa stajališta primjene dobit će se optimalan raspored tereta na temelju modela plana krcanja i slaganja tereta koji će zadovoljiti sigurnosne kriterije, ali će i poboljšati brodarevo poslovanje. Dobiveno optimalno rješenje mora ispunjavati sljedeće zahtjeve: dobiveni plan mora biti izrađen u dovoljno kratkom roku kako bi se mogao primijeniti, mora ispunjavati zadane uvjetne minimalne čimbenike, te dobiveno rješenje mora ujedno dopuštati naknadne intervencije. Na osnovi postavljenih uvjeta plan krcanja i slaganja moguće je ustanoviti dvije načelne razine: postavljanje matematičke formulacije modela te optimalna primjena računalne tehnologije razvojem programskog koda.

Kod određivanja optimalnog rješenja primjenom ekspertnih sustava, osnovni nedostatak je nemogućnost određivanja stopostotnog rješenja, stoga je nužno primijeniti približnu metodu određivanja prihvatljivog rješenja. U sljedećem poglavlju postaviti će se model plana krcanja i slaganja tereta u funkciji smanjenja boravka broda u luci postavljenjem dodatnih kriterija. Dobiveno određeno rješenje i validacija samog modela mora biti blizu optimalnog rješenja, a što su ograničenja bolje postavljena, to će vrijednost objektne funkcije biti manja. Tako dobiveni raspored u pravilu mora biti jednakovrijedan ili bolji od rasporeda kojeg mogu izraditi operativni planeri.

5. MODEL PLANA KRCANJA I SLAGANJA TERETA

Postoji čitav niz čimbenika koji utječu na vrijeme boravka broda u luci, međutim najduže traje prekrcajni proces. Raspored tereta na brodu jedan je od ključnih čimbenika kojim se može skratiti vrijeme trajanja prekrcajnih operacija pomoću dobivenog optimalnog rješenja. Model plana krcanja i slaganja tereta imat će dva optimizacijska procesa u funkciji:

- skraćanja boravka broda u luci
- smanjenja ukupnih troškova putovanja.

Kod ovih procesa analizirani su modeli koji su razvijeni od pojedinih autora te su u ovome radu nadopunjeni dodatnim ograničenjima optimizacije. U ovome doktorskom radu razmatrat će se zasebno uvođenje dvaju novih dodatnih ograničenja za dodatnu optimizaciju krcanja i slaganja tereta:

- problem dodatnih kriterija optimizacije za luke unutar regionalnog lučkog sustava (*Multi-port gateway regions*)
- problem optimizacije plana u funkciji smanjenja troškova putovanja na određenoj liniji.

5.1. Problem dodatnih kriterija optimizacije za luke unutar regionalnog lučkog sustava

S obzirom na zajedničko gravitacijsko zaleđe, pojedini lučki kontejnerski terminali nastupaju kao međusobno konkurentne luke naglašavajući svaka svoje pogodnosti i prednosti, međutim s druge strane djeluju kao zajednički lučki sustav koji se nalazi u području zajedničke konkurencije. Takav regionalni lučki sustav (engl. *Multi-port gateway regions*) formiran je na osnovi zemljopisnog i zajedničkog gravitacijskog područja u odnosu na okolno konkurentsko tržište. Ujedno, formiranje regionalnog centra produkt je brojnih prometnih, logističkih, ekonomskih i političkih čimbenika koji utječu na strukturu robnih tokova s osnovnim ciljem da se ojača gospodarski razvoj.

Promatrajući lučke kontejnerske terminale u Europi vidljivo je 12 udruženih regionalnih lučkih sustava (Tablica 9).

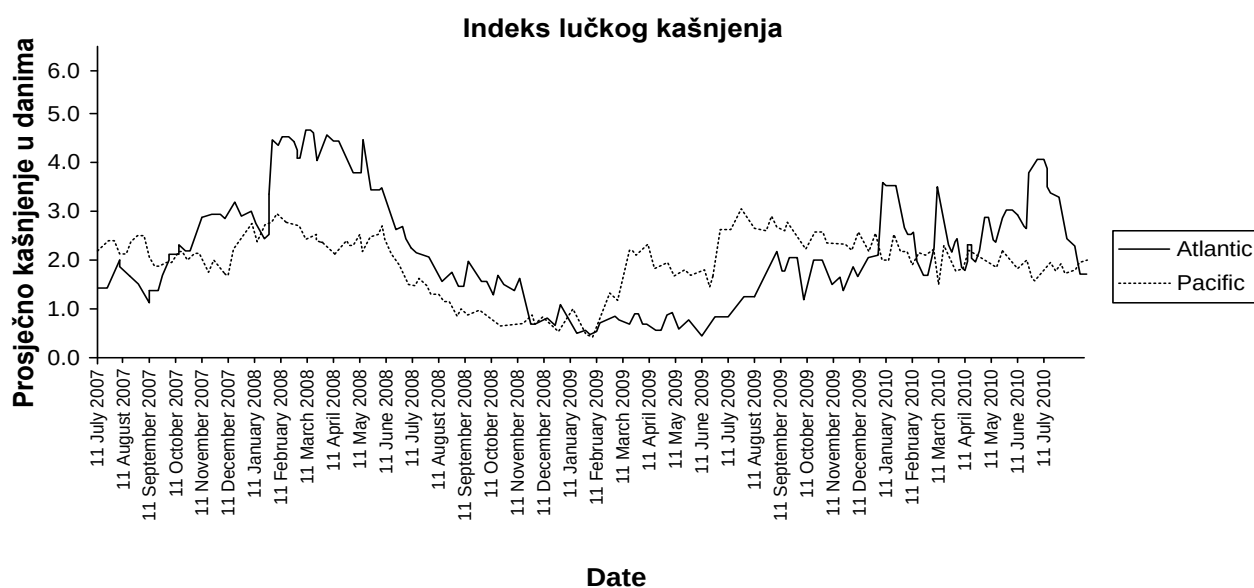
Tablica 9. Regionalni lučki sustavi u Europi

Regionalni lučki sustavi u Europi (engl. <i>EU Multi-port gateway regions</i>)		Lučki kontejnerski terminali
1.	Rhine-Scheldt Delta	Rotterdam Antwerpen Amsterdam Zeebrugge Ghent Ostend Dunkirk
2.	Helgoland Bay	Hamburg Bremen Cuxhaven Emden Wilhelmshaven
3.	UK Coast	Felixstowe Southampton Thamesport Tilbury Hull
4.	Spanish Med Range	Barcelona Valencia Tarragona
5.	Portugese Range	Lisbon Leixoes Sines
6.	Ligurian Range	Genoa Savona Leghorn La Spezia
7.	Seine Estuary	Le Havre Rouen
8.	Black Sea West	Constanza Burgas Varna
9.	South Finland	Helsinki Kotka Rauma Hamina Turku
10.	North Adriatic	Rijeka Koper Venice Trieste Ravenna
11.	Gdansk Bay	Gdynia Gdansk
12.	Kattegat/The Sound	Goteborg Malmo/Copenhagen Helsingborg

Izvor: Autor prema dostupnim podacima Notteboom, T., Concentration and the formation of multi-port gateway regions in the European container port system: an update, Journal of Transport Geography, Vol. 18, Elsevier, 2010.

loših vremenskih prilika ili zbog nenadanog izvanrednog događaja (tehnički kvar, eksplozija, onečišćenje, štrajk).

Iz slike 9 vidljivo je prosječno lučko kašnjenje za luke Atlantskog i Tihog oceana koje se temelji na OCIMF-ovoj studiji. Rezultati prikazuju da prosječno lučko kašnjenje za luke na Atlantskom oceanu variraju prosječno između jednog i pet dana, dok za luke Tihog oceana između jednog i četiri dana.



Slika 9. Indeks lučkog kašnjenja

Izvor: Optimising Voyage Management and Reducing Vessel Emissions – An Emissions Management Framework, OCIMF, First Edition November 2010.

Statistički najveća kašnjenja zabilježena su na lučkim terminalima Dalekog istoka gdje kontejnerski promet kontinuirano bilježi svoj rast. Prema podacima *Drewry Shipping Consultants* prosječno lučko kašnjenje za EU luke varira između dva i četiri dana.⁴³ U posljednjih pet godina značajno lučko kašnjenje zabilježeno je i u Americi. Prema Logesu u južnoj Kaliforniji zabilježeno je u jednom periodu 40 brodova dnevno na sidrištu što je rezultiralo 10 dana čekanja na slobodan vez.⁴⁴ U cilju većeg profita, poslovanje brodara moglo bi se orijentirati na reorganizaciju redoslijeda luka ticanja kako bi se povećala efikasnost u transportnom procesu. Redoslijed dviju luka zamijenit će se na osnovi zemljopisnog i

⁴³ Drewry Shipping Consulting Ltd, London, UK, 2013.

⁴⁴ Loges, L., Global port congestion - No quick fix, Port technology international, 2005.

zajedničkog gravitacijskog područja, odnosno luka koje su u sastavu određenog udruženog regionalnog lučkog sustava.

Ukoliko dođe do takve promjene u plovidbenom redu za potpuno nesmetan iskrcaj tereta potrebno je izvršiti pomak pojedinih kontejnera, odnosno repozicioniranje kontejnera što u konačnici rezultira dužim boravkom broda u luci i većim troškovima za brodara.

U većini kontejnerskih lučkih terminala repozicioniranje kontejnera naplaćuje se po premještenoj kontejnerskoj jedinici. Ovi podaci bili su ključ za postavljanje novog kriterija koji obuhvaća novi proces planiranja.

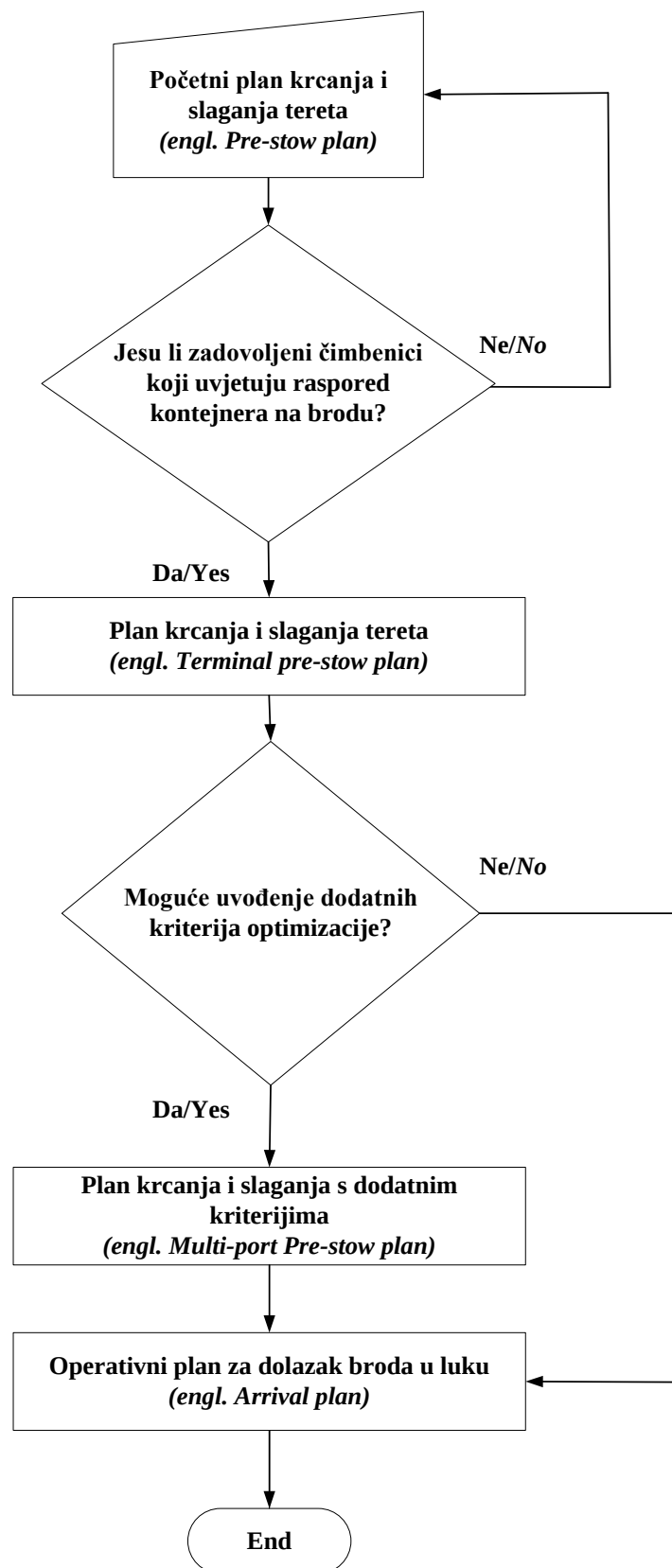
U postavljenom modelu optimizacije, novi kriterij zasnivao bi se na novoj metodologiji krcanja i slaganja tereta gdje bi se kontejneri, za određene luke u sastavu udruženog regionalnog lučkog sustava, rasporedili na određenu poziciju na brodu na način da se njime može neovisno manipulirati. U tom slučaju se podrazumijeva da su kontejneri raspoređeni tako da su neovisni jedni o drugima kako bi se mogao izvoditi nesmetani prekrcaj u bilo kojoj luci u sastavu udružene regije uz minimalno nepotrebno pomicanje, odnosno repozicioniranje kontejnera. Velika prednost kod takvog unaprijed definiranog plana krcanja i slaganja tereta na kontejnerskim brodovima očituje se u mogućnosti da brodaru u svome linijskom servisu može izabrati redoslijed luke ticanja u sklopu regionalnog lučkog sustava te nesmetano izvršiti prekrcaj tereta u funkciji kraćeg boravka broda u luci.

Potrebno je naglasiti da za uspostavu nove metodologije krcanja i slaganja tereta moraju prvenstveno biti zadovoljeni sljedeći uvjeti:

- pravovremena i točna predikcija zauzeća kontejnerskog terminala
- razlog lučkog kašnjenja
- predikcija vremenskog perioda zauzeća.

Pravovremena i točna detekcija zauzeća kontejnerskog pristana je početni uvjet za organizaciju ticanja kontejnerskih terminala u udruženom regionalnom lučkom sustavu kako bi se iskoristio unaprijed postavljeni optimizirani plan krcanja i slaganja tereta na kontejnerskim brodovima.

Postupak planiranja i algoritam procesa krcanja i slaganja tereta na brodovima za prijevoz kontejnera prikazan je na slici 10. Algoritam procesa prikazat će se kroz dvije faze gdje će se primijeniti dodatni kriteriji optimizacije za luke iskrcaja unutar regionalnog lučkog sustava.



Slika 10. Algoritam procesa krcanja i slaganja tereta na kontejnerskim brodovima
Izvor: Autor

Proces planiranja krcanja i slaganja kontejnera u prvoj fazi započinje operativni planer koji zajedno s ostalim sudionicima prilikom planiranja provjerava jesu li zadovoljeni čimbenici koji uvjetuju raspored kontejnera na brodu. Ukoliko su zadovoljeni svi čimbenici u funkciji sigurnosti broda i tereta, algoritam procesa prelazi u drugu fazu planiranja. U drugoj fazi operativni planer, ukoliko je moguće, raspored krcanja i slaganja temelji na novim kriterijima optimizacije. Novi operativni plan krcanja i slaganja sa dodatnim kriterijima optimizacije prilagodio se za nesmetani iskrcaj tereta u bilo kojoj iskrcajnoj luci u sklopu regionalnog lučkog sustava. U tom slučaju dobiveni plan krcanja i slaganja s dodatnim kriterijima (engl. *Multi-port Pre-stow plan*) postaje operativni plan za dolazak broda u iskrcajnu luku (engl. *Arrival plan*). Potrebno je naglasiti da prilikom krcanja i slaganja tereta neće svaki put biti moguće provesti dodatne kriterije optimizacije jer postoji mogućnost da neće biti zadovoljeni osnovni čimbenici koji uvjetuju raspored kontejnera u funkciji sigurnosti broda i tereta. U tom slučaju, sukladno algoritmu procesa, prethodno usuglašen operativni plan postat će plan krcanja i slaganja tereta za dolazak broda u luku.

Dodatni kriterij prilikom izrade plana prvenstveno se postavio u matematičkom modelu iz kojeg se razvio programski kod čime se dobio plan krcanja i slaganja tereta u funkciji smanjenja boravka broda u luci. Radi jednostavnosti matematičkog modela i programskog koda, određeni *bayevi* na brodu dodijeljeni su pojedinoj luci iskrcaja te su grupirani u određeni klaster. Uvođenjem ovoga kriterija smanjilo se, odnosno potpuno se eliminiralo repositioniranje kontejnera na brodu te se time direktno utjecalo na financijski rezultat.

Za realizaciju uvođenja nove metodologije krcanja i slaganja tereta bit će od velikog značaja veća suradnja te uspostava logističke integracije pojedinih luka u određenom regionalnom lučkom sustavu. Uvođenje novog kriterija optimizacije za luke unutar regionalnog lučkog sustava kao i implementacija modela ovoga doktorskog rada razmotrit će se na primjeru sjevernojadranskih luka koje su udružene u regionalni lučki sustav: Rijeka, Kopar, Trst, Venecija i Ravena (engl. *North Adriatic Multi-port gateway region - NA*).

5.2. Problem optimizacije plana željenim trimom u funkciji smanjenja troškova putovanja

Problem optimizacije plana krcanja i slaganja u funkciji smanjenja troškova putovanja postići će se uvođenjem unaprijed definiranog trima broda u funkciji manje potrošnje goriva. Samim time smanjit će se troškovi brodara u transportnom lancu na određenom linijskom servisu. Smanjenje potrošnje goriva ima za posljedicu direktno smanjenje emisije štetnih plinova što brodaru može doprinijeti ekonomskoj efikasnosti u borbi protiv sve strožih pravila MARPOL konvencije.

Za brodarsko poduzeće ne postoji međunarodni prihvaćeni troškovni standard, stoga se troškovi razlikuju od slučaja do slučaja, međutim moguće ih je rasporediti u pet kategorija:⁴⁵

- **Operativni troškovi** koji podrazumijevaju dnevne troškove vođenja broda misleći na troškove posade, troškove zaliha te troškove tekućeg održavanja broda. Takvi se troškovi računaju na godišnjoj osnovi u omjeru s brojem dana u eksploataciji kako bi se u konačnici računali u vozarinu.
- **Troškovi periodičnog održavanja** nastaju odlaskom broda u remonto brodogradilište. Razdoblje između dokovanja propisuju klasifikacijska društva, koja svojim propisima predviđaju periodične, ali i specijalne preglede. Kod starijih brodova ovaj trošak može biti značajniji, stoga nije sastavni dio operativnog troška.
- **Troškovi putovanja** očituju se najviše u potrošnji goriva te lučkim i kanalskim naknadama.
- **Troškovi uloženog kapitala** i njegova povrata povezani su s kreditima i bankovnim leasingom, dividendama te troškovima amortizacije uz postignuće željenoga stupnja dobiti.
- **Troškovi prekrcaja tereta** podrazumijevaju ukrcaj, prekrcaj i iskrcaj tereta te slaganje tereta posebice važnih u linijskom brodarstvu.

Brodari su dugoročno suočeni s porastom cijene goriva i sve strožim zahtjevima ekološkog zakonodavstva što se znatno odražava na njihovo poslovanje. U 2011. godini cijene goriva bile su relativno niske u odnosu na druge troškove poslovanja, stoga brodarima troškovi goriva nisu bili primarni.

⁴⁵ Stopford, M., Maritime economics, 3rd ed., Routledge, London, 2009.

U današnje vrijeme zabilježen je rast cijene goriva, pa na primjeru prema M. Stopfordu 47 % od troškova putovanja otpada na trošak goriva, dok troškovi putovanja sudjeluju u ukupnim troškovima brodara sa 40 %.

U novijim istraživanjima pomorski brodarski institut za istraživanje *Hyundai* definirao je trim broda za određene veličine brodova za prijevoz kontejnera gdje je potrošnja teškog goriva (engl. *Heavy Fuel Oil*) najmanja. U tablici 10 prikazana je dnevna potrošnja goriva broda za prijevoz kontejnera kapaciteta 350 TEU-a pri određenoj brzini i trimu broda kod srednjeg gaza od 5,5 metara, dok tablica 11 prikazuje dnevnu potrošnju goriva broda za prijevoz kontejnera kapaciteta 11.400 TEU-a. pri srednjem gazu broda od 13 metara.

Tablica 10. Dnevna potrošnja goriva broda za prijevoz kontejnera kapaciteta 350 TEU-a pri određenoj brzini i trimu broda

Trim Brzina	Trim broda po krmi od 0,5 m	Brod na ravnoj kobilici	Trim broda po pramcu od 0,5 m
4 čv	9	9	9
6 čv	15	15	14
8 čv	18	18	17
10 čv	19	19	18
12 čv	21	21	20
14 čv	23	22	22
16 čv	26	25	24

Izvor: Hyundai Maritime Research Institute, Trim Optimization

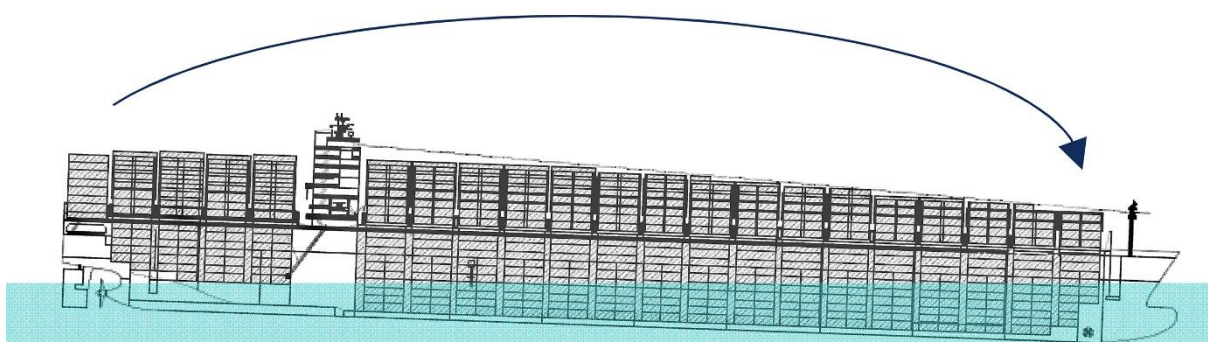
Tablica 11. Dnevna potrošnja goriva broda za prijevoz kontejnera kapaciteta 11.400 TEU-a pri određenoj brzini i trimu broda

Trim Brzina	Trim broda po krmi od 1,0 m	Brod na ravnoj kobilici	Trim broda po pramcu od 1,0 m
25 čv	265	254	254
22,5 čv	192	185	181
20 čv	146	139	137
17,5 čv	110	103	101
15 čv	75	69	67
12,5 čv	45	41	40
10 čv	23	20	19

Izvor: Hyundai Maritime Research Institute, Trim Optimization, 2013.

U predloženim podacima novijih istraživanja vidljive su značajne dnevne uštede goriva koje su se ostvarile dovođenjem broda na željeni trim. Računalnim tehnikama hidrodinamičkog modeliranja u institutu zabilježeni su značajni rezultati koji mijenjaju opće poimanje uzdužnog nagiba broda. Trim po krmi, odnosno krmeni trim dosadašnja je praksa u pomorstvu jer se time poboljšavaju svojstva stabilnosti kursa.

Međutim, nakon izvršenih testova te potvrđenih rezultata zaključeno je da optimalan trim u funkciji manje potrošnje goriva je trim broda po pramcu radi manjeg ukupnog otpora za određenu brodsku formu što je prikazano na slici 11.

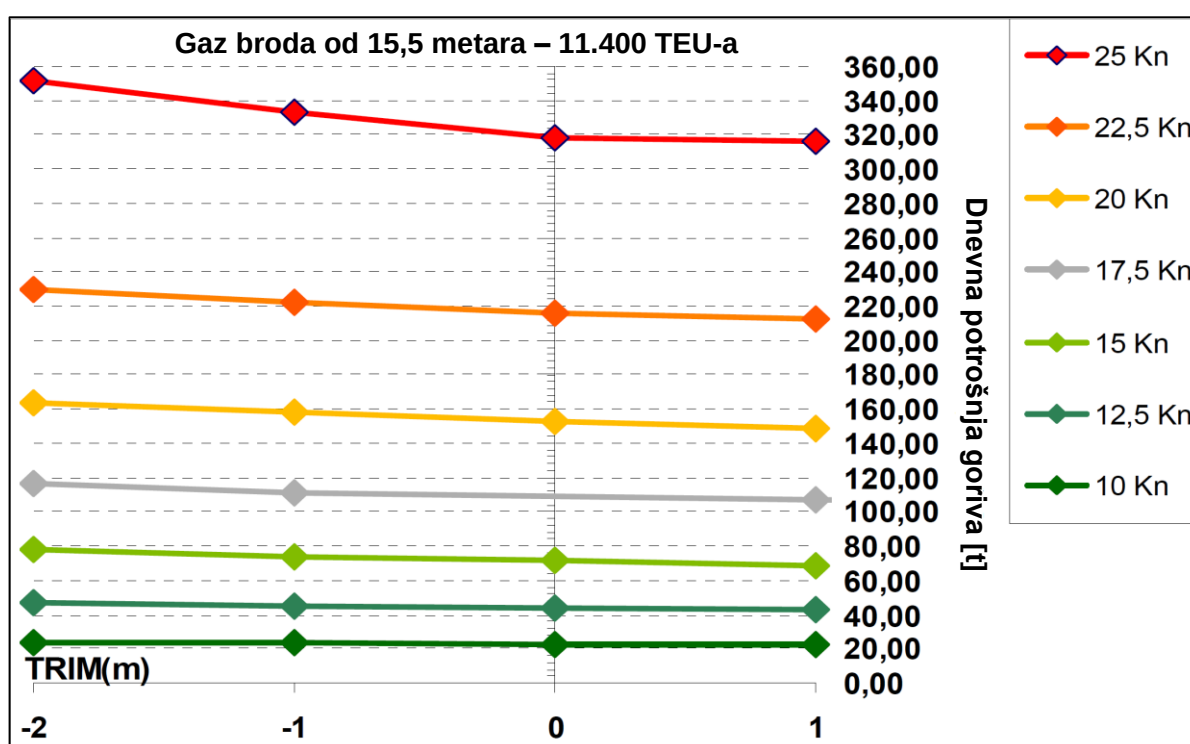


Slika 11. Kontejnerski brod s trimom po pramcu
Izvor: Autor prema Hyundai Maritime Research Institute, Trim Optimization, 2013.

Proučavajući ukupne otpore koje djeluju na brod, rezultati prikazuju da je najmanja potrošnja goriva prilikom trima broda po pramcu (pramčani trim). Za brod kapaciteta od 350 TEU-a najmanja dnevna potrošnja goriva zabilježena je pri trimu broda po pramcu od 0,5 metara, dok je za brod kapaciteta od 11.400 TEU-a najmanja dnevna potrošnja goriva zabilježena pri pramčanom trimu od jednog metra. Najveća odstupanja vidljiva su prilikom razlika u dnevnoj potrošnji goriva između pramčanog i krmenog trima prilikom većih brzina. Za brod kapaciteta od 350 TEU-a zabilježena je dnevna ušteda od 11,1 % pri brzini od 16 čvorova, dok za brod kapaciteta od 11.400 TEU-a vidljiva je dnevna ušteda goriva od 4,15 % pri brzini od 25 čvorova. Na slici 12. prikazana je značajna ušteda u dnevnoj potrošnji goriva kod pramčanog trima od jednog metra, gaza 15,5 metara pri različitim brzinama. Također, potrebno je naglasiti da negativnu vrijednost trima označava krmeni trim, odnosno trim po krmi dok pozitivna vrijednost trima označava pramčani trim, odnosno trim po pramcu. Iz slike je analizirano da su najveća odstupanja vidljiva pri većoj brzini od 25 čvorova.

Prilikom prethodne brzine za krmeni trim u iznosu od 2 metra dnevna potrošnja goriva iznosi 351 tonu, dok za pramčani trim iznosi 316 tonu, stoga se može utvrditi značajna ušteda od 35 tona, odnosno 10 % manja dnevna potrošnja goriva.

Najmanje razlike u dnevnoj potrošnji goriva između pramčanog i krmenog trima zabilježene su pri malim brzinama od 10 čvorova za brod kapaciteta 11.000 TEU-a, dok kod brodova kapaciteta od 350 TEU-a najmanje razlike su pri brzini od 4 čvora. Pri manjim brzinama zabilježene su najmanje razlike u dnevnoj potrošnji goriva proučavajući oba trima (1 tona dnevno), međutim vidljive razlike su od velikog značaja sagledavajući potpuni kontejnerski linijski servis.



Slika 12. Dnevna potrošnja goriva s obzirom na trim broda kod različitih brzina
Izvor: Autor prema Hyundai Maritime Research Institute, Trim Optimization, 2013.

Linijsko brodarstvo moglo bi se prilagoditi novom načinu optimizacije kod krcanja i slaganja tereta dovođenjem broda na tablični željeni trim. Dovođenje broda na željeni trim izvršit će se prvenstveno optimizacijom krcanja i slaganja tereta uz što manje korištenje balastnih tankova. Balastiranje će se koristiti u navigaciji u funkciji dinamičkog održavanja željenog trima sukladno smanjenju potrošnih masa koje čine posrednu nosivost: teško i lako gorivo, ulje za podmazivanje i voda na brodu. Uzimajući ovaj dodatni kriterij, direktno će se utjecati u organizacijskom smislu na optimalno vođenje broda, odnosno na smanjenje troškova

putovanja. Jedan od ključnih čimbenika koji se brodarima nametnuo u funkciji za održivom brodarskom politikom je smanjenje ukupnih troškova putovanja što je moguće direktno postići unaprijed kod operativnog plana krcanja i slaganja. Za postavljanje modela plana krcanja i slaganja tereta u funkciji skraćanja prekrcajnog procesa prvenstveno je potrebno uspostaviti matematičku formulaciju modela gdje je nužno uvrstiti sva ograničenja i čimbenike koji utječu na raspored kontejnera. U matematičkom modelu također će se uspostaviti dodatni kriteriji optimizacije koji su opisani u ovome poglavlju. Nakon postavljene matematičke formulacije u sljedećem poglavlju razvit će se programski kod u funkciji dobivanja optimalnog rješenja odnosno, optimalnog rasporeda kontejnera na brodu.

5.3. Matematička formulacija modela krcanja i slaganja

Problem koji se javlja je kako najbolje rasporediti teret na brodovima za prijevoz kontejnera (engl. *Container Stowage Problem* - CSP), a da se pri tome zadovolje brojna ograničenja te ujedno minimizira vrijeme krcanja i slaganja tereta. Za rješavanje problema prvenstveno je potrebno uspostaviti matematičku formulaciju modela.

U tom slučaju uvode se sljedeće oznake: p – pozicija kontejnera na brodu, k – oznaka kontejnera, m – ukupan broj kontejnera za ukrcaj, n – broj pozicija na brodu,

$$p \in P = \{1, \dots, n\} \quad (5.1)$$

$$k \in K = \{1, \dots, m\}. \quad (5.2)$$

Pretpostavlja se binarna varijabla odlučivanja:

$$X_{pk} = \begin{cases} 1 & \text{ako je kontejner } k \text{ na poziciji } p \\ 0 & \text{inače.} \end{cases} \quad (5.3)$$

Pozicija p kontejnera na brodu definirana je varijablama b, r, t gdje je

$$b \in B = \{1, \dots, n_b\}, \quad (5.4)$$

odnosno oznaka b (od engleske riječi *bay*) označava poziciju kontejnera u odnosu prema uzdužnici broda gledajući od pramca prema krmi, dok je n_b maksimalni broj kontejnera smještenih po duljini broda. Oznaka r (od engleske riječi *row*) označava poziciju kontejnera u odnosu prema širini broda gledajući lijevo i desno od središnje linije

$$r \in R = \{1, \dots, n_r\}, \quad (5.5)$$

gdje je n_r maksimalni broj složenih kontejnera po širini broda.

Oznaka t (od engleske riječi *tier*) označava poziciju kontejnera u odnosu prema njegovoj poziciji po vertikali gledajući od kobilice do glavne palube i kontejnera smještenih po visini iznad glavne palube

$$t \in T = \{1, \dots, n_t\}, \quad (5.6)$$

gdje je n_t maksimalni broj kontejnera složenih po visini.

U praksi dakle pozicija kontejnera na brodu označava se pomoću uređene trojke

$$p \in B \times R \times T. \quad (5.7)$$

Binarna varijabla odlučivanja se prikazuje izrazom

$$X_{pk} = X_{brtk}, \quad (5.8)$$

što direktno određuje poziciju kontejnera k na brodu. Vrijednost varijable će biti $X_{brtk} = 0$ ukoliko kontejner nije ukrcan na brod. U optimalnom rješenju dobit će se točna pozicija svakog kontejnera na brodu.

Definira se t_{pk} ($\forall p \in P, \forall k \in K$) potrebno vrijeme za ukrcaj kontejnera k na poziciju p . Na temelju prethodno definiranih varijabli postavljen je sljedeći model optimizacije gdje funkcija cilja Z predstavlja minimalno ukupno vrijeme za prekrcaj kontejnera na brod;

$$\min Z = \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} t_{pk} \cdot X_{pk} \quad (5.9)$$

uz ograničenja:

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} X_{pk} = m \quad (5.10)$$

$$\sum_{k \in K} X_{pk} = 1 \quad \forall p \in P \quad (5.11)$$

$$\sum_{p \in P} X_{pk} = 1 \quad \forall k \in K. \quad (5.12)$$

Ograničenje (5.10) definira ukupni broj kontejnera koji se mogu krcati/slagati na brodu. Ograničenja (5.11) i (5.12) znače da svaki kontejner može biti složen na jednu određenu poziciju na brodu i da svaka pozicija može imati samo jedan ukrcani kontejner.

Prema načinu pozicioniranja kontejnera parni *bay* se koristi za slaganje 40-stopnog kontejnera i odgovara slaganju dvaju spojenih 20-stopnih kontejnera. Neparni *bay* koristi se za slaganje kontejnera od 20 stopa stoga označimo sa $B_{20'}$ skup neparnih i $B_{40'}$ skup parnih *bayeva*.

$$B_{20'} \cup B_{40'} = B \quad (5.13)$$

Oznaka $K_{20'}$ predstavlja skup svih 20-stopnih dok oznaka $K_{40'}$ predstavlja skup svih 40-stopnih kontejnera, dakle

$$K_{20'} \cup K_{40'} = K. \quad (5.14)$$

Nadalje, ograničenja (5.15) i (5.16) se nameću ukoliko je u paran *bay* b složen 40-stopni kontejner, ne mogu se složiti dva spojena kontejnera od 20 stopa i obrnuto.

$$\sum_{k \in K_{20'}} X_{b+1 r t k} + \sum_{k \in K_{40'}} X_{b r t k} \leq 1 \quad \forall b \in B_{40'}, r, t \quad (5.15)$$

$$\sum_{k \in K_{20'}} X_{b-1 r t k} + \sum_{k \in K_{40'}} X_{b r t k} \leq 1 \quad \forall b \in B_{40'}, r, t \quad (5.16)$$

Izraz (5.17) uzima u obzir da se u svaki parni *bay* može složiti: jedan 20-stopni kontejner, dva 20-stopna kontejnera, jedan 40-stopni kontejner ili niti jedan kontejner.

$$\frac{1}{2} \sum_{k \in K_{20'}} X_{b r t k} + \sum_{k \in K_{40'}} X_{b r t k} \leq 1 \quad \forall b \in B, r, t. \quad (5.17)$$

Jedno od važnijih ograničenja u matematičkom modelu je sprječavanje ukrcaja 20-stopnih kontejnera iznad 40-stopnog kontejnera na palubi što je prikazano sljedećim izrazima (5.18), (5.19):

$$\sum_{k \in K_{20'}} X_{b+1 r t+1 k} + \sum_{k \in K_{40'}} X_{b r t k} \leq 1 \quad \forall b \in B_{40'}, r, t = 1, \dots, n_t - 1 \quad (5.18)$$

$$\sum_{k \in K_{20'}} X_{b-1 r t+1 k} + \sum_{k \in K_{40'}} X_{b r t k} \leq 1 \quad \forall b \in B_{40'}, r, t = 1, \dots, n_t - 1. \quad (5.19)$$

Sljedeći izraz u matematičkom modelu (5.20) govori da se ispod 20-stopnog kontejnera također mora složiti kontejner od 20 stopa kako bi slaganje bilo u skladu s normama.

$$\sum_{k \in K_{20'}} X_{b r t k} - \sum_{k \in K_{20'}} X_{b r t-1 k} \leq 0 \quad \forall b \in B_{20'}, r, t = 2, \dots, n_t. \quad (5.20)$$

Oznaka W_k predstavlja masu pojedinog kontejnera k , oznaka KN predstavlja maksimalnu ukupnu masu svih kontejnera, a ukupna masa kontejnera za ukrcaj u jednoj luci definira se oznakom KN_t .

Dakle,

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} W_k \cdot X_{p k} \leq KN \quad (5.21)$$

$$\sum_{k_1, k_2 \in K_{20'}} (W_{k_1} \cdot X_{b r t k_1} - W_{k_2} \cdot X_{b r t+1 k_2}) \geq 0 \quad \forall b, r, t = 1, \dots, n_t - 1. \quad (5.22)$$

Oznake k_1 i k_2 predstavljaju dva proizvoljna kontejnera s pripadnim masama W_{k_1} i W_{k_2} . U izrazu (5.22) ograničeno je slaganje težih kontejnera iznad lakših.

Isti izraz ujedno osigurava da se kontejner ne može složiti iznad prazne pozicije. Označavanje pozicije kontejnera prema njegovoj visini dodatno je podijeljeno na dvije kategorije: slaganje kontejnera po visini u skladištu (skup T_H) i slaganje kontejnera na palubi (skup T_D). U praksi jedno od važnijih ograničenja je ukupna masa svih kontejnera u jednom stupcu (engl. *Permissible Stack Weight*) koja je također podijeljena na masu po stupcu u skladištu i masu po stupcu na palubi. Oznaka W_{HS} predstavlja masu svih kontejnera u jednom stupcu u skladištu, dok oznaka W_{DS} predstavlja masu svih kontejnera u jednom stupcu na palubi.

$$\sum_{t \in T_H} \sum_{k \in K_{40'}} W_k \cdot X_{b r t k} \leq W_{HS} \quad \forall b \in B_{40'}, r \in R \quad (5.23)$$

$$\sum_{t \in T_D} \sum_{k \in K} W_k \cdot X_{b r t k} \leq W_{DS} \quad \forall b \in B, r \in R. \quad (5.24)$$

Izrazi (5.23) i (5.24) ograničavaju masu svih kontejnera po stupcu na palubi ili u skladištu. Oznakom H_k definira se visina pojedinog kontejnera k , dok se maksimalna visina svih kontejnera u jednom stupcu na palubi označava H_{DS} i definira se sljedeće ograničenje:

$$\sum_{t \in T_D} \left(\frac{1}{2} \sum_{k \in K_{20'}} H_k \cdot X_{b r t k} + \sum_{k \in K_{40'}} H_k \cdot X_{b r t k} \right) \leq H_{DS} \quad \forall b \in B, r \in R. \quad (5.25)$$

Istom logikom kao na palubi, izraz (5.26) ograničava ukupnu visinu svih kontejnera gdje se oznakom H_{HS} definira maksimalna visina svih kontejnera u jednom stupcu u skladištu:

$$\sum_{t \in T_H} \sum_{k \in K_{40'}} H_k \cdot X_{b r t k} \leq H_{HS} \quad \forall b \in B, r \in R. \quad (5.26)$$

U tehnologiji prijevoza kontejnera morem najčešće se prevozi tri različita tipa kontejnera: standardni 20 i 40-stopni kontejner (engl. *Dry Box*), kontejner koji prevozi opasan teret (engl. *Dangerous Goods – DG*) te specijalizirani izolacijski (rashladni) kontejner (engl. *Reefer Container – RF*). U tom slučaju definiraju se sljedeći skupovi: Oznaka K_{DG} za skup svih kontejnera koji prevoze opasni teret i oznaka K_{RF} za skup svih rashladnih kontejnera. U funkciji jednostavnijeg matematičkog modela slijedit će se najčešći primjer u praksi te uzeti u obzir da se u većini slučajeva opasni teret prevozi u 20-stopnom kontejneru, dok je temperaturni kontejner najčešće duljine od 40 stopa:

$$K_{RF} \subset K_{40'} \quad (5.27)$$

$$K_{DG} \subset K_{20'}. \quad (5.28)$$

Na današnjim suvremenim brodovima za prijevoz kontejnera ograničeno je slaganje rashladnih kontejnera na određenu visinu po stupcu iznad glavne palube stoga izraz (5.29) ograničava takvo slaganje gdje je maksimalan broj kontejnera po visini označen oznakom max_{RF} . Oznaka t_{RF} predstavlja maksimalnu poziciju rashladnog kontejnera u odnosu prema njegovoj poziciji po vertikali gledajući od prve pozicije t_{d1} na palubi.

$$\sum_{t \in \{t_{d1}, t_{d2}, \dots, t_{RF}\}} \sum_{k \in K_{RF}} X_{b r t k} \leq max_{RF} \cdot n_b \cdot n_r \quad \forall b \in K_{40'}, r. \quad (5.29)$$

Sukladno Međunarodnom pomorskom kodeksu za opasne terete (engl. *International Maritime Dangerous Goods Code* – IMDG Code) potrebno je uvrstiti ograničenja kod krcanja i slaganja tereta na brodu sukladno pravilima segregacije koja su opisana u potpoglavlju 3.2. ovoga doktorskog rada.

$$\sum_{k \in K_{DG}} X_{b r t k} + \sum_{k \in K_{DG}} X_{b+2 r t k} \leq 1 \quad \forall b \in B_{20'}, t \in T_D, r \quad (5.30)$$

$$\sum_{k \in K_{DG}} X_{b r t k} + \sum_{k \in K_{DG}} X_{b r+1 t k} + \sum_{k \in K_{DG}} X_{b r+2 t k} + \sum_{k \in K_{DG}} X_{b r+3 t k} \leq 1 \quad (5.31)$$

$$\forall b \in B_{20'}, t \in T_D, r$$

$$\sum_{k \in K_{DG}} X_{b r t k} + \sum_{k \in K_{DG}} X_{b r t+1 k} + \sum_{k \in K_{DG}} X_{b r t+2 k} + \sum_{k \in K_{DG}} X_{b r t+3 k} \leq 1 \quad (5.32)$$

$$\forall b \in B_{20'}, t \in T_D, r.$$

U izrazima (5.30), (5.31), (5.32) uzelo se u obzir uzdužno, poprečno i vertikalno slaganje kontejnera s opasnim teretom na ne manju međusobnu udaljenost sukladno međunarodnim pravilima segregacije.

Brodovi za prijevoz kontejnera kao i sve vrste brodova moraju zadovoljiti minimalne kriterije stabilnosti propisane od strane IMO-a sukladno Kodeksu o stabilnosti brodova u neoštećenom stanju (Rezolucija IMO A.749(18)). Sljedeća ograničenja značajna su za ovaj matematički model jer će se njima postići: minimalna početna poprečna metacentarska visina kao pokazatelj početne poprečne stabilnosti, željeni trim broda kao pokazatelj uzdužne stabilnosti te nagib broda oko poprečne osi. Prvenstveno, da bi brod bio uspravan pozicije kontejnera u odnosu prema širini broda dijele se na lijevu (oznaka R_P) i desnu stranu (oznaka R_S) od središnje linije

$$R_P \cup R_S = R. \quad (5.33)$$

U izrazu (5.34) uvodi se sljedeća oznaka TW koja predstavlja maksimalnu razliku u masi između ukranih kontejnera na lijevoj strani od središnje linije u odnosu na ukrcane kontejnere na desnoj strani. U istome izrazu tendencija je da vrijednost TW bude što manja kako bi teret bio ravnomjerno složen u odnosu na središnju liniju, a brod uspravan sa što manjim kutom nagiba φ .

$$-TW \leq \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R_p} \sum_{k \in K} W_k \cdot X_{b r t k} - \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R_s} \sum_{k \in K} W_k \cdot X_{b r t k} \leq TW. \quad (5.34)$$

Pokazatelj početne poprečne stabilnosti je vrijednost početne poprečne metacentarske visine (M_0G) koja mora biti pozitivna vrijednost da bi brod bio stabilan. Za brodove za prijevoz kontejnera vrijednost M_0G mora biti veća od propisane minimalne vrijednosti M_0G_{min} sukladno kriterijima stabilnosti.

Vertikalni moment masa za pojedini kontejner (oznaka Mv_k) izračunava se kao umnožak mase pojedinog kontejnera k i visine težišta pojedinačne mase kontejnera iznad kobilice (oznaka kg_t):

$$Mv_k = W_k \cdot kg_t. \quad (5.35)$$

U ovome matematičkom modelu vrijednost početne poprečne metacentarske visine (M_0G) dobiva se pomoću izraza (5.36)

$$M_0G = KM_0 - \frac{D_i \cdot KG_B + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} Mv_k \cdot X_{p k}}{D_i + KN_t} \quad (5.36)$$

$$M_0G_{min} \leq M_0G \leq M_0G_{min} + \Delta M_0G, \quad (5.37)$$

gdje se vrijednosti inicijalnog deplasmana (oznaka D_i), visina početnog poprečnog metacentra iznad kobilice (oznaka KM_0) i visina sustavnog težišta broda nad kobilicom (oznaka KG_B) kod dolaska broda u luku uzimaju kao konstante. Vrijednost inicijalnog deplasmana podrazumijeva cjelokupnu težinu broda izračunatu od operativnog planera iz prethodne luke koji je umanjen za masu iskrcanog tereta u luci gdje će se primijeniti optimizacijske metode krcanja i slaganja.

Također, uvodi se sljedeća oznaka ΔM_0G koja predstavlja dopušteno odstupanje od M_0G_{min} u pozitivnoj vrijednosti kako brod ne bi imao preveliku početnu poprečnu metacentarsku visinu, odnosno da brod ne bude prestabilan što je ograničeno izrazom (5.37).

Uzdužni moment masa po duljini u smjeru uzdužnice broda za pojedini kontejner (Oznaka Mu_k) izračunava se kao umnožak mase pojedinog kontejnera k i udaljenost težišta pojedinačne mase kontejnera od krmene okomice (oznaka xg_b):

$$Mu_k = W_k \cdot xg_b \quad (5.38)$$

Prema potpoglavlju 3.1. ovoga doktorskog rada uvode se sljedeća ograničenja kako bi se izračunao trim broda (oznaka $TRIM$) kao pokazatelj uzdužne stabilnosti broda

$$TRIM = \frac{D_i \cdot XG_B + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} Mu_k \cdot X_{pk} - (D_i + KN_t) \cdot XB}{Mj} \quad (5.39)$$

$$TRIM_{FUEL} - \Delta TRIM \leq TRIM \leq TRIM_{FUEL} + \Delta TRIM, \quad (5.40)$$

gdje se vrijednosti udaljenost težišta istisnine od krmene okomice (oznaka XB), jedinični moment pretege (oznaka Mj) te udaljenost sustavnog težišta broda od krmene okomice (oznaka XG_B) uzimaju kao konstante.

Izraz (5.40) od velikog je značaja za ovaj matematički model jer se uvodi oznaka $TRIM_{FUEL}$ kao konstanta koja nam određuje optimalan trim broda u funkciji manje potrošnje goriva, a $\Delta TRIM$ njegovo dopušteno odstupanje od te vrijednosti.

U matematičkom modelu ovoga doktorskog rada moraju se postaviti značajna ograničenja s obzirom na rotaciju luka u jednom linijskom servisu. Prema potpoglavlju 5.1. luci Rijeka se nasumce dodjeljuju odabrani grupirani *bayevi* na brodu. Skup tih *bayeva* na jednom kontejnerskom brodu za ovu destinaciju označen je oznakom B_{RKA} pa se za primjer može zapisati:

$$B_{RKA} = \{7, 9\}. \quad (5.41)$$

Nadalje, uvodi se oznaka B_{KP} za *bayeve* dodijeljene luci Kopar te oznaka B_{VE} za *bayeve* dodijeljene luci Venecija na jednome kontejnerskom brodu:

$$B_{KP} = \{3, 5\} \quad (5.42)$$

$$B_{VE} = \{15, 17\} \quad (5.43)$$

Iz navedenog zapisuje se sljedeći izraz:

$$B_{RKA} \cup B_{KP} \cup B_{VE} \subset B \quad (5.44)$$

Svim *bayevima* koji su grupirani u skup B_{RKA} , odnosno za luku Rijeka pridodaje se vrijednost 1 na sljedeći način;

$$bayd_b = 1 \quad \forall b \in B_{RKA}. \quad (5.45)$$

Analogno tome pridodat će se vrijednost 2 svim *bayevima* iz skupa B_{KP} odnosno za luku Kopar:

$$bayd_b = 2 \quad \forall b \in B_{KP} \quad (5.46)$$

Konačno pridodaje se vrijednost 3 svima *bayevima* iz skupa B_{VE} za luku Venecija:

$$bayd_b = 3 \quad \forall b \in B_{VE}. \quad (5.47)$$

U matematičkom modelu uzet će se u obzir pet luka u linijskom kontejnerskom servisu od kojih su luke Rijeka, Kopar i Venecija udružene u sjevernojadransku regiju (*engl. NA Multi-port gateway region*).

Oznakom POD (engl. *Port of discharge*) označuje se skup svih iskrcajnih luka u jednom linijskom kontejnerskom servisu te se prvoj luci u rotaciji (Rijeka) dodjeljuje broj 1, drugoj luci (Kopar) broj 2, a trećoj luci u rotaciji (Venecija) broj 3.

$$POD = \{1, 2, 3, 4, 5\}. \quad (5.48)$$

Nadalje, uvodi se oznaka d_k (engl. *destination*) za luku iskrcaja kontejnera k

$$d_k \in POD. \quad (5.49)$$

Sljedeći izraz (5.50) određuje da se kontejneri koji imaju luku iskrcaja Rijeka slažu u grupirane *bayeve* iz skupa B_{RKA} . Analogno tome ograničenje vrijedi i za luke Kopar te Veneciju:

$$\begin{aligned} \forall b \in B_{RKA} \cup B_{KP} \cup B_{VE} \\ bayd_b \cdot X_{brtk} = d_k \cdot X_{brtk} \quad (5.50) \\ \forall k, r, t. \end{aligned}$$

Budući da se želi spriječiti slaganje kontejnera s lukama iskrcaja Rijeka, Kopar i Venecija (1, 2, 3) u slobodne *bayeve* (*bayevi* koji nisu grupirani za navedene luke) uvodi se sljedeća oznaka za sve ostale luke u linijskom kontejnerskom servisu (Ancona i Pirej),

$$bayd_b = 4 \quad \forall b \notin B_{RKA} \cup B_{KP} \cup B_{VE}, \quad (5.51)$$

stoga uvodimo ograničenje prema izrazu (5.52):

$$\begin{aligned} \forall b \notin B_{RKA} \cup B_{KP} \cup B_{VE} \\ bayd_b \cdot X_{brtk} \leq d_k \cdot X_{brtk} \quad (5.52) \\ \forall k, r, t. \end{aligned}$$

U matematičkom modelu potrebno je spriječiti krcanje i slaganje kontejnera u slobodne *bayeve* koji imaju iskrcajnu luku ranije ispod onih kontejnera koji imaju kasniju iskrcajnu luku, stoga se zapisuje:

$$\sum_{k_1, k_2 \in K} (d_{k_1} \cdot X_{b r t k_1} - d_{k_2} \cdot X_{b r t+1 k_2}) \geq 0 \quad \forall b \notin B_{RKA} \cup B_{KP} \cup B_{VE} \quad (5.53)$$

$$\forall r, t.$$

U konačnici objektna funkcija cilja Z je prilagođena na temelju prethodno definiranih varijabli i svih postavljenih ograničenja gdje će se dobiti minimalno ukupno vrijeme iskrcaja kontejnera na brod s naglaskom na ograničenja poprečne i uzdužne stabilnosti i na optimalni trim broda u funkciji manje potrošnje goriva:

$$\begin{aligned} \min Q = & \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} t_{pk} \cdot X_{pk} \\ & + \left[\left(KM_0 - \frac{D_i \cdot KG_B + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} Mv_k \cdot X_{pk}}{D_i + KN_t} \right) - M_0 G_{min} \right] \alpha_1 \\ & + \left| \frac{D_i \cdot XG_B + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} Mu_k \cdot X_{pk} - (D_i + KN_t) \cdot XB}{Mj} - TRIM_{FUEL} \right| \alpha_2 \\ & + \left| \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R_P} \sum_{k \in K} W_k \cdot X_{b r t k} - \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R_S} \sum_{k \in K} W_k \cdot X_{b r t k} \right| \alpha_3. \end{aligned} \quad (5.54)$$

Uz ovu objektnu funkciju cilja Q vrijede sva prethodno navedena ograničenja osim (5.34), (5.36), (5.39), koja smo pridodali novoj funkciji. Konstante α_1 , α_2 i α_3 predstavljaju važnost pojedinog dijela objektna funkcije Q . U sljedećim tablicama prikazan je popis konstanta, varijabla i skupova koje su se koristile za uspostavu matematičke formulacije modela krcanja i slaganja.

Tablica 12. Konstante u matematičkom modelu

Konstante	
k	oznaka kontejnera
p	pozicija kontejnera na brodu
m	ukupan broj kontejnera za ukrcaj
n	broj pozicija na brodu
b	(od engleske riječi <i>bay</i>) označava poziciju kontejnera u odnosu prema uzdužnici broda gledajući od pramca prema krmi
n_b	maksimalni broj kontejnera smještenih po duljini broda.
r	(od engleske riječi <i>row</i>) označava poziciju kontejnera u odnosu prema širini broda gledajući lijevo i desno od središnje linije
n_r	maksimalni broj složenih kontejnera po širini broda
t	(od engleske riječi <i>tier</i>) označava poziciju kontejnera u odnosu prema njegovoj poziciji po vertikali gledajući od kobilice do glavne palube i kontejnera smještenih po visini iznad glavne palube
n_t	maksimalni broj kontejnera složenih po visini
t_{pk}	potrebno vrijeme za ukrcaj kontejnera k na poziciju p
W_k	masa pojedinog kontejnera k
KN	maksimalna masa svih kontejnera koja se može ukrcati na brod
KN_t	maksimalna masa svih kontejnera
W_{HS}	masa svih kontejnera u jednom stupcu u skladištu
W_{DS}	masa svih kontejnera u jednom stupcu na palubi
H_k	visina pojedinog kontejnera k
H_{HS}	maksimalna visina svih kontejnera u jednom stupcu u skladištu
H_{DS}	maksimalna visina svih kontejnera u jednom stupcu na palubi
max_{RF}	maksimalan broj rashladnih (reefer) kontejnera po visini iznad glavne palube
TW	maksimalna razlika u masi između ukrvanih kontejnera na lijevoj strani od središnje linije u odnosu na ukrpane kontejnere na desnoj strani
kg_t	visina težišta pojedinačne mase kontejnera iznad kobilice (ovisi o <i>tieru</i>)
KG_B	visina sustavnog težišta broda nad kobilicom
XG_B	udaljenost sustavnog težišta broda od krmene okomice
xg_b	udaljenost težišta pojedinačne mase kontejnera od krmene okomice (ovisi o <i>bayu</i>)
XB	udaljenost težišta istisnine od krmene okomice
KM_0	visina početnog poprečnog metacentra iznad kobilice
D_i	inicijalni depasman
M_j	jedinični moment pretege
M_0G_{min}	minimalna početna poprečna metacentarska visina
ΔM_0G	dopušteno odstupanje od M_0G_{min}
$TRIM_{FUEL}$	optimalan trim broda u funkciji manje potrošnje goriva
$\Delta TRIM$	dopušteno odstupanje od $TRIM_{FUEL}$
$baydb$	broj pridodan svim <i>bayevima</i> s obzirom na luku iskrcaja
d_k	oznaka destinacije za luku iskrcaja
t_{di}	i -ta pozicija kontejnera u odnosu prema njegovoj poziciji po vertikali gledajući na palubi
t_{RF}	maksimalna pozicija rashladnog kontejnera u odnosu prema njegovoj poziciji po vertikali gledajući od prve pozicije t_{d1} na palubi
α_1, α_2 i α_3	brojevi koji predstavljaju važnost pojedinog djela objektne funkcije Q

Tablica 13. Varijable u matematičkom modelu

Varijable	
X_{pk}	binarna varijabla odlučivanja ako je kontejner k na poziciji p
X_{brtk}	binarna varijabla odlučivanja ako je kontejner k na poziciji (b, r, t)
M_0G	početna poprečna metacentarska visina
Mv_k	vertikalni moment masa za pojedini kontejner od kobilice
Mu_k	uzdužni moment masa za pojedini kontejner u smjeru uzdužnice broda od krmene okomice
$TRIM$	razlika između gaza na pramcu i gaza na krmi (pokazatelj uzdužne stabilnosti broda)

Tablica 14. Skupovi u matematičkom modelu

Skupovi	
K	skup svih kontejnera na brodu
P	skup svih pozicija na brodu
B	skup svih bayeva odnosno skup svih pozicija kontejnera u odnosu prema uzdužnici broda gledajući od pramca prema krmi
R	skup svih rowa odnosno skup svih pozicija kontejnera u odnosu prema širini broda gledajući lijevo i desno od središnje linije
T	skup svih tiera odnosno skup svih pozicija kontejnera u odnosu prema njegovoj poziciji po vertikali gledajući od kobilice do glavne palube i kontejnera smještenih po visini iznad glavne palube
$B_{20'}$	skup svih neparnih bayeva
$B_{40'}$	skup svih parnih bayeva
$K_{20'}$	skup svih 20-stopnih kontejnera
$K_{40'}$	skup svih 40-stopnih kontejnera
T_H	skup svih pozicija kontejnera po visini u skladištu
T_D	skup svih pozicija kontejnera po visini na palubi
K_{DG}	skup svih kontejnera koji prevoze opasni teret
K_{RF}	skup svih rashladnih (engl. <i>reefer</i>) kontejnera
R_P	skup svih pozicija kontejnera u odnosu prema širini broda na lijevu stranu (engl. <i>port</i>)
R_S	skup svih pozicija kontejnera u odnosu prema širini broda na desnu stranu (engl. <i>starboard</i>)
B_{RKA}	skup bayeva na jednom kontejnerskom brodu za luku iskrcaja Rijeka
B_{KP}	skup bayeva na jednom kontejnerskom brodu za luku iskrcaja Kopar
B_{VE}	skup bayeva na jednom kontejnerskom brodu za luku iskrcaja Venecija
POD	skup svih iskrcajnih luka u jednom linijskom kontejnerskom servisu

5.4. Razvoj programskog koda za formulaciju modela krcanja i slaganja

Za izradu optimalnog plana krcanja i slaganja tereta primijenio se genetski algoritam kao metaheuristička metoda optimiziranja koja se inače koristi za rješavanje različitih problema iz inženjerske prakse. Genetski algoritam (engl. *Genetic Algorithm – skraćeno GA*) sastoji se od genetskog proračuna odnosno koda, a koristi tehnike prirodnog evolucijskog procesa živih bića (nasljeđivanje, mutacija, selekcija, križanje i drugo). Razvoj genetskog algoritma odnosno evolucija najčešće započinje početnim skupom (početnom populacijom) rješenja koja se nazivaju kromosomi. Kromosomi se sastoje od skupa vrijednosti koji se nazivaju geni. Vrijednosti gena određuju kvalitetu pojedinog kromosoma. Kromosomi se u početnoj populaciji mogu definirati slučajnim (engl. *Random*) vrijednostima gena ili se vrijednosti gena mogu definirati iz domene rješenja za koji se misli da će kromosom sadržavati najbolja rješenja. Postavljena objektna funkcija cilja u matematičkom modelu doktorskog rada određuje koja su dobivena rješenja (kromosomi) bolja, tj. određuje tzv. kvalitetnije jedinke koje će preživjeti evoluciju. Stoga, osnovni čimbenici za funkcionalnost genetskog algoritma su objektna funkcija koja će vrednovati pojedino rješenje u genetskom algoritmu. U genetskom algoritmu dobiveno rješenje, koje ocjenjuje objektna funkcija, može biti zapisano u binarnom kodu ili nizom simbola ili realnih brojeva. Rješenja dobivena slučajnim odabirom su sastavni dio svake inicijalne populacije. Nakon procesa inicijalizacije slijedi proces selekcije kojom se izabiru rješenja koja će biti dio sljedeće generacije rješenja. Individualna rješenja se odabiru kroz proces funkcije dobrote tako da se najčešće izabiru bolja rješenja koja u većini slučajeva imaju veću vrijednost postavljene funkcije. Najpoznatije metode selekcije koje se koriste u genetskom algoritmu su:

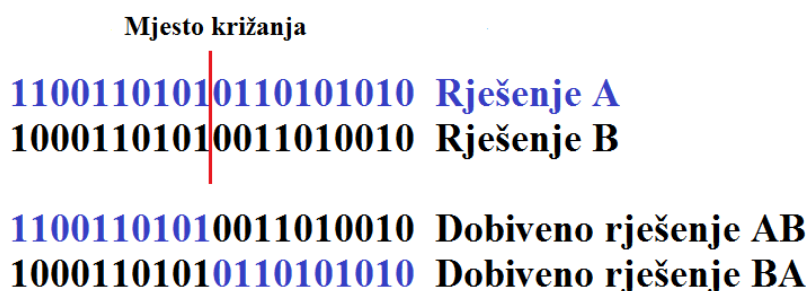
- Elitizam – najbolji kromosom (ili nekoliko najboljih), prenosi se iz trenutne populacije u sljedeću generaciju, tako se mogu jako brzo poboljšati performanse genetskog algoritma jer najbolja rješenja uvijek ostaju u evoluciji,
- selekcija tzv. *Roulette wheel* – svaki kromosom, ovisno o funkciji dobrote, može ući u sljedeću generaciju (veću vjerojatnost preživljavanja imaju oni kromosomi koji su bolji, ali i loši kromosomi imaju mogućnost prolaska),
- turnirska selekcija – populacija se podijeli u podgrupe te se izabire najbolji kromosom iz svake grupe koji prelazi u iduću.

U ovome doktorskom radu koristit će se elitizam kao metoda selekcije jer će se dobri planovi krcanja i slaganja tereta međusobno prenositi u sljedeću generaciju čime će se stvoriti optimalan plan krcanja i slaganja tereta u funkciji kraćeg prekrcajnog procesa.

Nakon prenošenja rješenja u sljedeću generaciju dolazi do procesa križanja u genetskom algoritmu. Opća definicija križanja u genetskom algoritmu temelji se na križanju gena dvaju roditelja (kromosoma) nakon kojeg se dobiju dva nova rješenja koja predstavljaju potomstvo križanih roditelja. Drugim riječima u ovome radu križat će se planovi krcanja i slaganja tereta da bi se dobio optimalan raspored tereta na temelju modela plana krcanja i slaganja tereta koji će zadovoljiti sigurnosne kriterije, ali i kriterij postavljene optimizacije. Najčešći načini križanja u genetskom algoritmu su sljedeći:

- križanje rješenja s jednom točkom prekida
- križanje rješenja s više točaka prekida
- uniformno križanje/uniformna rješenja.

Križanje s jednom točkom prekida temelji se po slučajnom ili logičkom odabiru jednog mjesta križanja između dvaju rješenja (Slika 13). Križanje s dvjema točkama prekida slično je križanju jednom točkom prekida, međutim, kromosom se dijeli s dvije ili više točaka prekida. Uniformno križanje temelji se na računu vjerojatnosti nasljeđivanja čime se točno određuje mjesto križanja međutim ova tehnika se neće koristiti u ovome doktorskom radu.



Slika 13. Primjer križanja rješenja s jednim mjestom prekida
Izvor: Autor

U ovom doktorskom radu za dobivanje optimalnog plana krcanja i slaganja koristit će se rješenje s jednim mjestom križanja. Uz križanje rješenja drugi genetski operator koji se koristi u genetskom algoritmu je mutacija. Mutacija podrazumijeva slučajnu promjenu jednog ili više gena unutar pojedinog kromosoma. U ovome slučaju određuje se parametar koji određuje vjerojatnost mutacije. Postoje različiti tipovi mutacije: jednostavna mutacija, miješajuća

mutacija, potpuno miješajuća mutacija te invertirajuća mutacija. Za optimizaciju krcanja i slaganja tereta koristit će se jednostavna mutacija u funkciji što boljeg rezultata. Prilikom optimizacije proces generacije se nastavlja dok neki od uvjeta algoritma ne bude zadovoljen. Genetski algoritam će završiti u sljedećim slučajevima:

- pronađeno rješenje koje zadovoljava minimalne kriterije sukladno zadanoj znanstvenoj hipotezi u ovom radu
- izvršen zadani broj generacija kako bi se time pronašlo najbolje rješenje
- uočen izostanak napretka algoritma prilikom stvaranja nove generacije.

Jedna od glavnih poteškoća u genetskom algoritmu je veliki utjecaj broja ulaznih parametara na efikasnost i na vrijeme potrebno za dobivanje rezultata. Jedan od načina optimiranja samog metaheurističkog algoritma je optimiranje parametara eksperimentiranjem. Parametri genetskog algoritma koji se mijenjaju u procesu su veličina populacije, vjerojatnost mutacije, vjerojatnost križanja te broj iteracija (generacija). U ovome doktorskom radu koristit će se parametri genetskog algoritma sukladno tablici 15.

Tablica 15. Parametri genetskog algoritma

Parametri	Oznaka	Vrijednosti
Veličina populacije	N	2.500
Vjerojatnost mutacije	p_m	0,01
Vjerojatnost križanja	p_c	1
Broj iteracija	I	6

Izvor: Modificirao autor prema Golub, M., Vrednovanje uporabe genetskih algoritama za aproksimaciju vremenskih nizova, magistarski rad, FER, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1996.

Veličina populacije direktno utječe na kvalitetu rješenja i na vrijeme trajanja genetskog algoritma. Vjerojatnost mutacije se izračunava na osnovi mutacije jedne vrijednosti u kromosomu a najčešći odabir prema Golubu za ovaj optimizacijski problem je vrijednost intervala [0.005, 0.01], dok vjerojatnost križanja u intervalu [0.8, 1] daje najbolje rezultate.⁴⁶ Broj iteracija predstavlja broj razvojnih generacija koji se podešava dok se ne pronađe prihvatljivo optimalno rješenje.

⁴⁶ Golub, M., Vrednovanje uporabe genetskih algoritama za aproksimaciju vremenskih nizova, magistarski rad, FER, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1996.

6. IMPLEMENTACIJA I VALIDACIJA MODELA KRCANJA I SLAGANJA TERETA

Za implementaciju i validaciju modela potrebno je kreirati reprezentativni skup podataka o teretu koji je potrebno ukrcati, odnosno složiti na brod u funkciji kraćeg prekrcajnog procesa te smanjenja troškova putovanja. Za početni primjer koristi se rješenje iskustveno iz prakse dobiveno od operativnog planera, odnosno definira se i prikazuje prvo inicijalno rješenje plana krcanja i slaganja (inicijalizacija). Nakon inicijalizacije drugi primjeri dobiveni su metaheurističkim genetskim algoritmom na osnovi slučajno izabranih rješenja gdje se dobilo optimalno rješenje krcanja i slaganja. U konačnici dobiveni primjeri su analizirani uz prikazane vrijednosti objektne funkcije cilja te uz provjeru jesu li rezultati u okviru zadanih ograničenja.

Potrebno je napraviti optimalan raspored tereta na brodu u funkciji smanjenja prekrcajnog procesa te smanjenja ukupnih troškova putovanja. Implementacija i validacija modela izvršila se na primjeru sjevernojadranskih luka koje su udružene u regionalni lučki sustav: Rijeka, Kopar, Trst, Venecija i Ravena (engl. *North Adriatic Multi-port gateway region - NA*). Za validaciju modela koristi se kontejnerski linijski servis kompanije COSCO koji u rotaciji ima pet kontejnerskih lučkih terminala (Rijeka, Kopar, Venecija, Ancona i Pirej).



Slika 14. Kontejnerski linijski servis odabran za implementaciju
Izvor: Autor

Plan krcanja i slaganja tereta izvršio se za kontejnerski brod koji opslužuje linijski servis prikazan na slici 14. čije su dimenzije duljina preko svega 100,5 metara, širina 19,5 metara, prijevozni kapacitet 328 TEU-a.

Prvi primjer (engl. *Case study*) prikazuje se na reprezentativnom skupu podataka odnosno prema zadanim kontejnerima za ukrcaj s pripadajućim ulaznim podacima u sljedećim tablicama.

Tablica 16. Prikaz kontejnera s pripadajućim ulaznim podacima – prvi dio

Redni broj kontejnera	Veličina kontejnera [stopa]	Masa kontejnera [tona]	Rashladni (Reefer) kontejneri	Opasni teret (DG)	Luka iskrcaja (POD)
1.	20	15	0	0	1
2.	20	12	0	0	1
3.	20	12	0	0	1
4.	20	10	0	0	1
5.	20	10	0	0	1
6.	20	10	0	0	1
7.	20	10	0	0	1
8.	20	9	0	0	1
9.	20	8	0	0	1
10.	20	5	0	0	1
11.	20	5	0	1	1
12.	40	30	0	0	1
13.	40	30	0	0	1
14.	40	28	0	0	1
15.	40	28	0	0	1
16.	40	20	0	0	1
17.	40	20	0	0	1
18.	20	15	0	0	2
19.	20	15	0	1	2
20.	20	12	0	0	2
21.	20	12	0	0	2
22.	20	12	0	0	2
23.	20	12	0	0	2
24.	20	11	0	0	2
25.	20	10	0	0	2
26.	20	9	0	0	2
27.	40	30	0	0	2
28.	40	30	0	0	2
29.	40	30	0	0	2
30.	40	30	0	0	2

Izvor: Autor

Tablica 17. Prikaz kontejnera s pripadajućim ulaznim podacima – drugi dio

Redni broj kontejnera	Veličina kontejnera [stope]	Masa kontejnera [tone]	Rashladni (Reefer) kontejneri	Opasni teret (DG)	Luka iskrcaja (POD)
31.	40	30	0	0	2
32.	40	30	0	0	2
33.	40	28	0	0	2
34.	40	28	0	0	2
35.	40	26	0	0	2
36.	40	26	0	0	2
37.	40	26	0	0	2
38.	40	26	0	0	2
39.	40	24	0	0	2
40.	40	24	0	0	2
41.	40	14	1	0	3
42.	40	14	1	0	3
43.	40	26	0	0	3
44.	40	26	0	0	3
45.	40	24	0	0	3
46.	40	24	0	0	3
47.	40	20	0	0	3
48.	40	20	0	0	3
49.	20	10	0	0	4
50.	20	10	0	0	4
51.	20	10	0	0	4
52.	20	10	0	0	4
53.	20	10	0	1	4
54.	20	10	0	0	4
55.	20	10	0	0	4
56.	20	10	0	0	4
57.	40	30	0	0	4
58.	40	30	0	0	4
59.	40	28	0	0	4
60.	40	28	0	0	4

Izvor: Autor

U prethodnim tablicama vidljivo je ukupno 60 kontejnera namijenjenih za ukrcaj s pripadajućim ulaznim podacima: veličina kontejnera (20 ili 40 stopa), masa kontejnera, svojstvo tereta koji se prevozi te luka iskrcaja. Ukoliko se radi o opasnom ili lakopokvarljivom teretu dodijeljena je vrijednost 1, dok je vrijednost 0 dodijeljena za standardni teret u klasičnim kontejnerima.

S obzirom na luku iskrcaja dodijeljene su vrijednosti od 1 do 5 sukladno kontejnerskom linijskom servisu: 1 – Rijeka, 2 – Kopar, 3 – Venecija, 4 – Ancona, 5 – Pirej.

Izrada plana krcanja i slaganja tereta prvenstveno se bazira na kriterijima stabilnosti i ostalim zahtjevima sigurnosti po osnovi uvjetnih čimbenika, međutim, u ovom radu posvetila se dodatno pažnja optimizacijskim metodama u funkciji skraćanja prekrcajnog procesa. Za optimizacijska rješenja u sljedećoj tablici definirana su vremena iskrcaja pojedinog kontejnera sukladno poziciji na brodu.

Tablica 18. Vrijeme iskrcaja kontejnera s obzirom na poziciju na brodu

Vrijeme u sekundama		Tier					
		02	04	06	82	84	86
Row		1	2	3	4	5	6
06	1	168	162	156	150	144	138
04	2	162	156	150	144	138	132
02	3	156	150	144	138	132	126
00	4	150	144	138	132	126	120
01	5	144	138	132	126	120	114
03	6	138	132	126	120	114	108
05	7	132	126	120	114	108	102

Izvor: Modificirao autor prema Ambrosino, D., Sciomachen, A., Tanfani, E., Stowing a containership: the master bay plan problem, Transportation Research Part A, Vol. 38, 2004.

Iz tablice 18 vidljivo je da vrijeme iskrcaja ovisi o položaju kontejnera na brodu. S obzirom da se kontejnerska obalna dizalica pozicionira prema određenom *bayu* broda za iskrcaj, vrijeme isključivo ovisi o rasporedu kontejnera u odnosu na širinu broda i rasporedu kontejnera vertikalno po visini. Analizirajući podatke, vrijeme iskrcaja definirano je za iskrcaj pojedinog kontejnera preko desne strane za sve iskrcajne luke u linijskom servisu. Radi jednostavnosti zapisa u programskom kodu pozicije kontejnera u odnosu na širinu broda na lijevoj strani umjesto parnih brojeva označene su rednim brojevima (1,2,3). Pozicija središnjeg kontejnera u odnosu na širinu broda umjesto 00 označena je brojem 4, dok su pozicije kontejnera na desnoj strani umjesto parnih brojeva označene rednim brojevima (5,6,7). Analogno tome izvršila se i modifikacija oznake u rasporedu kontejnera po visini. Pozicije kontejnera smještenih u skladištu umjesto parnih brojeva (02, 04, 06) označene su rednim brojevima (1, 2, 3), dok su pozicije kontejnera smještenih na palubi umjesto parnih brojeva (82, 84, 86) označene rednim brojevima (4, 5, 6). Plan krcanja i slaganja tereta izvršio se za kontejnerski brod koji može ukrcati tri kontejnera po visini u svojim skladištima te tri kontejnera po visini na palubi.

Sukladno vremenima iskrcaja pojedinog kontejnera napravljen je inicijalni plan kojim se skratilo vrijeme iskrcaja čime se optimizirao prekrcajni proces. Kao što je opisano u prethodnim poglavljima pojedini *bayevi* na brodu grupirani su u određenu grupu *bayeva* (klaster *bayevi*) te su dodijeljeni pojedinim lukama u linijskom kontejnerskom servisu. Drugim riječima, na referentnom brodu *bay* 07 i *bay* 09 dodijeljeni su luci Rijeka, *bay* 03 i *bay* 05 dodijeljeni su luci Kopar, te *bay* 15 i *bay* 17 dodijeljeni su luci Venecija. Navedene tri luke u kontejnerskom linijskom servisu sastavni su dio udruženog regionalnog lučkog sustava Sjevernog Jadrana. Velika prednost kod takvog unaprijed definiranog plana krcanja i slaganja tereta na kontejnerskim brodovima očituje se u mogućnosti da brodar u svome linijskom servisu može izabrati redoslijed luke ticanja u sklopu regionalnog lučkog sustava te nesmetano izvršiti prekrcaj tereta bez repozicioniranja kontejnera. U tom slučaju preostale luke koje nisu u sastavu lučkog udruženja koriste preostale *bayeve* na brodu; *bay* 01, *bay* 19, *bay* 11, *bay* 13. Prilikom udruženja *bayeva* za pojedini lučki kontejnerski terminal vodilo se računa o nesmetanom ukrcaju 20-stopnih i 40-stopnih kontejnera. Referentni kontejnerski brod sastoji se od 10 neparnih *bayeva*, čime se dobiva četiri glavna klastera odnosno četiri parna *baya* za krcanje 40-stopnih kontejnera. Nadalje, tri parna *baya* dodijeljena su svakoj iskrcajnoj luci zasebno u udruženom regionalnom lučkom sustavu dok se četvrti parni *bay* koristi za četvrtu i petu luku zajedno u kontejnerskom linijskom servisu pod uvjetom da je potrebno spriječiti krcanje i slaganje kontejnera koji imaju iskrcajnu luku ranije ispod onih kontejnera koji imaju kasniju iskrcajnu luku.

Kod krcanja opasnog tereta u matematičkom modelu i programskom kodu definirano je ograničenje kojim se takav kontejner skladišti na palubi broda s ciljem međusobnog uzdužnog i poprečnog odijeljivanja sukladno pravilima segregacije. Uvedeno ograničenje zadovoljilo je kodnu oznaku 3 prema pravilima segregacije, a samim time zadovoljile su se kodne oznake X, 1 i 2. Drugim riječima, u inicijalnom planu krcanja i slaganja tereta opasni teret skladišten je na palubi broda s minimalnim uzdužnim i poprečnim odijeljivanjem od 6 metara s obzirom na IMDG klasu što znači tri kontejnerska prostora. Ukoliko se krcaju rashladni kontejneri potrebno je voditi računa o položaju priključnica za brodsku naponsku mrežu na brodu. Rashladni kontejneri stoga su ukrcani na palubi broda na maksimalno drugu poziciju po visini jer referentni brod nije konstruiran s palubnim mostićima te su složeni međusobno jedan pored drugog jer nemaju ograničavajući čimbenik segregacije.

Prilikom rasporeda krcanja i slaganja tereta uzelo se u obzir definirano vrijeme iskrcaja pojedinog kontejnera u funkciji dobivanja optimalnog rješenja. Za izradu ovakvog plana potrebno je zadovoljiti sve čimbenike koji utječu na izradu inicijalnog plana.

Za transformaciju matematičkog modela u programski kod potrebno je definirati granične uvjete. Ukupna masa svih kontejnera u jednom stupcu u skladištu i na palubi iznosi 90 t, dok maksimalna visina svih kontejnera u jednom stupcu u skladištu iznosi 8,90 m. Maksimalna visina na palubi ograničena je slaganjem kontejnera vertikalno na treću visinu čime je zadovoljena vidljivost sa zapovjedničkog mosta. Za ovaj referentni brod prema maksimalnom dopuštenom vertikalnom momentu s obzirom na deplasman te prema CSM-u (engl. *Cargo securing manual*) dopuštena metacentarska visina iznosi 2,90 metara. Sukladno dobivenom deplasmanu minimalna početna poprečna metacentarska visina iznosi 1,5 metar, stoga maksimalno dopušteno odstupanje od M_0G_{min} iznosi 1,4 metara. Optimalan pramčani trim broda u funkciji manje potrošnje goriva iznosi 0,5 metara, dok se dopušteno odstupanje postavilo 0,2 metara za referentni brod. Sukladno zadanim ograničenjima i čimbenicima inicijalni plan krcanja i slaganja prikazan je u sljedećim tablicama.

Tablica 19. Raspored krcanja i slaganja kontejnera – prvi dio

Veličina kontejnera [stopa]	Masa kontejnera [tona]	Rashladni (Reefer) kontejneri	Opasni teret (DG)	Luka iskrcaja (POD)	bay	row	tier	Vrijeme iskrcaja [sek]
20	10	0	0	4	1	1	1	168
20	10	0	0	4	1	2	1	162
20	10	0	0	4	1	3	1	156
20	10	0	0	4	1	1	2	162
20	10	0	0	4	1	2	2	162
20	10	0	0	4	1	3	2	150
20	10	0	0	4	1	3	3	144
20	10	0	1	4	1	1	4	150
40	30	0	0	1	9	2	4	156
40	28	0	0	1	9	3	4	138
40	20	0	0	1	9	3	5	132
40	30	0	0	1	9	2	5	138
40	28	0	0	1	7	6	1	138
40	20	0	0	1	7	6	2	132
20	5	0	0	1	9	1	1	168
20	12	0	0	1	7	4	1	150
20	10	0	0	1	7	3	1	156
20	10	0	0	1	7	5	1	144
20	12	0	0	1	9	5	1	144
20	10	0	0	1	9	4	1	150

Tablica 20. Raspored krcanja i slaganja kontejnera – drugi dio

Veličina kontejnera [stopa]	Masa kontejnera [tona]	Rashladni (Reefer) kontejneri	Opasan teret (DG)	Luka iskrcaja (POD)	bay	row	tier	Vrijeme iskrcaja [sek]
20	10	0	0	1	7	2	1	162
20	15	0	0	1	7	1	1	168
20	9	0	0	1	9	2	1	162
20	8	0	0	1	9	3	1	156
20	5	0	1	1	9	1	4	150
40	30	0	0	2	3	7	5	108
40	26	0	0	2	3	2	4	144
40	30	0	0	2	3	3	4	138
40	24	0	0	2	3	6	5	114
40	30	0	0	2	3	5	5	120
40	28	0	0	2	3	2	1	162
40	26	0	0	2	3	4	4	132
40	30	0	0	2	3	7	4	114
40	28	0	0	2	3	3	1	156
40	26	0	0	2	3	3	5	132
40	30	0	0	2	3	5	4	126
40	24	0	0	2	3	4	5	126
40	30	0	0	2	3	6	4	120
40	26	0	0	2	3	2	2	162
20	15	0	0	2	3	5	1	144
20	12	0	0	2	3	1	2	162
20	9	0	0	2	5	6	1	138
20	12	0	0	2	3	4	1	150
20	12	0	0	2	5	1	1	168
20	12	0	0	2	5	4	1	150
20	15	0	1	2	3	1	4	150
20	11	0	0	2	3	6	2	132
20	10	0	0	2	5	5	1	144
40	26	0	0	3	15	2	1	162
40	24	0	0	3	15	3	1	156
40	20	0	0	3	15	5	1	144
40	26	0	0	3	15	6	1	138
40	24	0	0	3	15	3	1	156
40	20	0	0	3	15	4	1	150
40	14	1	0	3	15	2	1	162
40	14	1	0	3	15	5	1	144
40	30	0	0	4	11	1	1	168
40	28	0	0	4	11	3	1	156
40	30	0	0	4	11	2	1	162
40	28	0	0	4	11	5	1	144

Izvor: Autor

Figure 1 displays six 3x3 grids showing the distribution of the number of bays for different types of storage units (PALUBA and SKLADIŠTE) across three categories (BAY 03, BAY 07, BAY 11 and BAY 05, BAY 09, BAY 13). The grids are arranged in a 2x3 layout.

Top Row (PALUBA):

- BAY 11 PALUBA:** Grid showing values 7 and 7 in the bottom row.
- BAY 07 PALUBA:** Empty grid.
- BAY 03 PALUBA:** Empty grid.

Bottom Row (SKLADIŠTE):

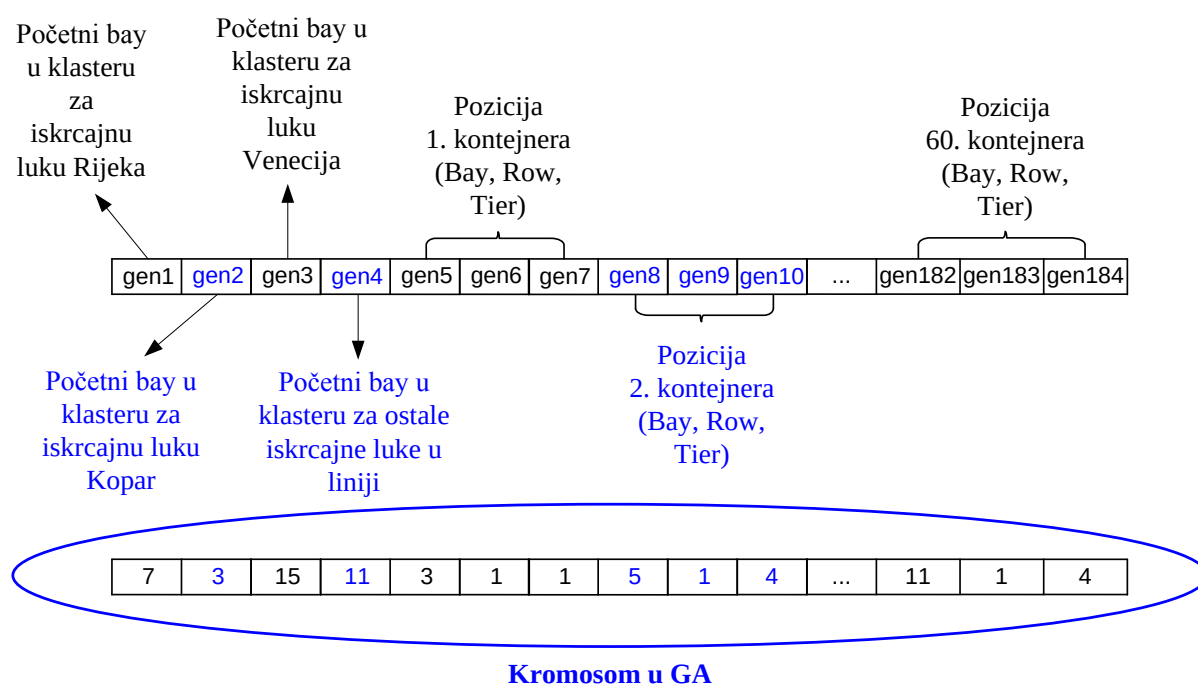
- BAY 13 SKLADIŠTE:** Grid showing values 7 and 7 in the bottom row.
- BAY 09 SKLADIŠTE:** Grid showing values 9, 12, 10, 12, 12, 11, 15, 12, 15.
- BAY 05 SKLADIŠTE:** Grid showing values 10, 10, 8, 10, 10, 9, 5, 12, 12, 15, 5.

Na prethodnoj slici prikazan je inicijalni plan krcanja i slaganja kontejnera odnosno *Bay lista* (engl. *Bay Plan*) gdje su zasebno odvojeni *bayevi* za skladište i za palubu. Dobiveni inicijalni plan zadovoljava uvjetne čimbenike koji uvjetuju raspored kontejnera ali i dodatne kriterije optimizacije. Potrebno je međutim naglasiti da ti zahtjevi često proturječe jedan drugome. Iz tog razloga za optimalan plan krcanja i slaganja koristi se upotreba metaheurističkog genetskog algoritma da bi se dobilo dovoljno dobro optimalno rješenje krcanja i slaganja tereta.

6.1. Primjena metaheurističkog genetskog algoritma i analiza rezultata

Nakon prikazanog inicijalnog plana, za dobivanje drugog optimalnog rješenja (plana) koristi se model plana krcanja i slaganja, koji je definiran u ovome radu, uz korištenje metaheurističkog genetskog algoritma. Nakon uspostave matematičkog modela izvršila se transformacija modela u programski kod. Nadalje, genetski algoritam temelji se na slučajno generiranom odabiru, odnosno definirana su slučajno dobivena rješenja na osnovi uspostavljenih pozicija sukladno ograničenjima referentnog broda. Naravno, dobivena rješenja se kroz proces genetskog algoritma optimiziraju s ciljem da najbolje rješenje bude konkurentno dobivenom inicijalnom planu od planera na terminalu.

Na početku procesa genetskog algoritma potrebno je definirati kromosom odnosno potencijalno rješenje koje će zadovoljiti problem optimizacije. Na slici 16 vidljiv je kromosom u procesu genetskog algoritma za potrebe optimizacije koji se sastoji od 184 gena.



Slika 16. Kromosom u procesu GA za potrebu optimizacije
Izvor: Autor

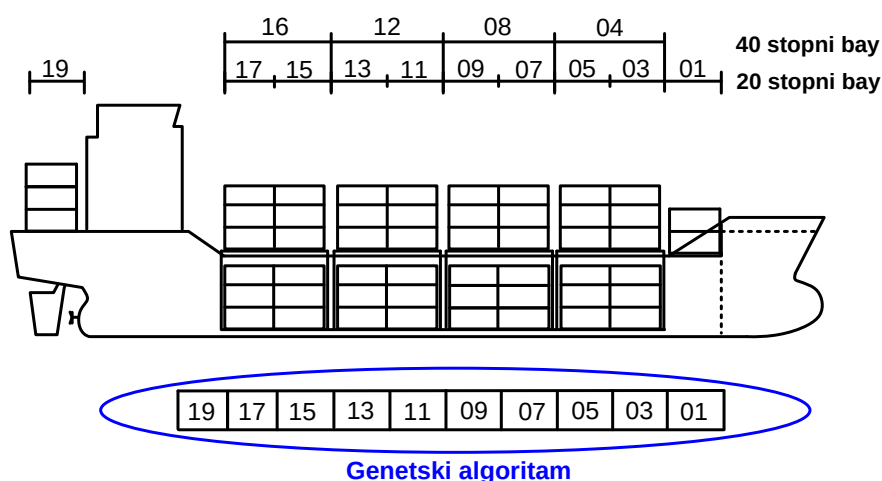
Prva četiri gena (vrijednosti) u kromosomu odnose se na početne *bay*eve za ukrcaj kontejnera s obzirom na luku u koju se prevoze. Prvi gen definiran je kao početni bay za luku Rijeka, drugi gen kao početni bay za luku Kopar, treći gen kao početni bay za luku Venecija te četvrti gen kao početni bay za preostale dvije luke (Ancona, Pirej) u kontejnerskom linijskom

servisu. Nakon prva četiri gena za pojedine luke slijedi 180 gena koji se odnose na raspored slaganja pojedinih kontejnera na brodu. U ovome radu korišten je primjer za 60 kontejnera. Dakle, svaki kontejner dobiva tri gena ($3 \cdot 60 = 180$) koja predstavljaju poziciju dobivenu pomoću uređene trojke (*bay*, *row*, *tier*).

Slika 16 ujedno prikazuje primjer izgleda kromosoma s genima gdje je vidljivo da se slučajnim odabirom *bay* 07 dodijelio luci Rijeka, *bay* 03 luci Kopar, *bay* 15 luci Venecija, te *bay* 11 ostalim lukama u linijskom servisu. U istome primjeru pozicija prvog kontejnera definirana je u genima 5, 6, 7, odnosno time se zauzela pozicija na brodu s *bayom* 03, *rowom* 01 i *tierom* 01. Prilikom krcanja 40-stopnih kontejnera uzimaju se u obzir početni *bayevi* za iskrcaj (3, 7, 11, 15) te početni *bayevi* uvećani za dva (5, 9, 13, 17) da bi se dobio klaster *bayeva*. Dakle, za svaki kontejner potrebno je slučajno generirati poziciju kako bi kromosom (rješenje) bio definiran u potpunosti. Međutim, prilikom procesa generiranja mogu se dogoditi pogreške odnosno neprihvatljiva rješenja. U nastavku je prikazan programski kod u genetskom algoritmu s postavljenim kromosomom od 184 gena u procesu genetskog algoritma za potrebu optimizacije.

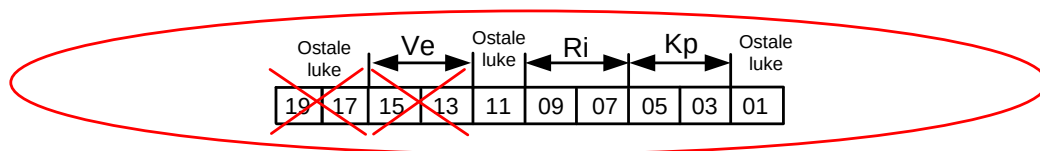
```
Gene[] sampleGenes = new Gene[kontejneri.size() * 3 + 4]; //184
for (int i = 0; i < (kontejneri.size() * 3 + 4); i++) {
    sampleGenes[i] = new IntegerGene(conf, 0, 20);
}
```

Na sljedećoj slici prikazan je referentni brod kao i sve moguće pozicije za krcanje i slaganje kontejnera.

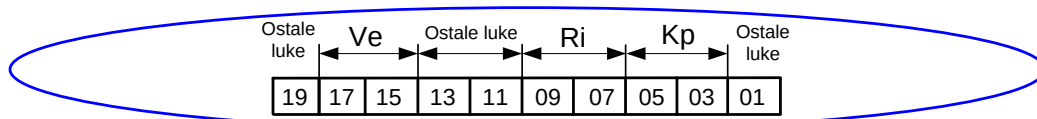


Slika 17. Uzdužni presjek referentnog broda s *bayevima* u GA
Izvor: Autor

U programskom kodu genetskog algoritma pozicije kontejnera definirane su neparnim brojevima u intervalu [1,19] koje predstavljaju neparne *bayeve* odnosno 20-stopne kontejnere (vidi sliku 17). Referentni kontejnerski brod sastoji se od 10 neparnih *bayeva*. *Bay* 01 i *bay* 19 namijenjeni su za ukrcaj 20-stopnih kontejnera, stoga se dobivaju četiri moguće pozicije, odnosno četiri parna *baya* (klaster *baya*) za krcanje 40-stopnih kontejnera (*bay* 04, *bay* 08, *bay* 12 i *bay* 16). Kao što je ranije objašnjeno, u programskom kodu postavio se dodatni kriterij optimizacije za luke unutar regionalnog lučkog sustava stoga su tri od četiri moguća parna *baya* predviđeni za iskrcajne luke Rijeka, Kopar, Venecija, dok se četvrti parni *bay* koristi za četvrtu i petu luku zajedno. Za razliku od inicijalnog rješenja, u ovom primjeru parni *bayevi* izabrani su *slučajnim* odabirom za iskrcajne luke. Prilikom dobivanja rješenja slučajnim odabirom potrebno je voditi računa je li se dobilo prihvatljivo ili neprihvatljivo rješenje prilikom odabira *baya* u kodu genetskog algoritma. Na slici 18 prikazano je prihvatljivo i neprihvatljivo rješenje.



Neprihvatljiv primjer rješenja slučajnog odabira *baya* u GA



Prihvatljiv primjer rješenja slučajnog odabira *baya* u GA

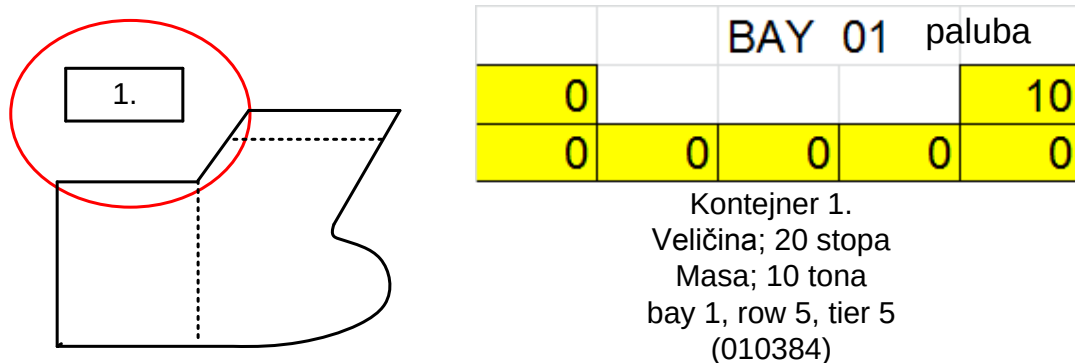
Slika 18. Prihvatljiv i neprihvatljiv izbor *baya* u GA
Izvor: Autor

Neprihvatljiv primjer rješenja dobiven slučajnim odabirom na slici 18 temelji se na grupaciji pogrešnih *bayeva* u određeni klaster. Ukoliko se za primjer grupiraju *bay* 17 i *bay* 19, neće biti moguće ukrcaj 40-stopni kontejner za luke 4 i 5 u kontejnerskom linijskom servisu jer se izabrani *bayevi* nalaze ispred i iza nadgrađa broda. Pozicije *bay* 15 i *bay* 13 također se ne mogu iskoristiti za ukrcaj 40-stopnih kontejnera jer se između navedenih *bayeva* nalazi prolaz (engl. *Cross-bay*). Prihvatljivo rješenje u kodu genetskog algoritma dobilo se metodom slučajnog odabira četiri *baya* 03, 07, 11 ili 15 za svih pet luka u linijskom servisu. Na osnovi tih *bayeva* formirali su se klasteri dodajući sljedeći neparan broj.

Stoga, svaka od iskrcajnih luka prilikom slučajnog odabira rješenja može dobiti jedan od četiri klastera *bayeva* (*bay* 03 - *bay* 05), (*bay* 07 - *bay* 09), (*bay* 11 - *bay* 13) ili (*bay* 15, *bay* 17). Na dijelu slike 18 koji se odnosi na prihvatljiv primjer rješenja vidljivi su klasteri *bayeva* sa slučajno dodijeljenim iskrcajnim lukama. Naravno, svaki od četiri prihvatljiva klastera *baya* slučajno se dodjeljuju pojedinim lukama za koje treba ukrcati teret. U nastavku je prikazan programski kod genetskog algoritma za dobivanje slučajno odabranih *bayeva* za krcanje i slaganje kontejnera.

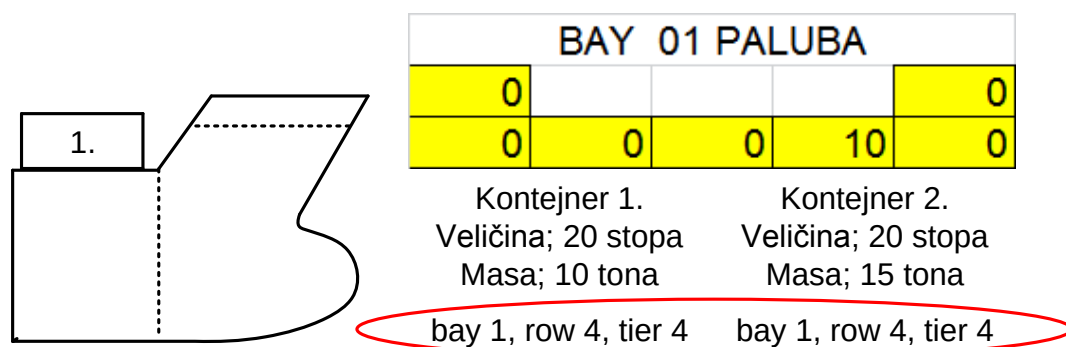
```
HighQualityRandom generator = new HighQualityRandom();
//nadj i slucajni bay za rijeku
boolean nasaoIndeks = false;
while (!nasaoIndeks) {
    int indeks = generator.nextInt(9);
    if (indeks < 2 || indeks > 8 || indeks == 7 || indeks == 3 || indeks == 5) {
    } else {
        rijekaIndeks = indeks*2-1;
        nasaoIndeks = true;
    }
}
//nadj i slucajni bay za kopar
nasaoIndeks = false;
while (!nasaoIndeks) {
    int indeks = generator.nextInt(9);
    if (indeks < 2 || indeks > 8 || indeks == 7 || indeks == 3 || indeks == 5) {
    } else {
        if ((indeks*2-1) != rijekaIndeks) {
            koparIndeks = indeks*2-1;
            nasaoIndeks = true;
        }
    }
}
//nadj i slucajni bay za veneciju
nasaoIndeks = false;
while (!nasaoIndeks) {
    int indeks = generator.nextInt(9);
    if (indeks < 2 || indeks > 8 || indeks == 7 || indeks == 3 || indeks == 5) {
    } else {
        if ((indeks*2-1) != rijekaIndeks && indeks != koparIndeks) {
            venecijaIndeks = indeks*2-1;
            nasaoIndeks = true;
        }
    }
}
nasaoIndeks = false;
while (!nasaoIndeks) {
    int indeks = generator.nextInt(9);
    if (indeks < 2 || indeks > 8 || indeks == 7 || indeks == 3 || indeks == 5) {
    } else {
        if ((indeks*2-1) != rijekaIndeks && indeks != koparIndeks && indeks !=
            venecijaIndeks) {
            drugiIndeks = indeks*2-1;
            nasaoIndeks = true;
        }
    }
}
```


U ovome radu prikazat će se nekoliko primjera neprihvatljivog rješenja (kromosoma) prilikom slučajnog generiranja rješenja pojedinog gena trenutnog rješenja. Na slici 19 vidljivo je neprihvatljivo rješenje prilikom slučajnog generiranja pozicije pojedinog kontejnera u genetskom algoritmu.



Slika 19. Neprihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja pozicije pojedinom kontejneru
Izvor: Autor

Prilikom slučajno odabranog rješenja za 20-stopni kontejner mase 10 tona, dodijelila se uređena pozicija (bay 1, row 5, tier 5). Analizirajući rješenje prilikom validacije uočila se nepravilnost pozicije kontejnera koji je postavljen iznad pozicije koja nema ukrcan kontejner. Pojedina neprihvatljiva rješenja nisu moguća u pomorskoj praksi prilikom stvaranja inicijalnog plana krcanja i slaganja od strane planera na terminalu. Međutim, za dodjeljivanje pozicija u procesu genetskog algoritma potrebno je voditi računa o pravilno generiranoj poziciji jer pozicija koja je dobivena slučajnim generiranjem može biti pogrešna. Ukoliko dođe do neprihvatljivog rješenja, potrebno je generirati sljedeće rješenje koje će biti prihvatljivo. Na slici 20 vidljivo je neprihvatljivo rješenje prilikom slučajnog generiranja pozicija dvaju kontejnera u genetskom algoritmu.

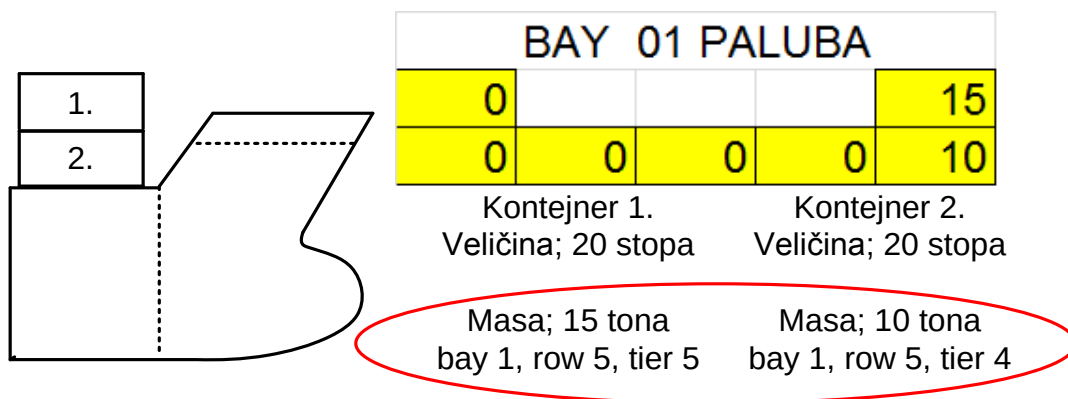


Slika 20. Neprihvatljivo rješenje prilikom slučajnog generiranja pozicija dvaju kontejnera
Izvor: Autor

Nakon izvršene validacije trenutnog rješenja, otkrivena je nepravilnost jer dva kontejnera pokušavaju zauzeti istu poziciju. U formulaciji koda genetskog algoritma postavilo se ograničenje iz matematičkog modela (5.11), (5.12) što znači da svaki 20-stopni kontejner može biti složen na jednu određenu poziciju na brodu i da svaka pozicija može imati samo jedan ukrcani kontejner. Također, 40-stopni mora biti složen na dvjema istovjetnim pozicijama na dvama susjednim *bayevima* (parni *bay*) tako da ni u jednoj od tih pozicija ne može već biti definirano ukrcavanje nekog kontejnera. Ukoliko dođe do preklapanja pozicija potrebno je ponoviti generiranje rješenja slučajnim odabirom. U nastavku je prikazan programski kod genetskog algoritma koji osigurava da ne bi došlo do preklapanja dvaju kontejnera koji pokušavaju zauzeti istu poziciju.

```
boolean zauzeto = false;
//pitaaj da li je 40stopni ili 20 stopni pa onda ispitaaj 2 ili 4 pozicije
if (kontejner1.getSize() == 40) {
    int zauzetaPozicija1 = zauzetePozicije[(bay - 1) * 6 + (6 - tier)][row - 1];
    int zauzetaPozicija2 = zauzetePozicije[(bay) * 6 + (6 - tier)][row - 1];
    if (zauzetaPozicija1 != 0 || zauzetaPozicija2 != 0) {
        zauzeto = true;
    }
} else {
    int zauzetaPozicija1 = zauzetePozicije[(bay - 1) * 6 + (6 - tier)][row - 1];
    if (zauzetaPozicija1 != 0) {
        zauzeto = true;
    }
}
}
```

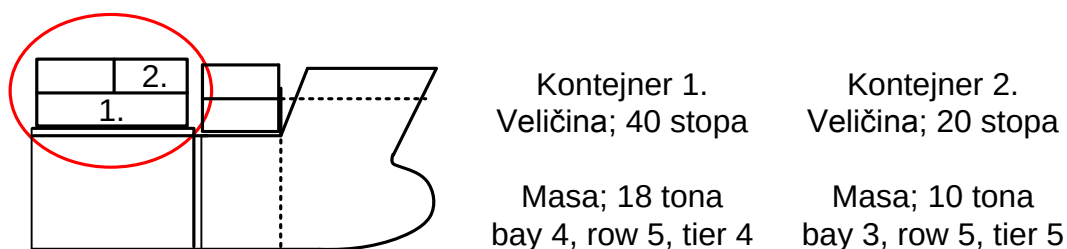
Na slici 21 vidljivo je neprihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja pozicija s obzirom na masu kontejnera u genetskom algoritmu.



Slika 21. Neprihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja pozicija kontejnera različite mase
Izvor: Autor

Nakon izvršene validacije trenutnog rješenja, uočena je nepravilnost jer je narušen sustav piramidalnog slaganja zbog opterećenja. U piramidalnom slaganju potrebno je teže kontejnere slagati ispod lakših kao što je ograničeno u izrazu (5.22) matematičkog modela. Ukoliko dođe do neravnomjernog rasporeda kontejnera po masama potrebno je ponoviti slučajna generiranja.

Na slici 22 vidljivo je neprihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja pozicija za kontejnere različitih veličina u procesu genetskog algoritma.

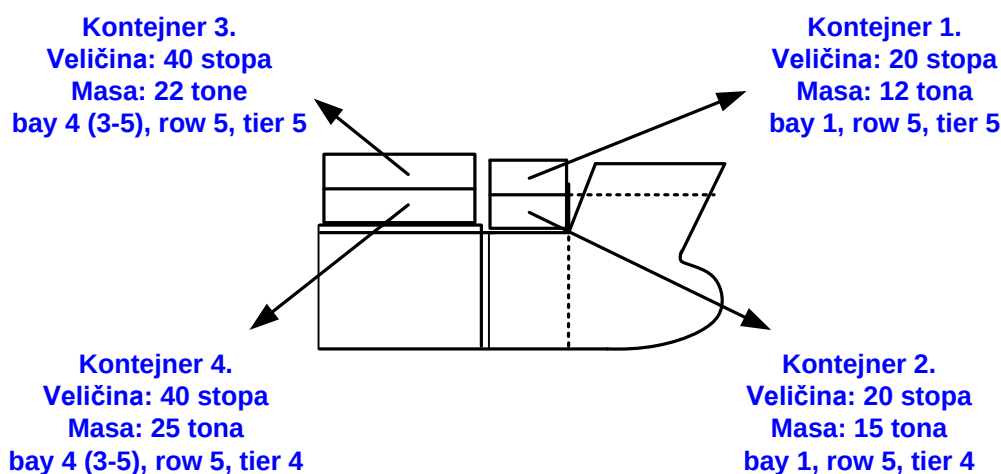


Slika 22. Neprihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja pozicija kontejnerima različitih veličina
Izvor: Autor

Jedno od važnijih ograničenja u programskom kodu je sprječavanje ukrcaja 20-stopnih kontejnera iznad 40-stopnog kontejnera. Analizirajući dobiveno rješenje vidljiva je nelogičnost jer 20-stopne kontejnere na taj način nije moguće adekvatno učvrstiti. Stoga se kontejner od 20 stopa mora složiti iznad 20-stopnog kontejnera, te kontejner od 40 stopa iznad 40-stopnog kontejnera kako bi slaganje bilo u skladu s normama sukladno uspostavljenim matematičkim izrazima (5.18), (5.19) i (5.20) u modelu. Ukoliko dođe do neravnomjernog rasporeda kontejnera sukladno veličini potrebno je ponoviti slučajna generiranja dok se ne dobije adekvatno rješenje. U nastavku na osnovi matematičke uspostave modela prikazan je dio programskog koda kojim se sprječava ukrcaj 20-stopnog kontejnera iznad 40-stopnog kontejnera i obrnuto.

```
if (velicinaKontRowTrenutni != 0 && velicinaKontRowTrenutni != kontejner1.getSize())
{
    dobro = false;
    System.out.println("bay za " + velicinaKontRowTrenutni + ", a kontejner za " +
        kontejner1.getSize());
}
```

Na slici 23 vidljivo je prihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja (slučajnog generiranja) pozicija kontejnera različitih masa i veličina dobiveno slučajnim generiranjem.



Slika 23. Prihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja pozicija kontejnera različitih masa i veličina
Izvor: Autor

Nakon niza prikazanih prihvatljivih i neprihvatljivih rješenja u procesu genetskog algoritma koja utječu na poziciju kontejnera prilikom krcanja i slaganja prikazat će se niz prihvatljivih i neprihvatljivih rješenja s obzirom na opasni i lakopokvarljiv teret. Na slici 24 prikazana su tri primjera neprihvatljivog rješenja rasporeda kontejnera s opasnim teretom u dobivenom procesu genetskog algoritma.

BAY 03 PALUBA											
6	86									86	
5	84			10	12					84	
4	82		5	12	12	15	5			82	

BAY 03 PALUBA											
6	86									86	
5	84			10	12					84	
4	82		12	12	12	15	5			82	

BAY 03 PALUBA											
6	86									86	
5	84			10	12					84	
4	82		12	12	12	15	5			82	

BAY 03 SKLADIŠTE											
3	08			10	10					08	
2	06	13	12	14	14	12	13			06	
1	02	15	15	15	15	15	15			02	

BAY 03 SKLADIŠTE											
3	08			10	10					08	
2	06	13	12	14	14	12	13			06	
1	02	15	15	15	15	15	15			02	

BAY 03 SKLADIŠTE											
3	08			10	10					08	
2	06	13	12	14	14	12	13			06	
1	02	15	15	15	15	15	15			02	

Slika 24. Neprihvatljivi primjeri rasporeda pozicija opasnog tereta u GA
Izvor: Autor

U kodu genetskog algoritma prilikom slučajnog rasporeda ograničilo se krcanje kontejnera s opasnim teretom samo na palubu tako da su postavljene moguće pozicije 4, 5 i 6 za krcanje vertikalno po visini.

Ukoliko nije poštivana segregacija sukladno IMDG Codeu te ukoliko je kontejner s opasnim teretom na nedovoljnoj udaljenosti od kontejnera s lakopokvarljivim teretom rješenje će također biti neprihvatljivo.

Ukoliko su slučajno generirana rješenja neprihvatljiva, novim slučajnim generiranjem dobit će se rješenje koje je prihvatljivo u funkciji zadovoljavajućeg plana krcanja i slaganja tereta.

BAY 09 PALUBA							BAY 05 PALUBA					
		9	12	10				2	10	10	8	2
		12	12	11				8	10	10	9	2
		15	12	15			5	12	12	12	15	5

Slika 25. Prihvatljivi primjer rasporeda pozicija opasnih tereta u GA
Izvor: Autor

Na slici 25 prikazan je primjer rasporeda kontejnera s opasnim teretom dobiven postavljenim ograničenjima u programskom kodu genetskog algoritma. U nastavku, prikazan je dio programskog koda kojim se poštuje segregacija s obzirom na dva kontejnera koji prevoze opasni teret.

```

if (kontejner1.getDangerous() == 1) {
    boolean dangerousBool = false;
    int rowPlus1 = row + 1;
    int rowMinus1 = row - 1;
    int tierPlus1 = tier + 1;
    int tierMinus1 = tier - 1;
    if (tierMinus1 != 0 && tierMinus1 != 3) {
        if (zauzetePozicijeDangerous[(bay - 1) * 6 + (6 - tierMinus1)][row - 1]
            == 1) {
            dangerousBool = true;
        }
        if (rowMinus1 != 0) {
            if (zauzetePozicijeDangerous[(bay - 1) * 6 + (6 - tierMinus1)][rowMinus1 - 1] == 1) {
                dangerousBool = true;
            }
        }
        if (rowPlus1 != 8) {
            if (zauzetePozicijeDangerous[(bay - 1) * 6 + (6 - tierMinus1)][rowPlus1 - 1] == 1) {
                dangerousBool = true;
            }
        }
    }
}

```

Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima, osim krcanja i slaganja kontejnera s opasnim teretom, potrebno je voditi računa o položaju priključnica za brodsku naponsku mrežu

na brodu. Rashladni kontejneri stoga su ukrcani isključivo na palubi broda na maksimalno drugu poziciju vertikalno po visini na palubi.

Drugim riječima u genetskom algoritmu postavlja se ograničenje: moguće pozicije za ukrcaj rashladnog kontejnera su pozicije 4 i 5 vertikalno po visini na palubi. U pomorskoj praksi ove pozicije označene su oznakama 80, 82 i 84. Prilikom slučajno odabranog rješenja rashladni kontejneri složeni su međusobno jedan pored drugog jer ne postoji ograničavajući čimbenik.

BAY 04 PALUBA						
	2	10	10	8	2	
	8	10	10	9	2	
5	12	18	20	15	11	

Slika 26. Prihvatljivi primjer rasporeda pozicija rashladnih kontejnera u GA
Izvor: Autor

Na slici 26 prikazan je prihvatljivi primjer rasporeda pozicija rashladnih kontejnera u genetskom algoritmu. Kod definiranja matematičkog modela i transformacije u programski kod, lakopokvarljiv teret postavlja se u kontejner duljine 40 stopa, stoga je na prethodnoj slici vidljiv parni bay 04 koji zauzima pozicije bay 03 i bay 05. Nadalje, prikazan je dio programskog koda u genetskom algoritmu koji ograničava krcanje rashladnog kontejnera u skladu s postavljenim ograničenjima.

```

if (kontejner1.getReef() == 0) {
    ...
    //ako kontejner nije rashladni
    ...
} else {
    tier = generator2.nextInt(2)+4;
}

```

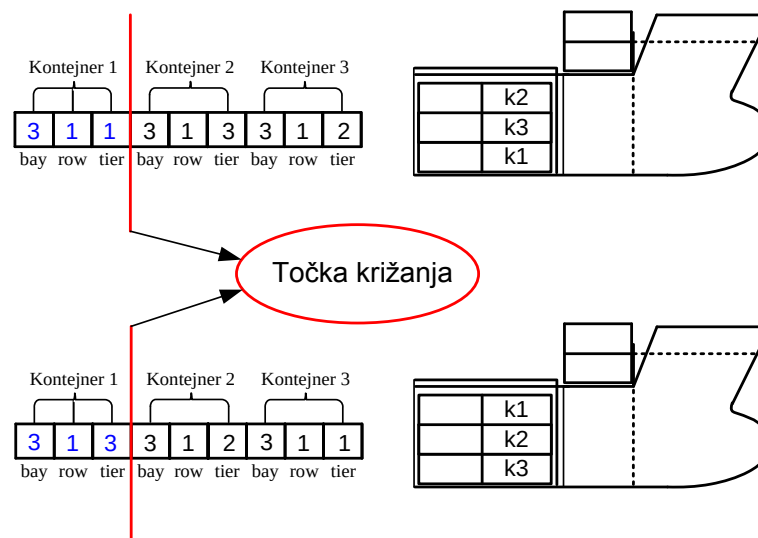
Nakon niza prikazanih prihvatljivih i neprihvatljivih rješenja koja utječu na poziciju kontejnera prilikom krcanja i slaganja potrebno je naglasiti da se u procesu genetskog algoritma ponavlja slučajno generiranje podataka, dok dobiveno potencijalno rješenje ne zadovolji sva postavljena ograničenja. U genetskom algoritmu primjenjuju se genetski operatori križanja i mutacija. U funkciji dobivanja optimalnog rasporeda tereta s prihvatljivim rješenjima primijenio se genetski operator križanja koji se temelji na križanju gena dvaju zadanih kromosoma (rješenja). Nadalje, prikazan je programski kod u genetskom algoritmu koji izvršava proces križanja za dva zadana kromosoma u određenoj točki križanja.

```

Gene[] firstGenes;
Gene[] secondGenes;
firstGenes = firstMate.getGenes();
secondGenes = secondMate.getGenes();
int tockakrizanja = (int) (Math.abs(generator2.nextInt(59))) + 1;
int[] gen1 = new int[184];
int[] gen1krizanje = new int[184];
for (int i = 0; i < 184; i++) {
    gen1[i] = (Integer) firstGenes[i].getAllele();
}
int[] gen2 = new int[184];
int[] gen2krizanje = new int[184];
for (int i = 0; i < 184; i++) {
    gen2[i] = (Integer) secondGenes[i].getAllele();
}
for (int i = 4; i < tockakrizanja * 3 + 4; i++) {
    gen1krizanje[i] = gen1[i];
    gen2krizanje[i] = gen2[i];
}
for (int i = tockakrizanja * 3 + 4; i < 184; i++) {
    gen1krizanje[i] = gen2[i];
    gen2krizanje[i] = gen1[i];
}

```

Križanje kao genetski operator bazira se na jednoj ili više točki križanja koje se dobivaju slučajnim odabirom. U ovome radu odabrano je križanje s jednom točkom križanja (vidi sliku 27).

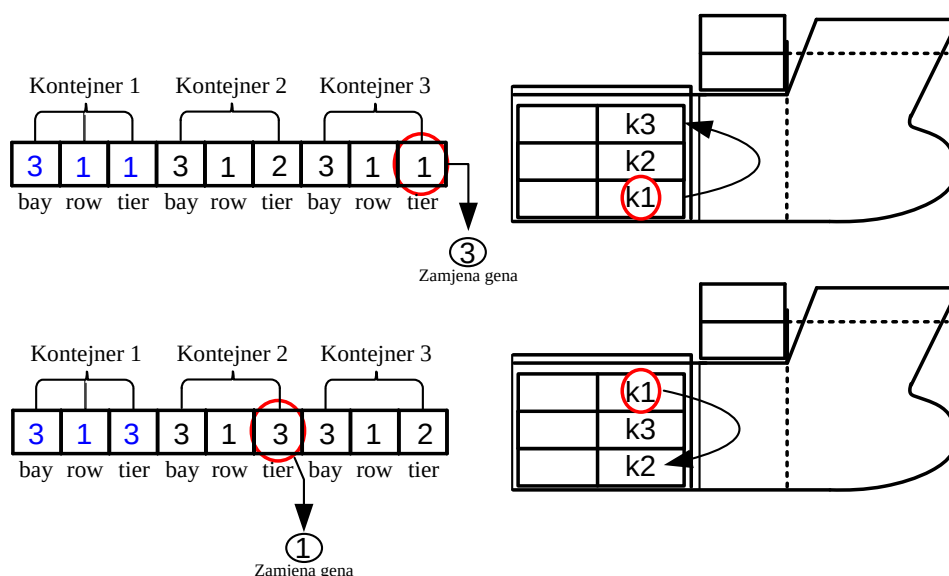


Slika 27. Križanje dvaju kromosoma (rješenja) plana krcanja i slaganja tereta
Izvor: Autor

Kromosomi koji se križaju sastoje se od definirane pozicije kontejnera na brodu (*bay*, *row*, *tier*). Na slici 27 vidljiv je primjer križanja pozicije kontejnera unutar jednog *baya* u skladištu. Prilikom generiranja pojedinog kromosoma prije križanja vidljiva je nepromijenjena

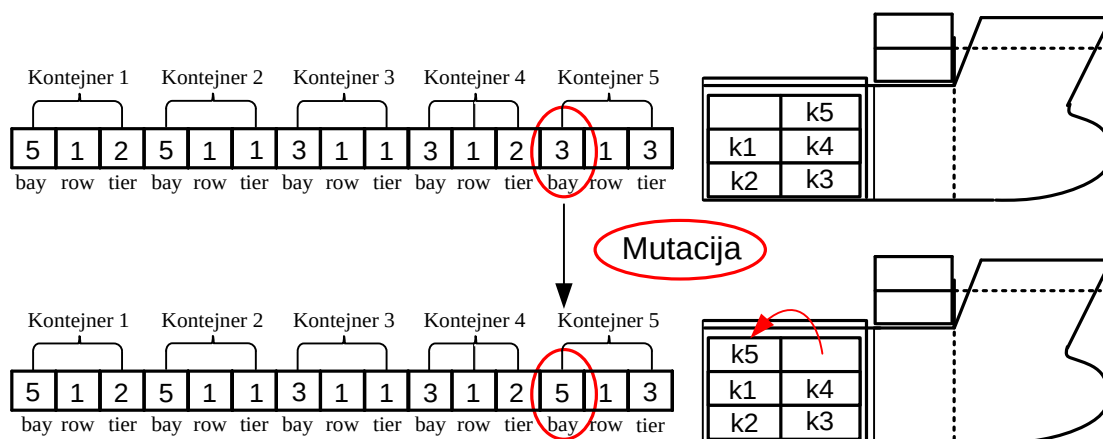
vrijednost *baya* i *rowa*, dok vrijednost *tiera* predstavlja gen koji se mijenja. Nakon križanja prikazanih kromosoma u jednoj točki prekida dobiju se dva nova kromosoma (rješenja) koja predstavljaju „potomstvo križanih roditelja“.

Dobivene vrijednosti novih kromosoma križanih roditelja prikazane su na slici 28. Prva tri gena s lijeve strane od točke križanja ostala su nepromijenjena međutim desna strana od drugog kromosoma pridodala se prvome kromosomu i obrnuto. Prilikom dobivanja novih rješenja uočene su pogreške prilikom križanja jer se zauzela ista pozicija koja je u kromosomu već definirana, odnosno na toj poziciji već postoji ukrcan kontejner.



Slika 28. Dobiveni kromosomi (rješenja) nakon križanja plana krcanja i slaganja tereta
Izvor: Autor

Genetski operator križanja u tom slučaju zamjenjuje ponavljajuće gene u kromosomu s novim rješenjem čime se definira nova pozicija kontejnera. Analizirajući sliku 27 i 28 prikazane su četiri moguće varijante razmještaja triju ukrcanih kontejnera na *bayu* 3 u skladištu: prva dva razmještaja kontejnera (roditelji) u *bayu* dobivena su u prethodnom dijelu procesa dok su druga dva razmještaja kontejnera (djeca) u istom *bayu* dobivena na osnovi križanja prethodnih rješenja kao nastavak procesa.

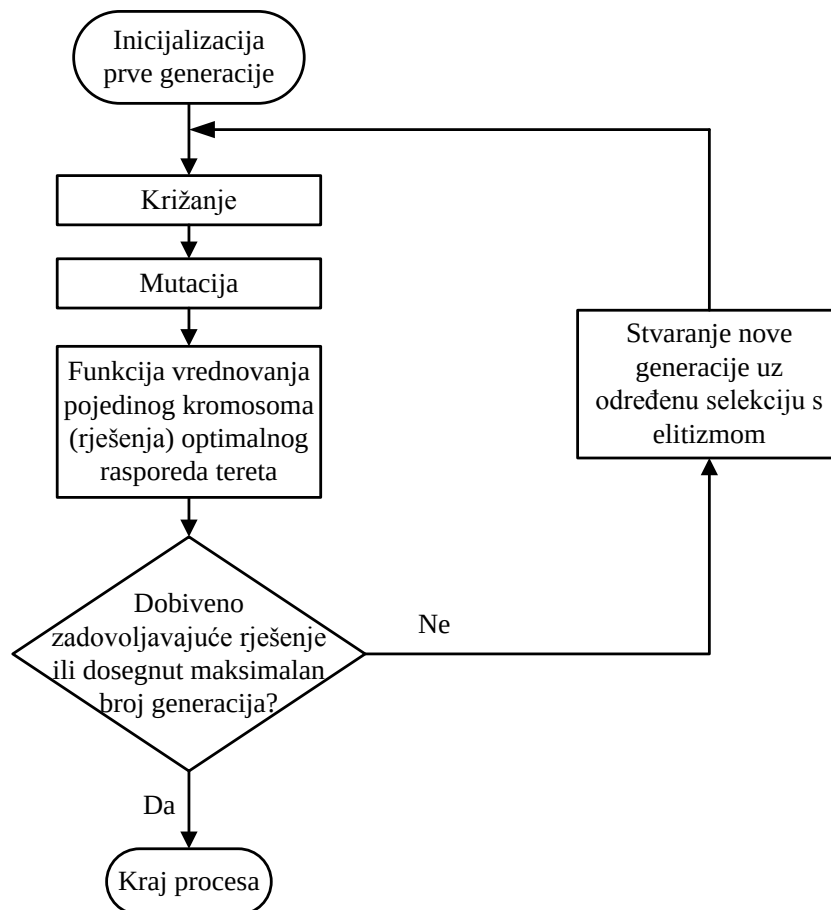


Slika 29. Mutacija kromosoma (rješenja) plana krcanja i slaganja tereta
Izvor: Autor

Na slici 29 prikazana je jednostavna mutacija kao sljedeći genetski operator. Jednostavna mutacija temelji se na slučajnoj promjeni jednog gena u određenom kromosomu. S jednom izmjenom gena neće se dogoditi velike promjene u dobivenom rješenju, međutim jednostavnom mutacijom mogu se dobiti rješenja od velike značajnosti za daljnji proces genetskog algoritma. Za optimizaciju krcanja i slaganja tereta koristila se jednostavna mutacija. Nadalje u kodu genetskog algoritma prikazana je mutacija.

```
HighQualityRandom generator = new HighQualityRandom();
gen = generator.nextInt(6)+1;
```

Nakon izvršenih operacija križanja i mutacija uvodi se proces izdvajanja najsposobnijih jedinki, tj. izdvajanje najboljih rješenja unutar svake generacije koje se naziva selekcija. Selekcija određuje koji će kromosomi iz prethodne generacije biti dio sljedeće generacije genetskog algoritma. Odabir se vrši na temelju vrijednosti postavljene objektne funkcije cilja svakog kromosoma. Funkcija cilja detaljno je opisana u ovome radu u potpoglavlju (5.3). Genetski algoritam uz selekciju ima ugrađen elitizam, odnosno čuvanje najboljeg rješenja u svakoj generaciji. Dakle, genetski algoritam koji koristi jednostavnu selekciju naziva se generacijski genetski algoritam.



Slika 30. Algoritam stvaranja nove generacije u procesu optimizacije rasporeda tereta
Izvor: Autor

Iz algoritma prikazanog na slici 30 vidljivo je da jedan generacijski ciklus uključuje, križanje, mutaciju i selekciju. Nakon obavljanja generacijskog ciklusa, potrebno je evaluirati (vrednovati) populaciju pomoću objektne funkcije cilja. Generacijski ciklus se ponavlja sve dok nije zadovoljen postavljen kriterij optimizacije krcanja i slaganja tereta. Nadalje, prikazan je dio programskog koda kojim je postavljeno ponavljanje određenog broja generacijskog ciklusa, proces evolucija i završetak cjelokupnog procesa genetskog algoritma.

```

for (int i = 0; i < MAX_ALLOWED_EVOLUTIONS; i++) {
    population.evolve();
    bestSolutionSoFar = population.getFittestChromosome();
    Gene[] genes = bestSolutionSoFar.getGenes();
    double minZ = 100000 - (double) bestSolutionSoFar.getFitnessValue();
    if (i == (MAX_ALLOWED_EVOLUTIONS - 1) || minZ < minZadovoljen) {
        i=6;
        ...
        //ispis rješenja
        ...
    }
}

```

U ovom radu, 2500 slučajno generiranih rješenja postavilo se za inicijalizaciju prve generacije kromosoma (rješenja). Prilikom genetskog operatora križanja dobilo se 5000 novih rješenja. Nakon križanja izvršila se mutacija koja slučajnim generiranjem mijenja vrijednost jednog gena u kromosomu. Dakle, od ukupno 7500 rješenja izvršila se jednostavna selekcija s elitizmom od kojih se izdvojilo 75 % najboljih rješenja unutar generacije. S obzirom da nije dobiveno zadovoljavajuće optimizacijsko rješenje na temelju objektne funkcije cilja, započeo je novi ciklus. Nadalje, nova generacija sastoji se od 75 % najboljih rješenja prethodne generacije te 25 % novih rješenja dobivenih slučajnim odabirom. Konfiguracija procesa genetskog algoritma za problem krcanja i slaganja tereta prikazana je slijedećim programskim kodom:

```
Configuration conf = new MyConfiguration(kontejneri);
conf.setPreservFittestIndividual(true);
conf.setAlwaysCaculateFitness(true);
conf.setKeepPopulationSizeConstant(true);
conf.setPopulationSize(2500);
BestChromosomesSelector bestChromsSelector = new BestChromosomesSelector(this,
0.75d);
addNaturalSelector(bestChromsSelector, true);
setSelectFromPrevGen(0.75d);
```

Nakon toga ponovno se ponavlja postupak sukladno algoritmu na slici 30. U ovome doktorskom radu zadovoljavajuće optimizacijsko rješenje dobiveno je nakon šest generacijskih ciklusa. U genetskom algoritmu ključ selekcije je objektna funkcija cilja (dobrote), koja na odgovarajući način predstavlja optimizacijski problem koji se rješava. Vrijednosti α_1 , α_2 i α_3 predstavljaju važnost pojedinog dijela objektne funkcije Q ; gdje α_1 predstavlja koeficijent za početnu poprečnu metacentarsku visinu, α_2 koeficijent za trim broda, te α_3 koeficijent za kut nagiba broda. Vrijednost koeficijenata direktno utječu na konačnu vrijednost funkcije dobrote, a time ujedno i na plan krcanja i slaganja tereta. Nadalje, prikazan je zapis objektne funkcije dobrote u programskom kodu genetskog algoritma.

```
for (ContainerShip kontejner1 : kontejneri1) {
    int rowCont = kontejner1.getRow();
    int tierCont = kontejner1.getTier();
    fitness += rowTier[rowCont - 1][tierCont - 1];
}
fitness += Math.abs((mgCor - m0gMin)) * alpha1 + Math.abs((trim - trimFuel)) *
alpha2 + Math.abs(kutNagiba) * alpha3;
```

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati optimizacijske funkcije od dobivenih planova s postavljenim parametrima na osnovi uspostavljenog modela krcanja i slaganja.

Tablica 21. Rezultati modela optimizacije plana krcanja i slaganja kontejnera

Br.	Koeficijenti	Početna poprečna metacentarska visina [m]	Trim broda [m]	Kut nagiba broda [°]	Vrijeme iskrcaja [sek]
1.	$\alpha_1 = 3.000$ $\alpha_2 = 3.000$ $\alpha_3 = 800$	2,8711	-0,4872	0,0638	8.273,9
2.	$\alpha_1 = 3.000$ $\alpha_2 = 10.000$ $\alpha_3 = 800$	2,8337	-0,4790	0,1722	8.286,0
3.	$\alpha_1 = 1.000$ $\alpha_2 = 2.000$ $\alpha_3 = 500$	2,6267	-0,4530	2,6267	8.230,4

Izvor: Autor

U nastavku rada vrijednosti koeficijenata su postavljene da svi promatrani parametri budu istog reda veličine u funkciji čime se dobilo optimalno rješenje. Prilikom postavljanja koeficijenata α_1 , α_2 i α_3 definirani su intervali s obzirom na dobivene pojedine vrijednosti u objektnoj funkciji. Vrijednosti koeficijenta α_1 sukladno vrijednostima početne poprečne metacentarske visine prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 22. Vrijednosti koeficijenata α_1

Početna poprečna metacentarska visina	Koeficijent α_1
≥ 2.85 m	3.000
[2.8, 2.85]	2.500
[2.75, 2.79]	2.000
[2.7, 2.74]	1.500
< 2.7	1.000

Izvor: Autor

Ukoliko je vrijednost početno poprečne metacentarske visine veća od maksimalno dopuštene vrijednosti, vrijednost koeficijenta bit će najveća kako bi time povećali vrijednost objektno funkcije. S obzirom da je cilj minimizirati objektnu funkciju cilja, najmanji koeficijent α_1 bit će, ukoliko je metacentarska visina manja, od 2,7 metara. Nadalje, sukladno tablici 22 postavljene su vrijednosti koeficijenata α_1 u programskom kodu.

```
double alpha1 = 1000;
    if (mgCor >= 2.85) {
        alpha1 = 3000;
    } else if (mgCor >= 2.80) {
        alpha1 = 2500;
    } else if (mgCor >= 2.75) {
        alpha1 = 2000;
    } else if (mgCor >= 2.70) {
        alpha1 = 1500;
    }
}
```

Vrijednosti koeficijenta α_2 sukladno vrijednostima trima broda prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 23. Vrijednosti koeficijenata α_2

Trim broda	Koeficijent α_2
$(-\infty, -0.6) \cup (-0.4, +\infty)$	20.000
$[-0.6, -0.4]$	10.000

Izvor: Autor

Ukoliko je vrijednost trima broda znatno veća od optimalnog trima u funkciji manje potrošnje goriva, vrijednost koeficijenta bit će najveća kako bi time povećali vrijednost objektna funkcije. S obzirom da je cilj minimizirati objektnu funkciju cilja te postići željeni optimalan pramčani trim od 0,5 metara, najmanji koeficijent α_2 bit će ukoliko je trim broda između pramčanog trima 0,4 i 0,6 metara.

Nadalje, sukladno tablici 23 postavljene su vrijednosti koeficijenata α_2 u programskom kodu.

```
alpha2 = 10000;
if (Math.abs(trim - trimFuel) > 0.1) { //trimFuel = -0.5
    alpha2 = 20000;
}
```

Vrijednosti koeficijenta α_3 sukladno vrijednostima kutu nagiba broda prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 24. Vrijednosti koeficijenata α_3

Kut nagiba broda	Koeficijent α_3
$(-\infty, -3^\circ) \cup (+3^\circ, +\infty)$	4.000
$(-2^\circ, -3^\circ] \cup (+2^\circ, +3^\circ]$	2.000
$[-2^\circ, +2^\circ]$	800

Izvor: Autor

Ukoliko je vrijednost kut nagiba broda veća od 3° , vrijednost koeficijenta bit će najveća kako bi time povećali vrijednost objektne funkcije. S obzirom da je cilj minimizirati kut nagiba broda, najmanji koeficijent α_3 bit će ukoliko je kut nagiba broda manji od 2° na lijevu ili na desnu stranu. U tom slučaju za dovođenje broda u uspravan položaj koristit će se automatski protunagibni sustav (engl. *Anti-Heeling System*). Nadalje, sukladno tablici 24 postavljene su vrijednosti koeficijenata α_3 u programskom kodu.

```
double alpha3 = 800;
if (Math.abs(kutNagiba) > 3) {
    alpha3 = 4000;
} else if (Math.abs(kutNagiba) > 2) {
    alpha3 = 2000;
}
```

S obzirom na postavljeni matematički model te razvijen programski kod u funkciji skraćanja prekrcajnog procesa dobiven je najbolji optimalan plan krcanja i slaganja tereta sa slijedećim parametrima.

Tablica 25. Vrijeme prekrcajnog procesa i parametri sukladno postavljenom objektnom funkcijom cilja

Početna poprečna metacentarska visina	$\alpha_1 = 1.000$	2,6964519685550394 m
Trim broda	$\alpha_2 = 10.000$	-0,45182715785691363 m
Kut nagiba broda	$\alpha_3 = 800$	1,4286835771944195°
Objektna funkcija cilja (Q)	11445.127251741447	
Vrijeme iskrcaja	8124.0 sek (~2 sata 15 minuta)	

Izvor: Autor

Za dobivanje rješenja u cjelokupnom optimizacijskom procesu zahtijevalo se korištenje nekoliko softverskih alata⁴⁷;

- *Java* – programski jezik za transformaciju matematičkog modela u programski kod
- *NetBeans IDE 8.0.2.* – programski alat za programiranje
- *Microsoft Excel 2013* – za analizu dobivenih rezultata i grafički prikaz plana krcanja i slaganja tereta.

⁴⁷ Testiranje je obavljeno na stolnom računalu Intel® Celeron(R), CPU 2.6 GHz, 4GB RAM memorije

Optimalan plan krcanja i slaganja kontejnera dobiven je uspostavljenim modelom, a rješenja su prikazana u tablicama 26 i 27.

Tablica 26. Dobiveni optimalni raspored krcanja i slaganja kontejnera – prvi dio

Br.	Veličina kontejnera [stopa]	Masa kontejnera [tona]	Rashladni (Reefer) kontejneri	Opasan teret (DG)	Luka iskrcaja (POD)	bay	row	tier
1.	40	14	1	0	3	15	5	4
2.	40	14	1	0	3	15	2	4
3.	40	30	0	0	1	7	2	4
4.	40	30	0	0	1	7	2	5
5.	40	30	0	0	2	3	7	4
6.	40	30	0	0	2	3	6	4
7.	40	30	0	0	2	3	7	5
8.	40	30	0	0	2	3	5	4
9.	40	30	0	0	2	3	3	4
10.	40	30	0	0	2	3	5	5
11.	40	30	0	0	4	11	2	4
12.	40	30	0	0	4	11	2	5
13.	40	28	0	0	1	7	3	4
14.	40	28	0	0	1	7	6	4
15.	40	28	0	0	2	3	2	4
16.	40	28	0	0	2	3	3	1
17.	40	28	0	0	4	11	5	1
18.	40	28	0	0	4	11	3	1
19.	40	26	0	0	2	3	3	5
20.	40	26	0	0	2	3	2	5
21.	40	26	0	0	2	3	3	6
22.	40	26	0	0	2	3	4	4
23.	40	26	0	0	3	15	4	4
24.	40	26	0	0	3	15	7	4
25.	40	24	0	0	2	3	4	5
26.	40	24	0	0	2	3	6	5
27.	40	24	0	0	3	15	6	4
28.	40	24	0	0	3	15	6	5
29.	40	20	0	0	1	7	3	5
30.	40	20	0	0	1	7	6	5
31.	40	20	0	0	3	15	1	1
32.	40	20	0	0	3	15	5	1
33.	20	15	0	0	1	9	4	4
34.	20	15	0	0	2	5	6	1
35.	20	15	0	1	2	3	1	4
36.	20	12	0	0	1	9	5	1
37.	20	12	0	0	1	7	5	4
38.	20	12	0	0	2	3	1	5
39.	20	12	0	0	2	5	1	1
40.	20	12	0	0	2	5	2	1

Tablica 27. Dobiveni optimalni raspored krcanja i slaganja kontejnera – drugi dio

Br.	Veličina kontejnera [stopa]	Masa kontejnera [tona]	Rashladni (Reefer) kontejneri	Opasan teret (DG)	Luka iskrcaja (POD)	bay	row	tier
41.	20	12	0	0	2	3	1	2
42.	20	11	0	0	2	3	6	2
43.	20	10	0	0	4	1	3	1
44.	20	10	0	0	4	1	2	4
45.	20	10	0	0	4	1	3	4
46.	20	10	0	0	4	1	5	4
47.	20	10	0	1	4	1	1	4
48.	20	10	0	0	4	19	3	4
49.	20	10	0	0	4	1	4	4
50.	20	10	0	0	4	19	4	4
51.	20	10	0	0	1	7	7	4
52.	20	10	0	0	1	7	7	5
53.	20	10	0	0	1	7	5	1
54.	20	10	0	0	1	7	4	1
55.	20	10	0	0	2	3	6	3
56.	20	9	0	0	1	9	2	1
57.	20	9	0	0	2	3	1	6
58.	20	8	0	0	1	7	7	6
59.	20	5	0	0	1	7	1	1
60.	20	5	0	1	1	9	7	4

Izvor: Autor

Dobiveno rješenje temelji se na ulaznim podacima, odnosno reprezentativnom skupu od 60 kontejnera za ukrcaj te pripadajućim informacijama: veličina kontejnera, masa kontejnera, svojstvo tereta koji se prevozi, luka iskrcaja (vidi tablicu 16 i 17).

Na osnovi uspostavljenog programskog koda na matematičkoj osnovi u algoritmu slučajno su izabrani *bay* 7 i *bay* 9 za luku Rijeka, *bay* 3 i *bay* 5 za luku Kopar, *bay* 15 i *bay* 17 za luku Venecija te za ostale luke (Ancona i Pirej) zauzeo se *bay* 11, *bay* 13, *bay* 1 i *bay* 19. U prethodnim tablicama prikazano je rješenje optimalnog plana krcanja i slaganja gdje je svaki kontejner dodijeljen određenoj poziciji broda čime mu je dodijeljen *bay*, *row* i *tier*. Plan krcanja i slaganja zadovoljio je čimbenike koje uvjetuju razmještaju kontejnera u funkciji sigurnosti broda i tereta. Glavni parametri koji su regulirani objektom funkcijom cilja dobiveni su unutar zadanih kriterija sukladno tablici 25.

Dobiveni rezultati ujedno udovoljavaju zahtjevima brodara za realizaciju osnovnog principa racionalnog poslovanja na način da su zadovoljeni svi postavljeni kriterij optimizacije.

U dobivenom rješenju integrirano je vrijeme iskrcaja prema poziciji samog kontejnera na brodu. Sukladno tome, dobio se raspored kontejner u funkciji skraćanja prekrcajnog procesa. U konačnici prema tablici 25, vrijeme potrebno za iskrcaj kontejnera prema prvom primjeru iznosi 8.832 sekundi odnosno 147,2 minute dok vrijeme iskrcaja optimalnog plana dobivenog od postavljenog modela u ovome doktorskom radu iznosi 8.124 sekunde odnosno 135,4 minute. Na referentnom brodu od 368 TEU-a prilikom krcanja i slaganja 60 kontejnera vidljivo je skraćenje od 11,8 minuta. Ukoliko se model primjeni na veće brodove, primjerice kapaciteta od 18.000 TEU-a gdje se u jednoj iskrcajnoj luci iskrcava znatno više kontejnera, skraćenje prekrcajnog procesa može biti puno značajnije. Samim time zadovoljen je prvi uvjet racionalizacije poslovanja u funkciji smanjenja prekrcajnog procesa, a time i boravka broda u luci. Dobiveni plan od modela krcanja i slaganja zadovoljio je i dodatni kriterij optimizacije koji se odnosi za luke unutar regionalnog lučkog sustava. Stoga, brodarevo poslovanje može se prilagoditi novom plovidbenom redu u slučaju lučkog kašnjenja čime se u luci iskrcaja kompletno smanjilo repozicioniranje kontejnera u funkciji skraćanja prekrcajnog procesa, ali i troškova prekrcaja tereta. Dobiveni plan krcanja i slaganja tereta na osnovi postavljenog modela zadovoljio je i dodatni kriterij u funkciji smanjenja troškova putovanja na određenoj liniji dovođenjem broda na željeni trim gdje je dnevna potrošnja goriva najmanja.

Model plana krcanja i slaganja postigao je željeni optimalni trim u funkciji manje potrošnje pogonskog goriva. Osim što je važno da je uspostavljenim modelom riješen optimizacijski problem, zanimljivo je saznanje da se plan krcanja i slaganja ovim putem ostvario u vremenskom periodu od dva sata.

U sljedećem poglavlju prikazan je utjecaj optimizacije plana krcanja i slaganja kontejnera na ekonomske pokazatelje te su prikazane značajne uštede u brodarevom poslovanju.

6.2. Utjecaj optimizacije plana krcanja i slaganja na ekonomske pokazatelje

Optimizacijom plana krcanja i slaganja tereta postiglo se skraćanje ukupnog vremena boravka broda u luci te smanjenje ukupnih troškova putovanja u pomorskom plovidbenom procesu čime se direktno utjecalo na ekonomske pokazatelje. Ukupni troškovi brodara (UT) podijeljeni su u tri segmenata:⁴⁸ troškovi broda u luci (TL), troškovi broda u plovidbi (TP) te operativni troškovi (OT)

$$UT = TL + TP + OT. \quad (6.1)$$

Razmatrajući troškove broda u luci, općenito se mogu razdvojiti na tri osnovne kategorije: troškove nezavisne od prekrcajnog procesa (Tnp), troškove zavisne od prekrcajnog procesa (Tzp) te troškovi goriva tijekom prihvata i otpreme broda (TgM):

$$TL = \sum Tnp + \sum Tzp + \sum TgM. \quad (6.2)$$

Troškovi zavisni od prekrcajnog procesa sastoje se od troškova proporcionalno prekrcajnim operacijama, troškova ovisno o vremenu prekrcajnog procesa te dodatnih troškova prekrcaja.

U ovome doktorskom radu prilikom izrade inicijalnog plana krcanja i slaganja tereta uzelo se u obzir najkraće unaprijed definirano vrijeme pojedinog kontejnera za iskrcaj čime se dobio u konačnici optimalan plan. Ovakvo optimalno rješenje direktno će utjecati na prekrcajne učinke, a time i na duljinu provedenog vremena broda u luci te u konačnici i utjecaj na pretovarne troškove po jedinici tereta.

Troškovi nezavisni o prekrcajnom procesu temelje se na: troškovima koje brod ima boravkom broda na vezu neovisno o vremenu trajanja prekrcajnog procesa, te troškovima koji su nastali prihvatom i otpremom broda u određenoj luci (tegljači, peljari, privezivačke službe i drugi).

⁴⁸ Ivče, R., Doprinos učinkovitosti prijevoza kontejnera manjim feeder brodovima u zatvorenim morima, doktorska disertacija, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2008.

U tu kategoriju, međutim, spadaju i troškovi za lučke takse te ostale pristojbe koje se određuju na temelju vremena provedenog na vezu. Stoga, možemo reći da jedan dio nezavisnih troškova ipak je u ovisnosti o vremenu trajanja prekrcajnog procesa, ali u manjem obimu.

U troškove broda u luci ubrajaju se troškovi goriva tijekom prihvata i otpreme broda. Navedena grupa troškova direktno je ovisna o vremenu tijekom prihvata broda i njegove otpreme. U pomorskoj praksi vrijeme prihvata broda obuhvaća razdoblje od početka manevriranja koje se obilježava kao kraj plovidbenog putovanja (engl. *End of Sea Passage – EOSP*) do početka prekrcajnog procesa na brodu. Vrijeme otpreme broda obuhvaća vrijeme od trenutka završetka prekrcajnog procesa do trenutka kada je brod završio s manevrom odlaska te započeo svoje plovidbeno putovanje (engl. *Beginning of Sea Passage – BOSP*).

Uz spomenuto vrijeme prihvata i otpreme broda potrebno je naglasiti vrijeme čekanja na ulazak broda u luku. Prilikom lučkog kašnjenja brodar ima za posljedicu povećanje troškova sukladno vremenu čekanja na ulazak broda u luku. U linijskom kontejnerskom servisu na poslovanje brodara može značajno negativno utjecati lučko kašnjenje, odnosno nemogućnost broda da uđe u luku radi obavljanja prekrcajnog procesa. Ukoliko je poznata pravovremena, točna informacijom i predikcija perioda zauzeća kontejnerskog pristana, brodar može izabrati drugi redoslijed luka ticanja u sklopu regionalnog lučkog sustava. Predikcija vremena zauzeća jednog kontejnerskog terminala mora biti dovoljno duga kako bi se mogla ostvariti plovidba broda do druge iskrcajne luke u sklopu regionalnog lučkog sustava, obavljanje prekrcajnog procesa, te vraćanje u početnu luku nakon završetka zauzeća pristana. Velika prednost optimiziranog plana krcanja i slaganja tereta s dodatnim ograničenjima optimizacije za luke unutar regionalnog lučkog sustava očituje se u smanjivanju repozicioniranja kontejnera. Ovim načinom optimizacije smanjuju se troškovi prekrcajnog procesa te vrijeme boravka broda u luci. Prema informativnim cijenama Adriatic Gate Container Terminala (AGCT) cijena repozicioniranja jednog klasičnog kontejnera iznosi 100 eura. Drugim riječima, ukoliko je potrebno repozicionirati 10 klasičnih kontejnera u kontejnerskom terminalu Rijeka, trošak ovisan o prekrcajnom procesu bit će za 1.000 eura veći.

Trošak broda u plovidbi direktno je proporcionalan dnevnoj potrošnji goriva, vremenu provedenom u plovidbi te cijeni goriva. Brod tijekom plovidbe uobičajeno troši teško gorivo (engl. *Fuel Oil*) za glavni pogonski stroj i lako gorivo (engl. *Marine Diesel Oil* ili *Marine Gas Oil*) za pomoćne motore. Na potrošnju goriva direktno utječu mjere i dimenzije broda (duljina,

širina, gaz, trim, deplasman), oblik trupa, propulzija broda, zahtijevana snaga motora odnosno zahtijevana brzina.

Trošak teškog goriva (Ttg) stoga se može prikazati izrazom:⁴⁹

$$Ttg = ctg \sum qtg \cdot sz \cdot Dp_i, \quad (6.3)$$

gdje je ctg cijena teškog goriva, qtg specifična dnevna potrošnja goriva po danu, sz zahtijevana snaga motora, Dp_i broj dana u plovidbi. Na troškove broda u plovidbi i poslovanje broдача direktno utječu, u posljednje vrijeme, značajne promjene cijena goriva. Cijena goriva podložna je cikličkim promjenama te varira s obzirom na područje opskrbe.

U sljedećoj tablici prikazane su cijene u američkim dolarima teškog i lakog goriva na različitim područjima opskrbe.

Tablica 28. Cijene u američkim dolarima pogonskog goriva na različitim mjestima opskrbe

Lučki kontejnerski terminali	IFO 380	IFO 180	MGO
Singapore	367	379	574
Rotterdam	349	384	585
Fujairah	372,50	395	740
Busan	385	407	585
Piraeus (Pirej)	362	387	604

Izvor: <http://www.bunkerindex.com/> (01.04.2015)

Utjecaj optimizacije plana krcanja i slaganja prikazano je kroz smanjenje troškova putovanja na primjeru zadanog kontejnerskog linijskog servisa. Trošak broda u plovidbi direktno je proporcionalan vremenu provedenom u plovidbi. Smanjenje troškova putovanja temeljit će se na vremenu provedenom u navigaciji s optimalnim trimom uzimajući dobiveni inicijalni optimalni plan s obzirom na planirano putovanje i prosječnu brzinu.

⁴⁹ Ivče, R., Jugović, A., Kos, S., Određivanje troškova broda u plovidbi poradi uspješnosti izvođenja optimizacije brodskog kapaciteta, Naše more, Vol. 56, Br. 1-2, 2009.

U sljedećoj tablici prikazan je kontejnerski linijski servis s planiranim putovanjem, prosječnom brzinom broda u servisu, te provedeno vrijeme u plovidbi.

Tablica 29. Vrijeme u plovidbi za referentni kontejnerski linijski servis

i	Kontejnerski linijski servis	Udaljenost [M]	Prosječna brzina broda [čv]	Vrijeme provedeno u plovidbi [h]
1	Rijeka – Kopar	135	12	11,25
2	Kopar – Venecija	70	12	5,83
3	Venecija – Ancona	130	12	10,83
4	Ancona – Pirej	817	12	68,08
5	Pirej – Rijeka	926	12	77,16
	Ukupno	2078		173,17 h ~ 7,2 dana

Izvor: Autor

Uzimajući optimalni plan krcanja i slaganja tereta s dobivenim trimom u funkciji manje potrošnje goriva pri brzini broda od 12 čvorova dobivaju se značajne uštede u potrošnji goriva u ovome kontejnerskom linijskom servisu. Analizirajući referentni brod na liniji sukladno tablici 10, pri određenom gazu i trimu broda, vidljiva je značajna ušteda u dnevnoj potrošnji goriva od jedne tone. Iz navedenog primjera uzimajući u obzir vrijeme provedeno u plovidbi (7,2 dana), te cijenu teškog goriva u Pireju (362 \$) vidljiva je značajna ušteda od 2.606,4 \$ u jednom kontejnerskom linijskom servisu. Godišnja ušteda u potrošnji goriva (engl. *Fuel Cost Saving – FCS*) prikazana je sljedećim izrazom:

$$FCS = ctg \sum_{i=1}^n \frac{D_i \cdot bs}{24 \cdot V_b}, \quad (6.4)$$

gdje su D_i udaljenost između pojedine luke u kontejnerskom linijskom servisu, bs broj linijskih servisa godišnje te V_b prosječna brzina broda u linijskom servisu. U referentnom primjeru u ovome doktorskom radu obavlja se 36 linijskih servisa u godinu dana čime bi se sukladno izrazu (6.4) postigla značajna ušteda od približno 93.816 američkih dolara. Iz navedenog primjera optimizacijom plana krcanja i slaganja tereta postiglo se smanjenje ukupnih troškova putovanja u pomorskom plovidbenom procesu čime se direktno utjecalo na ekonomske pokazatelje i poslovanje brodara.

Analizirajući drugi kontejnerski linijski servis koji povezuje Europu i Daleki istok ukupne troškove broda u plovidbi moguće je značajnije smanjiti pravilnom optimizacijom krcanja i slaganja tereta te dinamičkim balastiranjem u funkciji održavanja željenog trima. U sljedećoj tablici prikazan je kontejnerski linijski servis na putu između Sueskog kanala i Port Kelanga u Maleziji kontejnerskim brodom prijevoznog kapaciteta od 11.400 TEU-a pri srednjem gazu od 11 metara.

Tablica 30. Prikazana ušteda na kontejnerskom linijskom servisu između

Linijski servis	Udaljenost [M]	Prosječna brzina broda [čv]	Vrijeme provedeno u plovidbi	Dnevna potrošnja goriva za trim broda po krmi od 1,0 m [t]	Dnevna potrošnja goriva za trim broda po pramcu od 1,0 m [t]	Dnevna ušteda na pogonskom gorivu [t]	Cijena teškog goriva (IFO 380) Singapur	Ušteda [\$]
Suez – Port Kelang	4.833,1	20	241,655 sati 10,07 dana	146	137	9	367	33.030 \$

Izvor: Autor

Analizirajući podatke vidljive su značajne uštede ukoliko se radi o većim brodovima većeg prijevoznog kapaciteta na dužim relacijama (Europa – Daleki istok). Značajnije razlike dobit će se također pri većim gazom broda te većim pramčanim trimom. U prikazanom primjeru trošak goriva za određenu relaciju iznosi 535.820 \$ pri krmenom trimu te 502.790 \$ kod pramčanog trima, stoga teoretski izračunata značajna ušteda je 30.030 \$ za jedan kontejnerski linijski servis.

7. ZAKLJUČAK

Svrha i cilj ovog istraživanja je optimizacija rasporeda tereta na kontejnerskim brodovima u funkciji skraćanja ukupnog vremena boravka broda u luci te smanjenja ukupnih troškova putovanja u pomorskom plovidbenom procesu izradom modela optimizacije krcanja i slaganja kontejnera. U kontekstu ovoga doktorskog rada kao uvjet u problematiku optimizacije analiziralo se kontejnersko linijsko brodarstvo, sredstvo pomorskog prometa kojim se prevoze kontejneri te lučki kontejnerski terminali zajedno sa sudionicima u procesu planiranja.

Uzimajući u obzir sve vrste tereta, globalna prekomorska trgovina u 2014. godini iznosila je 9,54 milijardi tona tereta, gdje kontejneriziranim teretima pripada 1,52 milijarda tona tereta odnosno 15,93 % od ukupne količine svjetske trgovine. U razdoblju od 1996. do 2014. godine najveći svjetski promet prevezenih kontejnera zabilježen je u 2014. godini od približno 170 milijuna TEU-a dok je najveći pad zabilježen u 2009. godini kao posljedica svjetske ekonomske krize koja se direktno odrazila na svjetski kontejnerski promet. Svjetski linijski kontejnerski promet temelji se na trima linijskim preko-oceanskim robnim pravcima: transpacifički pravac, transatlantski pravac, te pravac Europa – Azija s ukupno 490 redovitih linijskih servisa. Ukupan kontejnerski promet koji je ostvaren spomenutim prometnim tokovima za 2013. godinu približno iznosi 48,3 milijuna TEU-a ili 30,2 % od ukupne globalne trgovine kontejnerima, dok je najveći kontejnerski promet zabilježen na transpacifičkom pravcu.

Radi boljeg razumijevanja optimalnog rasporeda kontejnera, kojem će biti svrha unaprijediti efikasnost sustava ove problematike, analizirane su veličine kontejnerskih brodova i ciklusi razvoja. Prema statističkim podacima iz 2014. godine ukupan broj potpuno kontejnerskih brodova u eksploataciji iznosio je 5.008 brodova dok je njihov ukupni prijevozni kapacitet iznosio 18.059.924 TEU-a.

Zbog komercijalnog i ekonomskog značenja brodari konstantno imaju tendenciju smanjivanja ukupnih troškova u kontejnerskom linijskom transportnom lancu. Smanjivanje ukupnih troškova brodara u ovom doktorskome radu postiglo se optimizacijom rasporeda tereta na kontejnerskim brodovima u funkciji skraćanja prekrcajnog procesa te troškova putovanja. Problem najboljeg rasporeda tereta na brodovima za prijevoz kontejnera (engl. *Container Stowage Problem* – CSP), a da se pri tome zadovolji što kraći boravak broda u luci uzimajući u obzir čimbenike koji uvjetuju raspored kontejnera, predmet je stručnih i znanstvenih istraživanja kojima je svrha unaprijediti efikasnost sustava.

Znanstveni pristup ovom problemu danas se ogleda u znanstvenim radovima iz područja operativnog planiranja kojima je cilj optimizirati pojedinačne procese koristeći matematičko-statističke metode ili metode umjetne inteligencije koje se koriste u sklopu istraživanja. Prilikom analize dosadašnjih rezultata istraživanja veliki broj radova usmjeren je na optimalan raspored tereta u funkciji kraćeg prekrcajnog procesa koristeći različite metode optimiziranja, međutim, većini autora izostali su ključni čimbenici koji uvjetuju raspored kontejnera na brodu. Za rješavanje optimizacijskog problema unaprijed su definirani ključni čimbenici koji utječu na inicijalni plan krcanja i slaganja tereta te su podijeljeni na osnovne četiri kategorije: utjecaj brodskih čimbenika, utjecaj svojstva tereta/kontejnera, utjecaj čimbenika terminala te utjecaj ekonomsko-komercijalnih čimbenika brodara. Brodski čimbenici koji utječu na inicijalni plan čine: stabilnost kontejnerskog broda (poprečna, uzdužna i dinamička stabilnost), različita opterećenja brodske konstrukcije (poprečna sila, momenti savijanja i torzijski momenti), dopuštena površinska opterećenja nosivih površina te vidljivost sa zapovjedničkog mosta.

Prilikom izrade plana krcanja i slaganja značajnu ulogu ima utjecaj svojstva tereta/kontejnera, odnosno dimenzije i tip kontejnera koji se koriste u transportu, međutim veći naglasak pridodan je na svojstvu tereta koji iziskuje zasebne uvjete prijevoza. Svako svojstvo tereta iziskuje zaseban način rukovanja, međutim najviše pažnje potrebno je posvetiti krcanju, slaganju i prijevozu opasnog tereta, prijevozu lakopokvarljive robe u kontejnerima te prijevoz izvangabaritnog tereta. Prilikom izrade inicijalnog plana krcanja i slaganja značajan je utjecaj čimbenika terminala i ostalih ograničavajućih faktora koji su vezani uz lučki kontejnerski terminal. Ekonomski i komercijalni čimbenici brodara također su od velikog značaja jer u tu kategoriju spadaju raspored kontejnera s obzirom na rotaciju putovanja što podrazumijeva točan raspored ticanja luka u jednom linijskom kontejnerskom servisu te raspored kontejnera s obzirom na vrijeme stajanja broda u luci.

Plan krcanja i slaganja tereta ostvaruje se uz više sudionika procesa: operativni planer, planer na terminalu te časnik odgovoran za teret. Plan koji će se optimizirati je početni, odnosno inicijalni plan koji započinje operativni planer s obzirom na količinu tereta za ukrcaj.

Optimizacija samog procesa temelji se na uspostavljenom modelu krcanja i slaganja uzimajući u obzir čimbenike koji utječu na raspored tereta s uvođenjem unaprijed definiranog vremena iskrcaja pojedinog kontejnera s obzirom na poziciju kontejnera na brodu.

Model krcanja i slaganja tereta temelji se na uspostavljenom matematičkom modelu gdje su uvedena potrebna ograničenja te u konačnici definirana je objektna funkcija cilja kojom se vrednuju dobivena rješenja. Za izradu optimalnog plana krcanja i slaganja tereta primijenio se

genetski algoritam kao heuristička metoda optimiziranja koja se inače koristi kao moćan alat za rješavanje različitih problema iz inženjerske prakse. Uspostavljeni matematički model implementirao se u programski kod genetskog algoritma. Genetski algoritam temelji se na slučajno generiranim rješenjima nakon čega se koriste genetski operatori križanja, mutacije i selekcija. Nakon provedbe šest generacijskih ciklusa, dobivena rješenja su evaluirana (vrednovana) pomoću objektne funkcije cilja čime se dobio optimalan plan krcanja i slaganja tereta. Prilikom implementacije modela ciljano se odabrao referentni brod od 368 TEU-a zbog aplikativnog doprinosa na udružene luke sjevernojadranske regije te zbog vidljivih značajnih rezultata već i na brodovima manjeg kapaciteta. U konačnici na referentnom brodu prilikom krcanja i slaganja 60 kontejnera vidljivo je skraćenje prekrcajnog procesa od 11,8 minuta. Ukoliko se model primjeni na veće brodove primjerice kapaciteta od 18.000 TEU-a gdje se u jednoj iskrcajnoj luci iskrcava znatno više kontejnera, skraćenje prekrcajnog procesa može biti puno značajnije čime će se poboljšati odnos između plovidbe i boravka broda u luci.

Rješenje koje je predloženo u ovome radu ujedno objedinjuje dva dodatna optimizacijska problema: problem dodatnih kriterija optimizacije za luke unutar regionalnog lučkog sustava, te stvaranje plana krcanja i slaganja tereta u funkciji postizanja optimalnog trima gdje će se smanjiti dnevna potrošnja goriva. Uzimajući dobiveni optimalni plan krcanja i slaganja tereta sa zadanim pramčanim trimom u funkciji manje potrošnje goriva pri brzini broda od 12 čvorova dobivena je značajna ušteda u potrošnji goriva u ovom kontejnerskom linijskom servisu. Analizirajući referentni brod na zadanoj liniji pri određenom gazu i trimu broda, vidljiva je značajna ušteda u dnevnoj potrošnji goriva od jedne tone. Iz navedenog aplikativnog primjera vidljiva je značajna ušteda od 2.606 američkih dolara u jednom kontejnerskom linijskom servisu. U referentnom primjeru u ovome doktorskom radu obavlja se 36 linijskih servisa u godinu dana čime bi se postigla značajna ušteda od približno 93.816 američkih dolara.

Rezultati testiranja pokazuju da je ostvarenom optimizacijom u teoretskom i funkcionalnom smislu skraćen prekrcajni proces u funkciji kraćeg boravka broda u luci te su smanjeni ukupni troškovi putovanja u pomorskom plovidbenom procesu što je ujedno i postavljena znanstvena hipoteza u ovome radu.

Ovim postavljenim modelom optimizacije postigao se plan krcanja i slaganja tereta koji udovoljava zahtjevima brodarka za realizaciju osnovnog principa racionalnog poslovanja. Uspostavljenim modelom optimizacije ostvario se očekivani doprinos u aplikativnom smislu samim ubrzavanjem procesa donošenja odluke planerima te se ujedno povećala efikasnost uz manji postotak ljudske pogreške.

Drugim riječima, na osnovi uspostavljenog modela direktno se dobio plan krcanja i slaganja tereta koji se ostvario u kratkom vremenu algoritmima metaheuristike gdje će time operativni planer ili bilo koji drugi sudionik procesa imati isključivo ulogu kontrole plana rasporeda kontejnera, ali ne i samo planiranje. Potrebno je, međutim naglasiti da pojedini zahtjevi u funkciji optimalnog krcanja i slaganja često proturječe jedan drugome. Model je postavljen da su nužni uvjeti i ograničenja uvedeni kao konstante koje se mogu prilagoditi s obzirom na čimbenike koji utječu na razmještaj tereta. Drugim riječima, ukoliko nije moguće sprovesti plan krcanja i slaganja koji će zadovoljiti glavne čimbenike koji utječu na razmještaj kao i svu postavljenu optimizaciju, brodar će s obzirom na racionalizaciju poslovanja odlučiti koje će optimizacijske metode biti od veće važnosti: smanjenje prekrcajnog procesa u funkciji kraćeg boravka broda u luci ili smanjenje repozicioniranja i mogućnost nesmetanog iskrcaja kontejnera u lukama unutar udruženog regionalnog lučkog sustava ili pak smanjenje troškova goriva u kontejnerskom linijskom servisu.

Daljnja istraživanja temeljit će se na razvoju modela optimizacije s nekom drugom primijenjenom metodom operacijskih istraživanja gdje će se dobiveni rezultati usporediti s rezultatima koji su dobiveni genetskim algoritmima metaheuristike u ovome radu. Daljnje istraživanje može ujedno obuhvaćati kontejnerske brodove većeg prijevoznog kapaciteta što bi rezultiralo značajnijim uštedama u brodarevom poslovanju prilikom optimizacije plana krcanja i slaganja tereta.

BIBLIOGRAFSKA ISTRAŽIVANJA

Knjige

1. Alderton, P., Port management and operations, LLP Reference Pub., London, 1999.
2. Beasley, D., Bull, D.R., Martin, R.R., An overview of genetic algorithms: part 1, fundamentals, University Computing, 1993.
3. Biran, A., Ship Hydrostatics and Stability, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.
4. Clark, I., C., the Management of Merchant Ship Stability, Trim and Strength, t
5. he Nautical Institute, London, 2002.
6. Davis, L., Handbook of genetic algorithms, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
7. Derrett, D., R., Barrass, C., B., Ship Stability for the Masters and Mates, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
8. Komadina, P., Brodovi multimodalnog transportnog sustava, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2001.
9. Komadina, P., Tankeri, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 1994.
10. Komadina, P., RO RO brodovi, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2002.
11. Kos, S., Vranić, D., Morska kontejnerska transportna tehnologija II., Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2008.
12. Meisel, F., Seaside Operations Planning in Container Terminals, Springer, 2009.
13. Mrnjavac, E., Pomorski sustavi, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 1998.
14. Rossi, F., Beek, P., Walsh, T., Handbook of Constraint Programming, Chapter 11., Elsevier, 2006.
15. Schneider, J.J., Kirkpatrick, S., Stochastic Optimization, Springer, 2006.
16. Stopford, M., Maritime Economics, 3rd edition, Routledge, New York, 2009.
17. Uršić, J., Stabilitet broda I. dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1962.
18. Uršić, J., Stabilitet broda II. dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1964.
19. Vranić, D., Ivče, R., Tereti u pomorskom prometu, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, 2007.
20. Vranić, D., Kos, S., Morska kontejnerska transportna tehnologija I., Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2008.

Radovi u znanstvenim časopisima i zbornicima

21. Alvarez, J., A heuristic for vessel planning in a reach stacker terminal, *Journal of Maritime Research*, Vol. 3, 2006.
22. Ambrosino, D., Anghinolfi, D., Paolucci, M., Sciomachen, A., An experimental comparison of different heuristics for the master bay plan problem, *Proceedings of the 9th International Symposium on Experimental Algorithms*, 2010.
23. Ambrosino, D., Sciomachen, A., Tanfani, E., Stowing a containership: the master bay plan, *Transportation Research Part A, Policy and Practice*, Vol. 38, No. 2, 2004.
24. Ambrosino, D., Sciomachen, D., Anghinolfi, D., Paolucci, M., A new three-step heuristic for the master bay plan problem, *Maritime Economics and Logistics*, Vol. 11, 2009.
25. Ambrosino, D., Scionachen, A., Tanfani, E., A decomposition heuristics for the container ship stowage problem, *Journal of Heuristics*, Vol. 12, No. 3, 2006.
26. Anderson, M.W., *Service Network Design and Management in Liner Container Shipping Application*, DTU Transport, Kongens Lyngby, 2010.
27. Armstrong, V.N., Vessel optimisation for low carbon shipping, *Ocean Engineering*, Vol. 73, 2013.
28. Avriel, M., Penn, M., Shpirer, N., Container ship stowage problem; complexity and connection to the coloring of circle graphs, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 103, No. 1, 2000.
29. Baird, A. J., Optimising the container transshipment hub location in northern Europe, *Journal of Transport Geography*, Vol. 14, 2006.
30. Bischoff, E.E., Ratcliff, M.S.W., Issue in the development of approaches to container loading, *Omega*, Vol 23, 1995.
31. Bischoff, E.E., Three-dimensional packing of items with limited load bearing strength, *European Journal of Operational Research*, Vol. 168(3), 2006.
32. Bortfeldt, A, Gehring, H., A hybrid genetic algorithm for the container loading problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 131(1), 2001.
33. Bortfeldt, A., Gehring, H., A parallel genetic algorithm for solving the container loading problem, *International Transactions in Operational Research*, 2002.
34. Bortfeldt, A., Gehring, H., Mack, D., A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem, *Parallel Computing*, Vol. 29(5), 2003.
35. Bortfeldt, A., Wäscher, G., Container Loading Problems - A State of the Art Review, *FEMM Working Papers, Faculty of Economics and Management*, Vol. 7, 2012.

36. Che, C.H., Huang, W., Lim, A., Zhu, W., The multiple container loading cost minimization problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 214, 2011.
37. Chien, C.F., Deng, J.F., A container packing support system for determining and visualising container packing patterns, *Decision Support Systems*, Vol. 37, 2004.
38. Christensen, S.G., Rousøe, D.M., Container loading with multi-drop constraints, *International Transactions in Operational Research*, Vol. 16, 2009.
39. Cullinane, K., Khanna, M., Economics of Scale in Large Containership, *Journal of Transport Geography*, Vol. 8, 2000.
40. Delgado, A., Jensen, R.M., Janstrup, K., Rose, T.H., Andersen, K.H., A constraint programming model for fast optimal stowage of container vessel bays, *European Journal of Operational Research*, Vol. 220, 2012.
41. Delgado, A., Jensen, R.M., Schulte, C., Generating optimal stowage plans for container vessel bays, *Proceedings of the 15th International Conference on Principles and Practise of Constraint Programming (CP-09)*, Springer, 2009.
42. Dubrovsky, O., Levitin, G., Penn, M., A genetic algorithm with compact solution encoding for the container ship stowage problem, *Journal of Heuristics*, Vol. 8, 2002.
43. Eley, M., A bottleneck assignment approach to the multiple container loading problem, *OR Spectrum*, Vol. 25(1), 2003.
44. Eley, M., Solving container loading problems by block arrangement, *European Journal of Operational Research*, Vol. 141(2), 2002.
45. Faina, L., A global optimization algorithm for the three-dimensional packing problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 126, 2002.
46. Fanslau, T., Bortfeldt, A., A tree-search algorithm for solving the container loading problem, *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 22, 2010.
47. Gehring, H, Bortfeldt, A., A parallel genetic algorithm for solving the container loading problem, *International Transactions in Operational Research*, Vol. 9(4), 2002.
48. Gonçalves, J. F., Mendes, J.J.M., Resende M.G.C., A genetic algorithm for their source constrained multi-project scheduling problem, *European Journal of Operational Research* Vol. 189, 2009.
49. Gonçalves, J. F., Resende, M.G.C., A parallel multi-population biased random-key genetic algorithm for a container loading problem, *Computers and Operations Research*, Vol. 39, 2012.
50. Gonçalves, J.F., Resende, M.G.C., Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization, *Journal of Heuristics*, 2010.

51. He, K., Huang, W., Solving the single-container loading problem by a fast heuristic method, *Optimization Methods and Software*, Vol 25, 2010.
52. Hifi, M., Approximate algorithms for the container loading problem, *International Transactions in Operational Research*, Vol. 9, 2002.
53. Hifi, M., Kacem, I., Nègre, S., Wu, L., A linear programming approach for the three-dimensional bin packing problem, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, Vol. 36, 2010.
54. Holland, J. H., *Adaption in natural and artificial systems*, MIT Press Cambridge, MA, USA, 1992.
55. Hu, W., Hu, Z., Shi, L., Luo, P., Song, W., Combinatorial Optimization and Strategy for Ship Stowage and Loading Schedule of Container Terminal, *Journal of Computers*, Vol. 7, 2012.
56. Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E., Papadimitriou, S., Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container re-handles in yardstacks, *European Journal of Operational research*, Vol. 171, 2006.
57. Jin, P., Huang, Y., Yan, W., Heuristic Optimization Algorithm for Reshuffle of External Container, *Journal of Shanghai Maritime University*, Vol. 12, 2009.
58. Jin, Z., Ohno, K., Du, J., An efficient approach for the three-dimensional container packing problem with practical constraints, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, Vol. 24, 2004.
59. Junqueira, L., Morabito, R., Yamashita, D.S., Three- Dimensional container loading models with cargo stability and load bearing constraints, *Computers & Operations Research*, Vol. 39, 2012.
60. Kang, J., Kim, Y., Stowage planning in maritime container transportation, *Journal of the Operations Research Society*, Vol. 53 (4), 2002.
61. Klarin, M., Komadina, P., Vidljivost sa zapovjedničkog mosta, *Pomorski zbornik*, br. 43, Vol. 1, 2005.
62. Lim, A., Rodrigues, B., Wang, Y., A multi-faced buildup algorithm for three-dimensional packing problems, *Omega*, Vol. 31, 2003.
63. Lim, A., Rodrigues, B., Yang, Y., 3-D container packing heuristics, *Applied Intelligence*, Vol. 22, 2003.
64. Lodi, A., Martello, S., Vigo, D., Heuristic algorithms for the three-dimensional bin packing problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 141, 2002.
65. Loges, L., Global port congestion - No quick fix, *Port technology international*, 2005.

66. Mack, D., Bortfeldt, A., A heuristic for solving large bin packing problems in two and three dimensions, *Central European Journal of Operations Research*, 2010.
67. Mack, D., Bortfeldt, A., Gehring, H., A parallel hybrid local search algorithm for the container loading problem, *International Transactions in Operational Research*, Vol. 11, 2004.
68. Makarem, O.C., Haraty, R.A., Smart container loading, *Journal of Computational Methods in Science and Engineering*, Vol. 10, 2010.
69. Martello, S., Pisinger, D., Vigo, D., The three-dimensional bin packing problem, *Operations Research*, Vol. 48, 2000.
70. Meisel, F., *Seaside Operations Planning in Container Terminal*, Springer, 2009.
71. Monaco, M. F., Sammarra, M., Sorrentino, G., The Terminal Oriented Ship Stowage Planning Problem, *European Journal of Operational Research*, Elsevier, 2014.
72. Moura, A., Oliveira, J.F., A grasp approach to the container-loading problem, *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 20(4), 2005.
73. Notteboom, T. E., Concentration and the formation of multi-port gateway regions in the European container port system, *Journal of Transport Geography*, Vol 18, 2010.
74. Notteboom, T. E., Vernimmen, B., The effect of high fuel costs on liner service configuration in container shipping, *Journal of Transport Geography*, Vol 17, 2009.
75. Pacino, D., Delgado, A., Jensen, R.M., Bebbington, T., Fast generation of near-optimal plans for eco-efficient stowage of large container vessels, *Proceedings of the Second International Conference on Computational Logistics (ICCL'11)*, Springer, 2011.
76. Parreno, F., Alvarez-Valdes, R., Oliveira, J.F., Tamarit, J. M., Neighborhood structures for the container loading problem: a VNS implementation, *Journal of Heuristics*, 2010.
77. Parreño, F., Alvarez-Valdez, R., Oliveira, J.F., Tamarit, J.M., A hybrid GRASP/ VND algorithm for two and three-dimensional bin packing, *Annals of Operations Research*, Vol. 179, 2010.
78. Parreño, F., Alvarez-Valdez, R., Tamarit, J.M., Oliveira, J.F., A maximal-space algorithm for the container loading problem, *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 20, 2008.
79. Pisinger, D., Heuristics for the container loading problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 141(2), 2002.
80. Ren, J., Tian, Y., Sawaragi, T., A priority-considering approach for the multiple-container loading problem, *International Journal of Metaheuristics*, Vol. 1 (4), 2011.
81. Ren, J., Tian, Y., Sawaragi, T., A tree search method for the container loading problem with shipment priority, *European Journal of Operational Research*, Vol. 214, 2011.

82. Sciomachen, A., Tanfani, E., A 3DD packing approach for optimising stowage plans and terminal productivity, *European Journal of Operational Research*, Vol. 83, 2007.
83. Sciomachen, A., Tanfani, E., The master bay plan problem: a solution method based on its connection to the three-dimensional bin packing problem, *IMA Journal of Management Mathematics*, Vol. 14, 2003.
84. Syafi, I., Tendeny of world container transportation, *Symposium XI FSTPT*, University Diponegoro Semarang, 2008.
85. Twrdy, E., Batista, M., A dynamical model of container throughput of the North Adriatic Multiport Gateway Region, Pomorstvo, *Scientific Journal of Maritime Research*, Vol. 27, 2013.
86. Wang, Z., Li, K. W., Levy, J. K., A heuristic for the container loading problem: A tertiary-tree-based dynamic space decomposition approach, *European Journal of Operational Research*, Vol. 191, 2008.
87. Wang, Z., Li, K.W., Layer-layout-based heuristics for loading homogeneous items into a single container, *Journal of Zhejiang University – Science A*, Vol. 8, 2007.
88. Whitley, D., A Genetic Algorithm Tutorial, *Statistics and Computing*, Vol. 4, 1994.
89. Wilson, I.D., Roach, P., Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions, *Journal of the Operational Research Society* Vol. 51, 2000.
90. Wilson, I.D., Roach, P., Ware, J.A., Container stowage pre-planning: Using search to generate solutions, a case study, *Knowledge Based Systems*, Elsevier, Vol. 14, 2001.
91. Zhang, W.Y., Lin, Y., Ji, Z., Model and algorithm for container ship stowage planning based on bin-packing problem, *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 4, 2005.

Studije, elaborati, pravni okviri

92. Agreement No. 13, Maritime Regulations for the Operations of the Panama Canal, Panama Canal Authority Organic Law, 1999.
93. Drewry Shipping Consulting Ltd, London, UK, 2013.
94. Dynamar, B.,V., Containers, Alkmaar, 2012.
95. Fuel Saving by Trim Optimisation, DNV Serving the Maritime Industry, MA, Norway, 2010.
96. Hyundai Maritime Research Institute, Trim Optimization
97. IACS – International Association of Classification Societies, Containerships: guidelines for surveys, assessment and repair of hull structures, Witherby, London, 2005.
98. IMDG Code, 2010. edition, Vol. 1, IMO, London, 2010.

99. IMO Resolution MSC. 328(90) – Adoption of amendments to the international maritime dangerous goods (IMDG) Code
100. Mohović, R., et al., Mjere maritimne sigurnosti na kontejnerskom terminalu Brajdica, Maritimna studija, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2013.
101. Optimising Voyage Management and Reducing Vessel Emissions – An Emissions Management Framework, OCIMF, First Edition, 2010.
102. Pineiro, R., G., The containership market, FONASBA Annual meeting, Gothenburg, 2014.
103. Review of Maritime Transport 2014, UNCTAD, United Nations, Geneva, 2014

Magistarski radovi i doktorske disertacije

104. Bukša, J., Upravljanje poslovno-tehnološkim rizicima u obalnom linijskom kontejnerskom brodarstvu, doktorski rad, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2011.
105. Golub, M., Vrednovanje uporabe genetskih algoritama za aproksimaciju vremenskih nizova, magistarski rad, FER, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1996.
106. Grubišić, N., Optimizacija raspodjele vezova i obalnih dizalica na lučkim kontejnerskim terminalima, doktorska disertacija, Pomorski fakultet u Rijeci, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2014.
107. Ivče, R., Doprinis učinkovitosti prijevoza kontejnera manjim feeder brodovima u zatvorenim morima, doktorska disertacija, Pomorski fakultet u Rijeci, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2008.
108. Kaiser, E. I., A stowage planning model for multiport container transportation”, Ph.D. Thesis, University of Maryland, Department of Civil and Environmental Engineering, Maryland, 2006.
109. Karmelić, J., Određivanje konkurentskih sposobnosti linijskog kontejnerskog servisa, doktorska disertacija, Pomorski fakultet u Rijeci, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2014.
110. Komadina, P., Utjecaj ekonomskih kriterija na optimalnu veličinu tankera, doktorska disertacija, Pomorski fakultet u Rijeci, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1991.
111. Nan, C., Container Stowage Planning for Mobile Harbor A1-250, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Kaist, Korea, 2011.
112. Pacino, D., Fast generation of Container Vessel Stowage Plans, Ph.D. Thesis, IT University of Copenhagen, 2012.

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kontejnerski promet vodećih svjetskih luka u 2013. godini	14
Tablica 2. Ciklusni razvoj kontejnerskih brodova kroz generacije	16
Tablica 3. Pregled veličine i ukupan broj potpuno kontejnerskih brodova u 2014. godini.....	20
Tablica 4. Najveći svjetski kontejnerski brodari u 2014. godini.....	21
Tablica 5. Osnovne dimenzije te nadvodne i podvodne površine kontejnerskog broda od 11.000 TEU-a, duljine 366 m pri gazu od 11 m	32
Tablica 6. Povećanje gaza kontejnerskog broda od 11.000 TEU-a, duljine 366 m	32
Tablica 7. Dopušteno neprekidno opterećenje kontejnerskog broda od 368 TEU-a.....	36
Tablica 8. Segregacija kontejnera s opasnim teretom sukladno klasifikaciji.....	41
Tablica 9. Regionalni lučki sustavi u Europi	56
Tablica 10. Dnevna potrošnja goriva broda za prijevoz kontejnera kapaciteta 350 TEU-a pri određenoj brzini i trimu broda.....	63
Tablica 11. Dnevna potrošnja goriva broda za prijevoz kontejnera kapaciteta 11.400 TEU-a pri određenoj brzini i trimu broda	63
Tablica 12. Konstante u matematičkom modelu	78
Tablica 13. Varijable u matematičkom modelu	79
Tablica 14. Skupovi u matematičkom modelu	79
Tablica 15. Parametri genetskog algoritma	82
Tablica 16. Prikaz kontejnera s pripadajućim ulaznim podacima – prvi dio	84
Tablica 17. Prikaz kontejnera s pripadajućim ulaznim podacima – drugi dio	85
Tablica 18. Vrijeme iskrcaja kontejnera s obzirom na poziciju na brodu.....	86
Tablica 19. Raspored krcanja i slaganja kontejnera – prvi dio	88
Tablica 20. Raspored krcanja i slaganja kontejnera – drugi dio	89
Tablica 21. Rezultati modela optimizacije plana krcanja i slaganja kontejnera	106
Tablica 22. Vrijednosti koeficijenata α_1	106
Tablica 23. Vrijednosti koeficijenata α_2	107
Tablica 24. Vrijednosti koeficijenata α_3	107
Tablica 25. Vrijeme prekrcajnog procesa i parametri sukladno postavljenom objektnom funkcijom cilja.....	108
Tablica 26. Dobiveni optimalni raspored krcanja i slaganja kontejnera – prvi dio	109
Tablica 27. Dobiveni optimalni raspored krcanja i slaganja kontejnera – drugi dio	110
Tablica 28. Cijene u am. dolarima pogonskog goriva na različitim mjestima opskrbe	114

Tablica 29. Vrijeme u plovidbi za referentni kontejnerski linijski servis	115
Tablica 30. Prikazana ušteda na kontejnerskom linijskom servisu između	116

POPIS SLIKA

Slika 1. Svjetski kontejnerski promet u razdoblju od 1996. do 2014. godine.....	12
Slika 2. Kontejnerski promet po najznačajnijim prekooceanskim pravcima	13
Slika 3. Uzdužni i poprečni presjek kontejnerskog broda VIII. generacije	18
Slika 4. Broj naručenih brodova za 2015. godinu (TOP 5 brodara).....	21
Slika 5. Dijagram poprečnih sila, torzijski i momenti savijanja kontejnerskog broda.....	35
Slika 6. Vidljivost sa zapovjedničkog mosta	37
Slika 7. Shematski prikaz komunikacije sudionika u izradi plana krcanja i slaganja tereta	52
Slika 8. Plan ukrcaja jednog <i>baya</i>	57
Slika 10. Algoritam procesa krcanja i slaganja tereta na kontejnerskim brodovima	60
Slika 11. Kontejnerski brod s trimom po pramcu	64
Slika 12. Dnevna potrošnja goriva s obzirom na trim broda kod različitih brzina	65
Slika 13. Primjer križanja rješenja s jednim mjestom prekida	81
Slika 14. Kontejnerski linijski servis odabran za implementaciju	83
Slika 15. Inicijalni plan krcanja i slaganja (<i>Bay plan</i>)	90
Slika 16. Kromosom u procesu GA za potrebu optimizacije	91
Slika 17. Uzdužni presjek referentnog broda s <i>bayevima</i> u GA	92
Slika 18. Prihvatljiv i neprihvatljiv izbor <i>baya</i> u GA	93
Slika 19. Neprihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja pozicije pojedinom kontejneru	95
Slika 20. Neprihvatljivo rješenje prilikom slučajnog generiranja pozicija dvaju kontejnera ..	95
Slika 21. Neprihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja pozicija kontejnera različite mase...	96
Slika 22. Neprihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja pozicija kontejnerima različitih veličina.....	97
Slika 23. Prihvatljivo rješenje prilikom dodjeljivanja pozicija kontejnera različitih masa i veličina.....	98
Slika 24. Neprihvatljivi primjeri rasporeda pozicija opasnog tereta u GA	98
Slika 25. Prihvatljivi primjer rasporeda pozicija opasnih tereta u GA.....	99
Slika 26. Prihvatljivi primjer rasporeda pozicija rashladnih kontejnera u GA	100
Slika 27. Križanje dvaju kromosoma (rješenja) plana krcanja i slaganja tereta.....	101
Slika 28. Dobiveni kromosomi (rješenja) nakon križanja plana krcanja i slaganja tereta	102
Slika 29. Mutacija kromosoma (rješenja) plana krcanja i slaganja tereta	103
Slika 30. Algoritam stvaranja nove generacije u procesu optimizacije rasporeda tereta	104

PRIVITAK 1. PROGRAMSKI KOD GENETSKOG ALGORITMA

MODELA KRCANJA I SLAGANJA TERETA

Zbog obima programskog koda *Java* iz korištenog programskog alata *NetBeans* IDE 8.0.2. u privitku je prikazan dio cjelokupnog koda.

Uspostava podataka pojedinog kontejnera

```
class ContainerShip {  
  
    private int number;  
    private int size;  
    private int weight;  
    private int bay;  
    private int row;  
    private int tier;  
    private int reef;  
    private int dangerous;  
    private int destinationPort;  
  
    public ContainerShip(int number, int size, int weight, int bay, int row, int  
tier, int reef, int dangerous, int destinationPort) {  
        this.number = number;  
        this.size = size;  
        this.weight = weight;  
        this.bay = bay;  
        this.row = row;  
        this.tier = tier;  
        this.reef = reef;  
        this.dangerous = dangerous;  
        this.destinationPort = destinationPort;  
    }  
    public int getReef() {  
        return reef;  
    }  
    public void setReef(int reef) {  
        this.reef = reef;  
    }  
    public int getDangerous() {  
        return dangerous;  
    }  
    public void setDangerous(int dangerous) {  
        this.dangerous = dangerous;  
    }  
    public int getNumber() {  
        return number;  
    }  
    public void setNumber(int number) {  
        this.number = number;  
    }  
    public int getSize() {  
        return size;  
    }  
    public void setSize(int size) {  
        this.size = size;  
    }  
    public int getWeight() {  
        return weight;  
    }  
    public void setWeight(int weight) {  
        this.weight = weight;  
    }  
    public int getBay() {
```

```

        return bay;
    }
    public void setBay(int bay) {
        this.bay = bay;
    }
    public int getRow() {
        return row;
    }
    public void setRow(int row) {
        this.row = row;
    }
    public int getTier() {
        return tier;
    }
    public void setTier(int tier) {
        this.tier = tier;
    }
    public int getDestinationPort() {
        return destinationPort;
    }
    public void setDestinationPort(int destinationPort) {
        this.destinationPort = destinationPort;
    }
}

```

Uspostava objektne funkcije cilja

```

package srkigeneticki;

import java.io.FileInputStream;
import java.io.FileNotFoundException;
import java.io.FileOutputStream;
import java.io.IOException;
import java.io.InputStream;
import java.util.ArrayList;
import java.util.List;
import java.util.logging.Level;
import java.util.logging.Logger;
import org.apache.poi.hssf.usermodel.HSSFFormulaEvaluator;
import org.apache.poi.hssf.usermodel.HSSFWorkbook;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Cell;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Row;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Sheet;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Workbook;
import org.jgap.FitnessFunction;
import org.jgap.Gene;
import org.jgap.IChromosome;
import org.jgap.impl.IntegerGene;

public class MyFitnessFunction extends FitnessFunction {

    private List<ContainerShip> kontejneri;
    private static int brojac = 1;

    public MyFitnessFunction(List<ContainerShip> listaBrodova) {
        this.kontejneri = listaBrodova;
    }

    public double evaluate(IChromosome a_subject) {
        this.brojac++;
        System.out.println("fitness broj: " + this.brojac);
        InputStream test = null;
        Workbook testWork = null;
        try {
            test = new FileInputStream("Srki NOVOK.xls");
            testWork = new HSSFWorkbook(test);

```

```

    } catch (FileNotFoundException ex) {
        Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE,
null, ex);
    } catch (IOException ex) {
        Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE,
null, ex);
    }

    int number = 1;
    int bay1PalubaX = 47;
    int bay1PalubaY = 21;
    int bay1X = 46;
    int bay1Y = 3;

    List<PozicijaTereta> pozicijeBay = new ArrayList<PozicijaTereta>();
    PozicijaTereta pozicija = new PozicijaTereta(number, bay1PalubaX,
bay1PalubaY, bay1X, bay1Y);
    pozicijeBay.add(pozicija);

    int bay3PalubaX = 37;
    int bay3PalubaY = 21;
    int bay3X = 37;
    int bay3Y = 4;

    number = 3;
    pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay3PalubaX, bay3PalubaY, bay3X,
bay3Y));

    int bay5PalubaX = 37;
    int bay5PalubaY = 29;
    int bay5X = 37;
    int bay5Y = 12;
    number = 5;
    pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay5PalubaX, bay5PalubaY, bay5X,
bay5Y));

    int bay7PalubaX = 28;
    int bay7PalubaY = 21;
    int bay7X = 28;
    int bay7Y = 4;
    number = 7;
    pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay7PalubaX, bay7PalubaY, bay7X,
bay7Y));

    int bay9PalubaX = 28;
    int bay9PalubaY = 29;
    int bay9X = 28;
    int bay9Y = 12;
    number = 9;
    pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay9PalubaX, bay9PalubaY, bay9X,
bay9Y));

    int bay11PalubaX = 19;
    int bay11PalubaY = 21;
    int bay11X = 19;
    int bay11Y = 4;
    number = 11;
    pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay11PalubaX, bay11PalubaY,
bay11X, bay11Y));

    int bay13PalubaX = 19;
    int bay13PalubaY = 29;
    int bay13X = 19;
    int bay13Y = 12;
    number = 13;
    pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay13PalubaX, bay13PalubaY,
bay13X, bay13Y));
    int bay15PalubaX = 10;

```

```

        int bay15PalubaY = 21;
        int bay15X = 10;
        int bay15Y = 4;
        number = 15;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay15PalubaX, bay15PalubaY,
        bay15X, bay15Y));
        int bay17PalubaX = 10;
        int bay17PalubaY = 29;
        int bay17X = 10;
        int bay17Y = 12;
        number = 17;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay17PalubaX, bay17PalubaY,
        bay17X, bay17Y));
        int bay19PalubaX = -1;
        int bay19PalubaY = -1; //hold
        int bay19X = 2; //deck
        int bay19Y = 4;
        number = 19;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay19PalubaX, bay19PalubaY,
        bay19X, bay19Y));

        double fitness = 0;
        Gene[] genes = a_subject.getGenes();
        List<ContainerShip> kontejneri1 = new ArrayList<ContainerShip>();
        for (ContainerShip kontejner : kontejneri) {
            ContainerShip kontejner1 = new ContainerShip(kontejner.getNumber(),
            kontejner.getSize(), kontejner.getWeight(), kontejner.getBay(), kontejner.getRow(),
            kontejner.getTier(), kontejner.getReef(), kontejner.getDangerous(),
            kontejner.getDestinationPort());
            kontejneri1.add(kontejner1);
        }

        int rijekaIndeks = (Integer) genes[0].getAllele();
        int koparIndeks = (Integer) genes[1].getAllele();
        int trstIndeks = (Integer) genes[2].getAllele();
        int drugiIndeks = (Integer) genes[3].getAllele();

        for (ContainerShip kontejner1 : kontejneri1) {
            kontejner1.setBay(((Integer) genes[kontejner1.getNumber() * 3 +
            1].getAllele()) * 2 - 1);
            kontejner1.setRow((Integer) genes[kontejner1.getNumber() * 3 +
            2].getAllele());
            kontejner1.setTier((Integer) genes[kontejner1.getNumber() * 3 +
            3].getAllele());
        }
        for (ContainerShip kontejner1 : kontejneri1) {
            float tezina = (float) kontejner1.getWeight();
            int size = kontejner1.getSize();
            int bay = kontejner1.getBay();
            int row = kontejner1.getRow();
            int tier = kontejner1.getTier();
            if (tier == 7) {
                System.out.println("TIER 7!!!");
            }
            if (size == 40) {
                int bay2 = bay + 2;
                tezina /= 2;
                brojac++;
                PozicijaTereta pozicijeBayPrava = null;
                for (PozicijaTereta pozicijeBay1 : pozicijeBay) {
                    if (pozicijeBay1.getNumber() == bay) {
                        pozicijeBayPrava = pozicijeBay1;
                    }
                }
                int X = -1;
                int Y = -1;
                Sheet pisanjePodataka = testWork.getSheetAt(0);
                try {

```



```

        if (tier < 4) {
            X = pozicijeBayPrava.getBay1PalubaX();
            Y = pozicijeBayPrava.getBay1PalubaY();
        } else {
            X = pozicijeBayPrava.getBay1X();
            Y = pozicijeBayPrava.getBay1Y();
            tier = tier - 3;
        }

        Row rowPisanje = pisanjePodataka.getRow(Y - tier + 1);
        Cell cellPisanje = rowPisanje.getCell(X + row - 1);

        cellPisanje.setCellValue(tezina);
    } catch (Exception e) {
        System.out.println("kontejner 40 number: " +
kontejner1.getNumber());
        System.out.println("tier pocetni 40: " + kontejner1.getTier());
        System.out.println("tier 40: " + tier);
        System.out.println("bay 40: " + bay);
        System.out.println("row 40: " + row);
        System.out.println("y 40: " + Y);
        System.out.println("x 40: " + X);
        System.out.println("y red 40: " + (Y - tier + 1));
        System.out.println("x stupac 40: " + (X + row - 1));
        System.out.println("");
        System.out.println("");
    }

    tier = kontejner1.getTier();
    PozicijaTereta pozicijeBayPrava2 = null;
    for (PozicijaTereta pozicijeBay1 : pozicijeBay) {
        if (pozicijeBay1.getNumber() == bay2) {
            pozicijeBayPrava2 = pozicijeBay1;
        }
    }

    int X2 = -1;
    int Y2 = -1;
    try {
        if (tier < 4) {
            X2 = pozicijeBayPrava2.getBay1PalubaX();
            Y2 = pozicijeBayPrava2.getBay1PalubaY();
        } else {
            X2 = pozicijeBayPrava2.getBay1X();
            Y2 = pozicijeBayPrava2.getBay1Y();
            tier = tier - 3;
        }

        Row rowPisanje2 = pisanjePodataka.getRow(Y2 - tier + 1);

        Cell cellPisanje2 = rowPisanje2.getCell(X2 + row - 1);
        cellPisanje2.setCellValue(tezina);
    } catch (Exception e) {
        System.out.println("kontejner 40 number: " +
kontejner1.getNumber());
        System.out.println("tier2 pocetni 40: " +
kontejner1.getTier());
        System.out.println("tier2 40: " + tier);
        System.out.println("bay2 40: " + bay);
        System.out.println("row2 40: " + row);
        System.out.println("y2 40: " + Y);
        System.out.println("x2 40: " + X);
        System.out.println("y2 red 40: " + (Y - tier + 1));
        System.out.println("x2 stupac 40: " + (X + row - 1));
        System.out.println("");
        System.out.println("");
    }

} else {

```

```

PozicijaTereta pozicijeBayPrava = null;
for (PozicijaTereta pozicijeBayl : pozicijeBay) {
    if (pozicijeBayl.getNumber() == bay) {
        pozicijeBayPrava = pozicijeBayl;
    }
}
int X = -1;
int Y = -1;
try {
    if (tier < 4) {
        X = pozicijeBayPrava.getBaylPalubaX();
        Y = pozicijeBayPrava.getBaylPalubaY();
    } else {
        X = pozicijeBayPrava.getBaylX();
        Y = pozicijeBayPrava.getBaylY();
        tier = tier - 3;
    }

    Sheet pisanjePodataka = testWork.getSheetAt(0);
    Row rowPisanje = pisanjePodataka.getRow(Y - tier + 1);
    Cell cellPisanje = rowPisanje.getCell(X + row - 1);
    cellPisanje.setCellValue(tezina);
} catch (Exception e) {
    System.out.println("kontejner 20 number: " +
kontejner1.getNumber());
    System.out.println("tier pocetni 20: " + kontejner1.getTier());
    System.out.println("tier 20: " + tier);
    System.out.println("bay 20: " + bay);
    System.out.println("row 20: " + row);
    System.out.println("y 20: " + Y);
    System.out.println("x 20: " + X);
    System.out.println("y red 20: " + (Y - tier + 1));
    System.out.println("x stupac 20: " + (X + row - 1));
    System.out.println("");
    System.out.println("");
}
}

FileOutputStream fileOut = null;
try {
    test.close();
} catch (IOException ex) {
    Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE,
null, ex);
}

try {
    fileOut = new FileOutputStream("Srki NOVOK.xls");
} catch (FileNotFoundException ex) {
    Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE,
null, ex);
}

HSSFFormulaEvaluator.evaluateAllFormulaCells((HSSFWorkbook) testWork);
try {
    testWork.write(fileOut);
} catch (IOException ex) {
    Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE,
null, ex);
}
try {
    fileOut.close();
} catch (IOException ex) {
    Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE,
null, ex);
}
}

```

```

//računanje fitness funkcije
Sheet citanjeZavrsno = testWork.getSheetAt(0);
double alpha1 = 1000;
double alpha2 = 10000;
double alpha3 = 800;
Row citanjeMgCor = citanjeZavrsno.getRow(24);
double mgCor = citanjeMgCor.getCell(1).getNumericCellValue();
Row trimRow = citanjeZavrsno.getRow(25);
double trim = trimRow.getCell(1).getNumericCellValue();
Row MOgMinRow = citanjeZavrsno.getRow(27);
double mOgMin = MOgMinRow.getCell(5).getNumericCellValue();
Row trimFuelRow = citanjeZavrsno.getRow(28);
double trimFuel = trimFuelRow.getCell(5).getNumericCellValue();
Row kutNagibaRow = citanjeZavrsno.getRow(42);
double kutNagiba = kutNagibaRow.getCell(10).getNumericCellValue();
kutNagiba = Math.abs(kutNagiba);

for (ContainerShip kontejner1 : kontejner1l) {
    float tezina = (float) kontejner1.getWeight();
    int size = kontejner1.getSize();
    int bay = kontejner1.getBay();
    int row = kontejner1.getRow();
    int tier = kontejner1.getTier();
    if (size == 40) {
        int bay2 = bay + 2;
        tezina /= 2;
        brojac++;
        PozicijaTereta pozicijeBayPrava = null;
        for (PozicijaTereta pozicijeBay1 : pozicijeBay) {
            if (pozicijeBay1.getNumber() == bay) {
                pozicijeBayPrava = pozicijeBay1;
            }
        }
        int X = -1;
        int Y = -1;
        if (tier < 4) {
            X = pozicijeBayPrava.getBay1PalubaX();
            Y = pozicijeBayPrava.getBay1PalubaY();
        } else {
            X = pozicijeBayPrava.getBay1X();
            Y = pozicijeBayPrava.getBay1Y();
            tier = tier - 3;
        }
    }

    Sheet pisanjePodataka = testWork.getSheetAt(0);
    Row rowPisanje = pisanjePodataka.getRow(Y - tier + 1);
    Cell cellPisanje = rowPisanje.getCell(X + row - 1);
    try {
        cellPisanje.setCellValue(0);
    } catch (Exception e) {
        System.out.println("kontejner 40 number: " +
kontejner1.getNumber());
        System.out.println("tier pocetni 40: " + kontejner1.getTier());
        System.out.println("tier 40: " + tier);
        System.out.println("bay 40: " + bay);
        System.out.println("row 40: " + row);
        System.out.println("y 40: " + Y);
        System.out.println("x 40: " + X);
        System.out.println("y red 40: " + (Y - tier + 1));
        System.out.println("x stupac 40: " + (X + row - 1));
        System.out.println("");
        System.out.println("");
    }

    tier = kontejner1.getTier();
}

```

```

        PozicijaTereta pozicijeBayPrava2 = null;
        for (PozicijaTereta pozicijeBay1 : pozicijeBay) {
            if (pozicijeBay1.getNumber() == bay2) {
                pozicijeBayPrava2 = pozicijeBay1;
            }
        }
        int X2 = -1;
        int Y2 = -1;
        if (tier < 4) {
            X2 = pozicijeBayPrava2.getBay1PalubaX();
            Y2 = pozicijeBayPrava2.getBay1PalubaY();
        } else {
            X2 = pozicijeBayPrava2.getBay1X();
            Y2 = pozicijeBayPrava2.getBay1Y();
            tier = tier - 3;
        }

        Row rowPisanje2 = pisanjePodataka.getRow(Y2 - tier + 1);
        Cell cellPisanje2 = rowPisanje2.getCell(X2 + row - 1);
        try {
            cellPisanje2.setCellValue(0);
        } catch (Exception e) {
            System.out.println("kontejner 40 number: " +
kontejner1.getNumber());
            System.out.println("tier2 pocetni 40: " +
kontejner1.getTier());
            System.out.println("tier2 40: " + tier);
            System.out.println("bay2 40: " + bay);
            System.out.println("row2 40: " + row);
            System.out.println("y2 40: " + Y);
            System.out.println("x2 40: " + X);
            System.out.println("y2 red 40: " + (Y - tier + 1));
            System.out.println("x2 stupac 40: " + (X + row - 1));
            System.out.println("");
            System.out.println("");
        }

    } else {
        PozicijaTereta pozicijeBayPrava = null;
        for (PozicijaTereta pozicijeBay1 : pozicijeBay) {
            if (pozicijeBay1.getNumber() == bay) {
                pozicijeBayPrava = pozicijeBay1;
            }
        }
        int X = -1;
        int Y = -1;
        if (tier < 4) {
            X = pozicijeBayPrava.getBay1PalubaX();
            Y = pozicijeBayPrava.getBay1PalubaY();
        } else {
            X = pozicijeBayPrava.getBay1X();
            Y = pozicijeBayPrava.getBay1Y();
            tier = tier - 3;
        }

        Sheet pisanjePodataka = testWork.getSheetAt(0);
        Row rowPisanje = pisanjePodataka.getRow(Y - tier + 1);
        Cell cellPisanje = rowPisanje.getCell(X + row - 1);
        try {
            cellPisanje.setCellValue(0);
        } catch (Exception e) {
            System.out.println("kontejner 20 number: " +
kontejner1.getNumber());
            System.out.println("tier pocetni 20: " + kontejner1.getTier());
            System.out.println("tier 20: " + tier);
            System.out.println("bay 20: " + bay);
            System.out.println("row 20: " + row);
            System.out.println("y 20: " + Y);

```

```

                System.out.println("x 20: " + X);
                System.out.println("y red 20: " + (Y - tier + 1));
                System.out.println("x stupac 20: " + (X + row - 1));
                System.out.println("");
                System.out.println("");
            }
        }
    }

    FileOutputStream fileOut2 = null;
    try {
        fileOut2 = new FileOutputStream("Srki NOVOK.xls");
    } catch (FileNotFoundException ex) {
        Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE,
null, ex);
    }

    HSSFFormulaEvaluator.evaluateAllFormulaCells((HSSFWorkbook) testWork);
    try {
        testWork.write(fileOut2);
    } catch (IOException ex) {
        Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE,
null, ex);
    }
    try {
        fileOut2.close();
    } catch (IOException ex) {
        Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE,
null, ex);
    }

    int kfi = 0;

    int[][] rowTier = new int[7][6];
    rowTier[0][0] = 168;
    rowTier[0][1] = 162;
    rowTier[0][2] = 156;
    rowTier[0][3] = 150;
    rowTier[0][4] = 144;
    rowTier[0][5] = 138;

    rowTier[1][0] = 162;
    rowTier[1][1] = 156;
    rowTier[1][2] = 150;
    rowTier[1][3] = 144;
    rowTier[1][4] = 138;
    rowTier[1][5] = 132;

    rowTier[2][0] = 156;
    rowTier[2][1] = 150;
    rowTier[2][2] = 144;
    rowTier[2][3] = 138;
    rowTier[2][4] = 132;
    rowTier[2][5] = 126;

    rowTier[3][0] = 150;
    rowTier[3][1] = 144;
    rowTier[3][2] = 138;
    rowTier[3][3] = 132;
    rowTier[3][4] = 126;
    rowTier[3][5] = 120;

    rowTier[4][0] = 144;
    rowTier[4][1] = 138;
    rowTier[4][2] = 132;
    rowTier[4][3] = 126;
    rowTier[4][4] = 120;
    rowTier[4][5] = 114;

```

```

        rowTier[5][0] = 138;
        rowTier[5][1] = 132;
        rowTier[5][2] = 126;
        rowTier[5][3] = 120;
        rowTier[5][4] = 114;
        rowTier[5][5] = 108;

        rowTier[6][0] = 132;
        rowTier[6][1] = 126;
        rowTier[6][2] = 120;
        rowTier[6][3] = 114;
        rowTier[6][4] = 108;
        rowTier[6][5] = 102;

        for (ContainerShip kontejner1 : kontejneri1) {
            int rowCont = kontejner1.getRow();
            int tierCont = kontejner1.getTier();
            fitness += rowTier[rowCont - 1][tierCont - 1];
        }

        if (mgCor > 2.85) {
            alpha1 = 3000;
        } else if (mgCor > 2.80) {
            alpha1 = 2500;
        } else if (mgCor > 2.75) {
            alpha1 = 2000;
        } else if (mgCor > 2.70) {
            alpha1 = 1500;
        }

        if (Math.abs(trim - trimFuel) > 0.1) {
            alpha2 = 20000;
        }

        if (Math.abs(kutNagiba) > 3) {
            alpha3 = 4000;
        } else if (Math.abs(kutNagiba) > 2) {
            alpha3 = 2000;
        }

        fitness += Math.abs((mgCor - m0gMin)) * alpha1 + Math.abs((trim -
trimFuel)) * alpha2 + Math.abs(kutNagiba) * alpha3;
        fitness = 100000 - fitness;
        return fitness;
    }
}

```

Glavni program genetskog algoritma

```

package srkigeneticki;
import com.sun.org.apache.bcel.internal.generic.NEWARRAY;
import java.io.FileInputStream;
import java.io.FileNotFoundException;
import java.io.FileOutputStream;
import java.io.IOException;
import java.io.InputStream;
import java.util.ArrayList;
import java.util.List;
import java.util.logging.Level;
import java.util.logging.Logger;
import org.apache.poi.hssf.usermodel.HSSFCellStyle;
import org.apache.poi.hssf.usermodel.HSSFFont;
import org.apache.poi.hssf.usermodel.HSSFFormulaEvaluator;

```

```

import org.apache.poi.hssf.usermodel.HSSFWorkbook;
import org.apache.poi.hssf.util.HSSFColor;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Cell;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Row;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Sheet;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Workbook;
import org.jgap.Chromosome;
import org.jgap.Configuration;
import org.jgap.FitnessFunction;
import org.jgap.Gene;
import org.jgap.Genotype;
import org.jgap.IChromosome;
import org.jgap.InvalidConfigurationException;
import org.jgap.RandomGenerator;
import org.jgap.impl.DefaultConfiguration;
import org.jgap.impl.IntegerGene;
import org.jgap.impl.StockRandomGenerator;

public class SrkiGeneticki {
    private static int MAX_ALLOWED_EVOLUTIONS = 6;
    public static void main(String[] args) throws Exception {
        InputStream test = new FileInputStream("Srki NOVOK.xls");
        Workbook testWork = new HSSFWorkbook(test);
        Sheet citanjePodataka = testWork.getSheetAt(3);
        List<ContainerShip> kontejneri = new ArrayList<ContainerShip>();
        for (int i = 2; i < 62; i++) {
            Row rowExcel = citanjePodataka.getRow(i);
            int number = 0;
            int size = 0;
            int weight = 0;
            int bay = 0;
            int row = 0;
            int tier = 0;
            int reef = 0;
            int dangerous = 0;
            int destinationPort = 0;
            for (int j = 0; j < 9; j++) {
                Cell cell = rowExcel.getCell(j);
                if (j == 0) {
                    number = (int) rowExcel.getCell(j).getNumericCellValue();
                }
                if (j == 1) {
                    size = (int) rowExcel.getCell(j).getNumericCellValue();
                }
                if (j == 2) {
                    weight = (int) rowExcel.getCell(j).getNumericCellValue();
                }
                if (j == 3) {
                    bay = (int) rowExcel.getCell(j).getNumericCellValue();
                }
                if (j == 4) {
                    row = (int) rowExcel.getCell(j).getNumericCellValue();
                }
                if (j == 5) {
                    tier = (int) rowExcel.getCell(j).getNumericCellValue();
                }
                if (j == 6) {
                    reef = (int) rowExcel.getCell(j).getNumericCellValue();
                }
                if (j == 7) {
                    dangerous = (int) rowExcel.getCell(j).getNumericCellValue();
                }
                if (j == 8) {
                    destinationPort = (int) rowExcel.getCell(j).getNumericCellValue();
                }
            }
            System.out.println("number: " + number);
        }
    }
}

```

```

        ContainerShip container = new ContainerShip(number, size, weight, bay,
row, tier, reef, dangerous, destinationPort);
        kontejneri.add(container);
    }
    test.close();
    for (ContainerShip kontejner1 : kontejneri) {
        System.out.println("broj kontejnera: " + kontejner1.getNumber());
        System.out.println("destinacija: " + kontejner1.getDestinationPort());
        System.out.println("masa: " + kontejner1.getSize());
    }
    Configuration conf = new MyConfiguration(kontejneri);
    conf.setPreservFittestIndividual(true);
    conf.setAlwaysCaculateFitness(true);
    conf.setKeepPopulationSizeConstant(true);
    FitnessFunction myFunc = new MyFitnessFunction(kontejneri);
    conf.setFitnessFunction(myFunc);
    System.out.println("Velicina gena: " + (kontejneri.size() * 3 + 4));
    Gene[] sampleGenes = new Gene[kontejneri.size() * 3 + 4]; //184
    for (int i = 0; i < (kontejneri.size() * 3 + 4); i++) {
        sampleGenes[i] = new IntegerGene(conf, 0, 20);
    }
    Chromosome sampleChromosome = new MyChromosome1(conf, sampleGenes);
    MyChromosome1.kontejneri = kontejneri;
    conf.setSampleChromosome(sampleChromosome);
    conf.setPopulationSize(2500);
    Genotype population = Genotype.randomInitialGenotype(conf);
    population.applyGeneticOperators();
    IChromosome bestSolutionSoFar;
    IChromosome bestSolutionSoFarGeneration = null;
    int maxAtOnce = 0;
    for (int i = 0; i < MAX_ALLOWED_EVOLUTIONS; i++) {
        population.evolve();
        bestSolutionSoFar = population.getFittestChromosome();
        Gene[] genes = bestSolutionSoFar.getGenes();
        double minZ = 100000 - (double) bestSolutionSoFar.getFitnessValue();
        System.out.println((i + 1) + ". generacija:");
        System.out.println("minZ: " + minZ);
        System.out.println("");
        if (i == (MAX_ALLOWED_EVOLUTIONS - 1)) {
            List<ContainerShip> kontejneri1 = new ArrayList<ContainerShip>();
            for (ContainerShip kontejner : kontejneri) {
                ContainerShip kontejner1 = new
ContainerShip(kontejner.getNumber(), kontejner.getSize(),
kontejner.getWeight(), kontejner.getBay(), kontejner.getRow(),
kontejner.getTier(), kontejner.getReef(), kontejner.getDangerous(),
kontejner.getDestinationPort());
                kontejneri1.add(kontejner1);
            }
            int rijekaIndeks = (Integer) genes[0].getAllele();
            int koparIndeks = (Integer) genes[1].getAllele();
            int trstIndeks = (Integer) genes[2].getAllele();
            int drugiIndeks = (Integer) genes[3].getAllele();

            for (ContainerShip kontejner1 : kontejneri1) {
                kontejner1.setBay(((Integer) genes[kontejner1.getNumber() * 3 +
1].getAllele()) * 2 - 1);
                kontejner1.setRow(((Integer) genes[kontejner1.getNumber() * 3 +
2].getAllele()));
                kontejner1.setTier(((Integer) genes[kontejner1.getNumber() * 3 +
3].getAllele()));
            }

            System.out.println("RJEŠENJE:");
            System.out.println("rijekaIndeks1: " + (rijekaIndeks * 2 - 1) + " "
+ ((rijekaIndeks + 1) * 2 - 1));
            System.out.println("koparIndeks1: " + (koparIndeks * 2 - 1) + " " +
((koparIndeks + 1) * 2 - 1));

```



```

        System.out.println("trstIndeks1: " + (trstIndeks * 2 - 1) + " " +
((trstIndeks + 1) * 2 - 1));
        System.out.println("drugiIndeks1: " + (drugiIndeks * 2 - 1) + " " +
((drugiIndeks + 1) * 2 - 1));

        for (ContainerShip kontejner1 : kontejneril) {
            System.out.println("kontejner number: " +
kontejner1.getNumber());
            System.out.println("veličina: " + kontejner1.getSize());
            System.out.println("masa: " + kontejner1.getWeight());
            System.out.println("bay: " + kontejner1.getBay());
            System.out.println("row: " + kontejner1.getRow());
            System.out.println("tier: " + kontejner1.getTier());
            System.out.println("reef: " + kontejner1.getReef());
            System.out.println("dangerous: " + kontejner1.getDangerous());
            System.out.println("destination port: " +
kontejner1.getDestinationPort());
            System.out.println("");
        }
        System.out.println("fitness kraj: " + minZ);
        int number = 1;
        int bay1PalubaX = 47;
        int bay1PalubaY = 21;
        int bay1X = 46;
        int bay1Y = 3;
        List<PozicijaTereta> pozicijeBay = new ArrayList<PozicijaTereta>();
        PozicijaTereta pozicija = new PozicijaTereta(number, bay1PalubaX,
bay1PalubaY, bay1X, bay1Y);
        pozicijeBay.add(pozicija);
        int bay3PalubaX = 37;
        int bay3PalubaY = 21;
        int bay3X = 37;
        int bay3Y = 4;
        number = 3;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay3PalubaX,
bay3PalubaY, bay3X, bay3Y));
        int bay5PalubaX = 37;
        int bay5PalubaY = 29;
        int bay5X = 37;
        int bay5Y = 12;
        number = 5;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay5PalubaX,
bay5PalubaY, bay5X, bay5Y));
        int bay7PalubaX = 28;
        int bay7PalubaY = 21;
        int bay7X = 28;
        int bay7Y = 4;
        number = 7;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay7PalubaX,
bay7PalubaY, bay7X, bay7Y));
        int bay9PalubaX = 28;
        int bay9PalubaY = 29;
        int bay9X = 28;
        int bay9Y = 12;
        number = 9;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay9PalubaX,
bay9PalubaY, bay9X, bay9Y));
        int bay11PalubaX = 19;
        int bay11PalubaY = 21;
        int bay11X = 19;
        int bay11Y = 4;
        number = 11;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay11PalubaX,
bay11PalubaY, bay11X, bay11Y));
        int bay13PalubaX = 19;
        int bay13PalubaY = 29;
        int bay13X = 19;
        int bay13Y = 12;

```

```

        number = 13;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay13PalubaX,
bay13PalubaY, bay13X, bay13Y));
        int bay15PalubaX = 10;
        int bay15PalubaY = 21;
        int bay15X = 10;
        int bay15Y = 4;
        number = 15;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay15PalubaX,
bay15PalubaY, bay15X, bay15Y));
        int bay17PalubaX = 10;
        int bay17PalubaY = 29;
        int bay17X = 10;
        int bay17Y = 12;
        number = 17;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay17PalubaX,
bay17PalubaY, bay17X, bay17Y));
        int bay19PalubaX = -1;
        int bay19PalubaY = -1; //hold
        int bay19X = 2; //deck
        int bay19Y = 4;
        number = 19;
        pozicijeBay.add(new PozicijaTereta(number, bay19PalubaX,
bay19PalubaY, bay19X, bay19Y));

        for (ContainerShip kontejner1 : kontejneril) {
            float tezina = (float) kontejner1.getWeight();
            int size = kontejner1.getSize();
            int bay = kontejner1.getBay();
            int row = kontejner1.getRow();
            int tier = kontejner1.getTier();
            if (tier == 7) {
                System.out.println("TIER 7!!!");
            }
            if (size == 40) {
                int bay2 = bay + 2;
                tezina /= 2;
                PozicijaTereta pozicijeBayPrava = null;
                for (PozicijaTereta pozicijeBay1 : pozicijeBay) {
                    if (pozicijeBay1.getNumber() == bay) {
                        pozicijeBayPrava = pozicijeBay1;
                    }
                }
                int X = -1;
                int Y = -1;
                Sheet pisanjePodataka = testWork.getSheetAt(0);
                try {
                    if (tier < 4) {
                        X = pozicijeBayPrava.getBay1PalubaX();
                        Y = pozicijeBayPrava.getBay1PalubaY();
                    } else {
                        X = pozicijeBayPrava.getBay1X();
                        Y = pozicijeBayPrava.getBay1Y();
                        tier = tier - 3;
                    }
                }

                Row rowPisanje = pisanjePodataka.getRow(Y - tier + 1);
                Cell cellPisanje = rowPisanje.getCell(X + row - 1);
                HSSFCellStyle cellStyle = (HSSFCellStyle) testWork.createCellStyle();
                HSSFFont boldFont = (HSSFFont) testWork.createFont();
                boldFont.setBoldweight(HSSFFont.BOLDWEIGHT_BOLD);
                cellStyle.setFont(boldFont);
                cellStyle.setFillPattern(HSSFCellStyle.SOLID_FOREGROUND);

                cellStyle.setFillForegroundColor(cellPisanje.getCellStyle().getFillForegroundColor());
                cellStyle.setBorderBottom(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
                cellStyle.setBottomBorderColor(new HSSFColor.BLACK().getIndex());

```

```

        cellStyle.setBorderLeft(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
        cellStyle.setLeftBorderColor(newHSSFColor.BLACK().getIndex());
        cellStyle.setBorderRight(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
        cellStyle.setRightBorderColor(newHSSFColor.BLACK().getIndex());
        cellStyle.setBorderTop(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
        cellStyle.setTopBorderColor(newHSSFColor.BLACK().getIndex());

if (kontejner1.getDangerous() == 1) {
    cellStyle.setFillForegroundColor(newHSSFColor.RED().getIndex());
    cellStyle.setFillPattern(HSSFCellStyle.SOLID_FOREGROUND);
}
if (kontejner1.getReef() == 1) {

    cellStyle.setFillForegroundColor(new HSSFColor.AQUA().getIndex());
    cellStyle.setFillPattern(HSSFCellStyle.SOLID_FOREGROUND);
}
cellPisanje.setCellStyle(cellStyle);
cellPisanje.setCellValue(tezina);
    } catch (Exception e) {
System.out.println("kontejner 40 number: " + kontejner1.getNumber());
System.out.println("tier pocetni 40: " + kontejner1.getTier());
System.out.println("tier 40: " + tier);
System.out.println("bay 40: " + bay);
System.out.println("row 40: " + row);
System.out.println("y 40: " + Y);
System.out.println("x 40: " + X);
System.out.println("y red 40: " + (Y - tier + 1));
System.out.println("x stupac 40: " + (X + row - 1));
System.out.println("");
System.out.println("");
    }
    tier = kontejner1.getTier();
    PozicijaTereta pozicijeBayPrava2 = null;
    for (PozicijaTereta pozicijeBay1 : pozicijeBay) {
        if (pozicijeBay1.getNumber() == bay2) {
            pozicijeBayPrava2 = pozicijeBay1;
        }
    }
    int X2 = -1;
    int Y2 = -1;
    try {

        if (tier < 4) {
            X2 = pozicijeBayPrava2.getBay1PalubaX();
            Y2 = pozicijeBayPrava2.getBay1PalubaY();
        } else {
            X2 = pozicijeBayPrava2.getBay1X();
            Y2 = pozicijeBayPrava2.getBay1Y();
            tier = tier - 3;
        }
    }

    Row rowPisanje2 = pisanjePodataka.getRow(Y2 - tier + 1);
    Cell cellPisanje2 = rowPisanje2.getCell(X2 + row - 1);
    HSSFCellStyle cellStyle2 = (HSSFCellStyle) testWork.createCellStyle();
    HSSFFont boldFont = (HSSFFont) testWork.createFont();
    boldFont.setBoldweight(HSSFFont.BOLDWEIGHT_BOLD);
    cellStyle2.setFont(boldFont);
    cellStyle2.setFillPattern(HSSFCellStyle.SOLID_FOREGROUND);
    cellStyle2.setFillForegroundColor(cellPisanje2.getCellStyle().getFillForegroundColor());
    cellStyle2.setBorderBottom(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
    cellStyle2.setBottomBorderColor(newHSSFColor.BLACK().getIndex());
    cellStyle2.setBorderLeft(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
    cellStyle2.setLeftBorderColor(newHSSFColor.BLACK().getIndex());
    cellStyle2.setBorderRight(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
    cellStyle2.setRightBorderColor(newHSSFColor.BLACK().getIndex());
    cellStyle2.setBorderTop(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
    cellStyle2.setTopBorderColor(newHSSFColor.BLACK().getIndex());

```

```

if (kontejner1.getDangerous() == 1) {
    cellStyle2.setFillForegroundColor(new HSSFColor.RED().getIndex());
    cellStyle2.setFillPattern(HSSFCellStyle.SOLID_FOREGROUND);
}
if (kontejner1.getReef() == 1) {
    cellStyle2.setFillForegroundColor(new HSSFColor.AQUA().getIndex());
    cellStyle2.setFillPattern(HSSFCellStyle.SOLID_FOREGROUND);
}
cellPisanje2.setCellStyle(cellStyle2);
cellPisanje2.setCellValue(tezina);
    } catch (Exception e) {
System.out.println("kontejner 40 number: " + kontejner1.getNumber());
System.out.println("tier2 pocetni 40: " + kontejner1.getTier());
        System.out.println("tier2 40: " + tier);
        System.out.println("bay2 40: " + bay);
        System.out.println("row2 40: " + row);
        System.out.println("y2 40: " + Y);
        System.out.println("x2 40: " + X);
        System.out.println("y2 red 40: " + (Y - tier + 1));
        System.out.println("x2 stupac 40: " + (X + row - 1));
        System.out.println("");
        System.out.println("");
    }

    } else {

        PozicijaTereta pozicijeBayPrava = null;
        for (PozicijaTereta pozicijeBay1 : pozicijeBay) {
            if (pozicijeBay1.getNumber() == bay) {
                pozicijeBayPrava = pozicijeBay1;
            }
        }
        int X = -1;
        int Y = -1;
        try {
            if (tier < 4) {
                X = pozicijeBayPrava.getBay1PalubaX();
                Y = pozicijeBayPrava.getBay1PalubaY();
            } else {
                X = pozicijeBayPrava.getBay1X();
                Y = pozicijeBayPrava.getBay1Y();
                tier = tier - 3;
            }

            Sheet pisanjePodataka = testWork.getSheetAt(0);
            Row rowPisanje = pisanjePodataka.getRow(Y - tier + 1);

            Cell cellPisanje = rowPisanje.getCell(X + row - 1);

            HSSFCellStyle cellStyle = (HSSFCellStyle)
testWork.createCellStyle();

            HSSFFont boldFont = (HSSFFont) testWork.createFont();
            boldFont.setBoldweight(HSSFFont.BOLDWEIGHT_NORMAL);
            cellStyle.setFont(boldFont);

cellStyle.setFillPattern(HSSFCellStyle.SOLID_FOREGROUND);

cellStyle.setFillForegroundColor(cellPisanje.getCellStyle().getFillForegroundColor(
));
            cellStyle.setBorderBottom(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
            cellStyle.setBottomBorderColor(new
HSSFColor.BLACK().getIndex());
            cellStyle.setBorderLeft(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
            cellStyle.setLeftBorderColor(new
HSSFColor.BLACK().getIndex());

```

```

        cellStyle.setBorderRight(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
        cellStyle.setRightBorderColor(new
HSSFColor.BLACK().getIndex());
        cellStyle.setBorderTop(HSSFCellStyle.BORDER_THIN);
        cellStyle.setTopBorderColor(new
HSSFColor.BLACK().getIndex());

        if (kontejner1.getDangerous() == 1) {
            cellStyle.setFillForegroundColor(new
HSSFColor.RED().getIndex());
cellStyle.setFillPattern(HSSFCellStyle.SOLID_FOREGROUND);

        }
        if (kontejner1.getReef() == 1) {
cellStyle.setFillForegroundColor(new HSSFColor.AQUA().getIndex());
cellStyle.setFillPattern(HSSFCellStyle.SOLID_FOREGROUND);
        }
        cellPisanje.setCellStyle(cellStyle);
        cellPisanje.setCellValue(tezina);
    } catch (Exception e) {
        System.out.println("kontejner 20 number: " +
kontejner1.getNumber());
        System.out.println("tier pocetni 20: " +
kontejner1.getTier());
        System.out.println("tier 20: " + tier);
        System.out.println("bay 20: " + bay);
        System.out.println("row 20: " + row);
        System.out.println("y 20: " + Y);
        System.out.println("x 20: " + X);
        System.out.println("y red 20: " + (Y - tier + 1));
        System.out.println("x stupac 20: " + (X + row - 1));
        System.out.println("");
        System.out.println("");
    }
}

FileOutputStream fileOut = null;

try {
    fileOut = new FileOutputStream("Srki NOVOK.xls");
} catch (FileNotFoundException ex) {

Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
}
HSSFFormulaEvaluator.evaluateAllFormulaCells((HSSFWorkbook)
testWork);

try {
    testWork.write(fileOut);
} catch (IOException ex) {

Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
}

try {
    fileOut.close();
} catch (IOException ex) {

Logger.getLogger(MyFitnessFunction.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
}

Sheet citanjeZavrsno = testWork.getSheetAt(0);
double alpha1 = 1000;
double alpha2 = 10000;
double alpha3 = 800;

```

```

Row citanjeMgCor = citanjeZavrsno.getRow(24);
double mgCor = citanjeMgCor.getCell(1).getNumericCellValue();
Row trimRow = citanjeZavrsno.getRow(25);
double trim = trimRow.getCell(1).getNumericCellValue();
Row M0gMinRow = citanjeZavrsno.getRow(27);
double m0gMin = M0gMinRow.getCell(5).getNumericCellValue();
Row trimFuelRow = citanjeZavrsno.getRow(28);
double trimFuel = trimFuelRow.getCell(5).getNumericCellValue();
Row kutNagibaRow = citanjeZavrsno.getRow(42);
double kutNagiba = kutNagibaRow.getCell(10).getNumericCellValue();
kutNagiba = Math.abs(kutNagiba);

System.out.println("nagib: " + kutNagiba);
System.out.println("Trim: " + trim);
System.out.println("mgCor: " + mgCor);

if (mgCor > 2.85) {
    alpha1 = 3000;
}else if (mgCor > 2.80) {
    alpha1 = 2500;
} else if (mgCor > 2.75) {
    alpha1 = 2000;
}else if (mgCor > 2.70) {
    alpha1 = 1500;
}

if (Math.abs(trim - trimFuel) > 0.1) {
    alpha2 = 20000;
}

if (Math.abs(kutNagiba) > 3) {
    alpha3 = 4000;
}else if (Math.abs(kutNagiba) > 2) {
    alpha3 = 2000;
}

System.out.println("alpha1: " + alpha1);
System.out.println("alpha2: " + alpha2);
System.out.println("alpha3: " + alpha3);

double vrijemeIskrcaja = minZ - Math.abs((mgCor - m0gMin)) * alpha1 -
Math.abs((trim - trimFuel)) * alpha2 - Math.abs(kutNagiba) * alpha3;
System.out.println("Vrijeme iskrcaja: " + vrijemeIskrcaja);

    }

}

}

```

Konfiguracija genetskog algoritma

```

package srkigeneticki;

import java.util.List;
import org.jgap.*;
import org.jgap.event.*;
import org.jgap.impl.BestChromosomesSelector;
import org.jgap.impl.CauchyRandomGenerator;
import org.jgap.impl.ChromosomePool;
import org.jgap.impl.CrossoverOperator;
import org.jgap.impl.GABreeder;
import org.jgap.impl.GaussianRandomGenerator;
import org.jgap.impl.MutationOperator;
import org.jgap.impl.StandardPostSelector;
import org.jgap.impl.StockRandomGenerator;

```

```

import org.jgap.impl.ThresholdSelector;
import org.jgap.impl.TournamentSelector;
import org.jgap.impl.WeightedRouletteSelector;
import org.jgap.util.*;

public class MyConfiguration
    extends Configuration implements ICloneable {
    public List<ContainerShip> kontejneri;
    public MyConfiguration(List<ContainerShip> kontejneri) {
        this("", "", kontejneri);
    }
    public MyConfiguration(String a_id, String a_name, List<ContainerShip> kontejneri)
    {
        super(a_id, a_name);
        try {
            this.kontejneri = kontejneri;
            setBreeder(new GABreeder());
            setRandomGenerator(new StockRandomGenerator());
            setEventManager(new EventManager());
            BestChromosomesSelector bestChromsSelector = new
            BestChromosomesSelector(this, 0.75d);
            bestChromsSelector.setDoubletteChromosomesAllowed(true);
            addNaturalSelector(bestChromsSelector, true);
            setMinimumPopSizePercent(100);
            setSelectFromPrevGen(0.75d);
            setKeepPopulationSizeConstant(true);
            setFitnessEvaluator(new DefaultFitnessEvaluator());
            setChromosomePool(new ChromosomePool());
            MyCrossoverOperator2 m = new MyCrossoverOperator2(this, 0.7d);
            m.kontejneri = this.kontejneri;
            addGeneticOperator(m);
            addGeneticOperator(new MyMutationOperator1(this, 1));
        } catch (InvalidConfigurationException e) {
            throw new RuntimeException(
                e.getMessage()
            );
        }
    }
}

```

Transformacija dobivenog plana u Excel

```

package srkigeneticki;
class PozicijaTereta {
    int number;
    int bay1PalubaX;
    int bay1PalubaY;
    int bay1X;
    int bay1Y;
    public PozicijaTereta(int number, int bay1PalubaX, int bay1PalubaY, int bay1X,
    int bay1Y) {
        this.number = number;
        this.bay1PalubaX = bay1PalubaX;
        this.bay1PalubaY = bay1PalubaY;
        this.bay1X = bay1X;
        this.bay1Y = bay1Y;
    }

    public int getNumber() {
        return number;
    }

    public void setNumber(int number) {
        this.number = number;
    }

    public int getBay1PalubaX() {

```

```

        return bay1PalubaX;
    }

    public void setBay1PalubaX(int bay1PalubaX) {
        this.bay1PalubaX = bay1PalubaX;
    }

    public int getBay1PalubaY() {
        return bay1PalubaY;
    }

    public void setBay1PalubaY(int bay1PalubaY) {
        this.bay1PalubaY = bay1PalubaY;
    }

    public int getBay1X() {
        return bay1X;
    }

    public void setBay1X(int bay1X) {
        this.bay1X = bay1X;
    }

    public int getBay1Y() {
        return bay1Y;
    }

    public void setBay1Y(int bay1Y) {
        this.bay1Y = bay1Y;
    }
}

```