

Optimizacija raspodjele vezova i obalnih dizalica na lučkim kontejnerskim terminalima

Grubišić, Neven

Doctoral thesis / Disertacija

2013

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:570016>

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

Neven Grubišić

**OPTIMIZACIJA RASPODJELE VEZOVA I
OBALNIH DIZALICA NA LUČKIM
KONTEJNERSKIM TERMINALIMA**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2013.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

Neven Grubišić

**OPTIMIZACIJA RASPODJELE VEZOVA I
OBALNIH DIZALICA NA LUČKIM
KONTEJNERSKIM TERMINALIMA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof.dr.sc. Čedomir Dundović
Komentor: Prof.dr.sc. Svjetlana Hess

Rijeka, 2013.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF MARITIME STUDIES AT RIJEKA

Neven Grubisic

**OPTIMISATION OF BERTH AND QUAY
CRANE ALLOCATION IN PORT
CONTAINER TERMINALS**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2013

Mentor rada: Prof.dr.sc. Čedomir Dundović

Doktorski rad obranjen je dana 5.prosinca 2013. godine na Pomorskom fakultetu u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Dr.sc. Svjetlana Hess, redovita profesorica Pomorskog fakulteta u Rijeci, predsjednik
2. Dr.sc. Čedomir Dundović, redoviti profesor Pomorskog fakulteta u Rijeci, mentor i član
3. Dr.sc. Ines Kolanović, docentica Pomorskog fakulteta u Rijeci, član
4. Dr.sc. Renato Ivče, docent Pomorskog fakulteta u Rijeci, član
5. Dr.sc. Elen Twrdy, izvanredna profesorica Fakulteta za pomorstvo in promet, Portorož, član

SAŽETAK:

U radu su istraženi operativni logistički problemi koji se javljaju prilikom obavljanja tehnoloških procesa u obalnom podsustavu lučkih kontejnerskih terminala. Cilj istraživanja je strukturirati optimizacijski model u svrhu potpore taktičkom planiranju na lučkim kontejnerskim terminalima do 1 milijun kontejnera godišnje koji su tipični za šire regionalno okruženje. U užem smislu optimizacijski model rješava problem kod različitih tlocrtnih konfiguracija lučkih pristana gdje su dva pristana postavljena prostorno neovisno.

Kao rezultat istraživanja razvijen je integrirani model optimizacije kod neovisno postavljenih pristana za kompletan obalni podsustav koji objedinjuje tri tipska problema: problem dodjele veza, problem raspodjele dizalica i problem redoslijeda prekrcajnih operacija, a predstavljen je optimizacijskim procesom u tri faze: inicijalizacije, raspoređivanja i usklađivanja. Tipično obilježje procesa je izbor optimalnog scenarija prekrcaja koji se dobije kao rezultat optimizacijske funkcije definirane ukupnim najkraćim vremenom boravka brodova u luci i optimalnog iskorištenja kapaciteta prihvatnih i prekrcajnih resursa. Kao rezultat optimizacije za svaki brod se odabiru tri najbolja scenarija prekrcaja, ovisno o rasporedu tereta na brodu i specifičnim zahtjevima brodara.

Za razvoj modela korištene su metode operacijskih istraživanja: metode linearnog i cjelobrojnog programiranja te metoda asignacije. Model je testiran na temelju simuliranih dolazaka brodova na uzorku od 100 brodova raspoređenim u grupe po 10, 15 i 20 brodova sukladno očekivanom vremenskom horizontu planiranja. Dobiveni rezultati pokazuju primjenljivost modela za rješavanje taktičko-operativnih problema u obalnom podsustavu ciljanih lučkih kontejnerskih terminala.

SUMMARY:

The present paper addresses the tactical logistical problems in the seaside subsystem of port container terminals. The research goal is to structure optimization model to support tactical planning in maritime container terminals with annual capacity below 1 million TEU per year, which are typical for wider regional environment. In the narrow sense, the optimization model solves the problem with different basin layouts where two quays are placed independently.

As a result of research, an integrated optimization model has been developed for the seaside subsystem that combines three typical logistical problems: Berth Allocation Problem, Quay Crane Assignment Problem and Quay Crane Scheduling Problem. The model is represented by the optimization process to takes up in three stages: initialization, allocation and synchronization. A typical feature of the process is the selection of the optimal handling scenario which is obtained as a result of the optimization function defined by the minimum total service time of ships in port and the optimum utilization of the quay cranes capacity. As a result of the optimization, for each ship the best suite handling scenario is selected among three pre-defined options, depending on the stowage location onboard and depending on specific requirements of shippers.

The methods of operations research has been used in the developing models, that is, methods of linear and integer programming and the assignment method. The model is tested on a sample of 100 virtually generated vessels with simulated stochastic times of arrivals and cargo handling demand. Vessels are arranged in groups of 10, 15 and 20 in accordance with the expected time horizon planning. The results show the applicability of the model for solving tactical operational problems in the seaside subsystem of targeted port container terminals.

Ključne riječi:

problem dodjele veza, raspodjela dizalica, redoslijed prekrcajnih operacija, optimizacija kontejnerskih terminala, operativno planiranje na kontejnerskim terminalima, logistika kontejnerskih terminala.

Key words:

berth allocation problem, quay crane scheduling problem, optimization of container terminal, container terminal operation planning, container terminal logistics.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKT ISTRAŽIVANJA.....	2
1.2. ZNANSTVENA HIPOTEZA I POMOĆNE HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA	4
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA.....	5
1.4. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	6
1.4.1. Radovi iz kategorije BAP optimizacije.....	7
1.4.2. Radovi iz kategorije QCAP optimizacije.....	11
1.4.3. Radovi iz kategorije QCSP optimizacije.....	13
1.4.4. Važniji radovi iz područja planiranja kontejnerskih terminala	15
1.5. ZNANSTVENE METODE ISTRAŽIVANJA.....	17
1.6. STRUKTURA DOKTORSKOG RADA.....	18
2. KONTEJNERSKI TERMINAL KAO PROIZVODNI SUSTAV.....	20
2.1. RAZVOJ KONTEJNERSKOG PROMETA.....	20
2.2. STRUKTURA KONTEJNERSKOG TERMINALA KAO PROIZVODNOG SUSTAVA	22
2.3. VRSTE I TEHNIČKA SVOJSTVA PREKRCAJNIH SREDSTAVA LKT	24
2.4. TEHNOLOŠKI PROCESI NA LKT	27
3. PLANIRANJE LUČKIH KONTEJNERSKIH TERMINALA.....	30
3.1. KLASIFIKACIJA PLANIRANJA.....	30
3.2. PLANIRANJE PROSTORA ZA IZGRADNJU LKT	31
3.3. KAPACITET VEZOVA	37
4. OPTIMIZACIJA OBALNOG PREKRCAJNOG PODSUSTAVA LKT	42
4.1. PROBLEM DODJELE VEZA (BAP PROBLEM)	42
4.1.1. Definiranje problema	42
4.1.2. Model za rješavanje BAP problema.....	47
4.2. PROBLEM RASPOREĐIVANJA OBALNIH DIZALICA	55
4.2.1. Definiranje problema	55
4.2.2. Model integriranog rješavanja BAP i QCAP problema	57
4.2.3. Integrirani model optimizacije raspodjele vezova i obalnih dizalica uz ograničenu dubinu mora uz pristan.....	60

4.3. PROBLEM REDOSLIJEDA RADA OBALNIH DIZALICA	66
4.3.1. Definiranje problema	66
4.3.2. Model s dvosmjernim kretanjem dizalica bez dijeljenja zadatka	67
4.3.3. Utjecaj smjera kretanja dizalica na optimalno rješenje.....	81
4.3.4. Iskorištenje kapaciteta dizalica kod određivanja redoslijeda rada	84
4.3.5. Model s jednosmjernim kretanjem dizalica uz dijeljenje zadatka	87
5. INTEGRALNI MODEL OPTIMIZACIJE ZA NEZAVISNE PRISTANE.....	93
5.1. POJAM NEZAVISNIH PRISTANA I KONFIGURACIJA TERMINALA	93
5.2. METODOLOGIJA OPTIMIZACIJE	95
5.3. INICIJALIZACIJA – DEFINIRANJE SCENARIJA PREKRCAJA.....	98
5.4. RASPOREĐIVANJE - IZBOR PRISTANA, MJESTA I VREMENA PRIVEZA	99
5.5. USKLAĐIVANJE.....	105
6. TESTIRANJE MODELA I ANALIZA REZULTATA.....	120
6.1. GENERIRANJE PODATAKA	120
6.2. REZULTATI DOBIVENI RJEŠAVANJEM QCSP MODELA.....	129
6.3. RJEŠAVANJE INTEGRALNOG BAP I QCAP MODELA ZA NEZAVISNE PRISTANE	136
6.4. POSTOPTIMALNA ANALIZA REZULTATA	144
7. ZAKLJUČAK.....	153
LITERATURA (REFERENCE)	158
BIBLIOGRAFIJA	163
POPIS TABLICA	173
POPIS SLIKA.....	174
PRIVITAK 1: PROGRAMSKE SKRIPTE	176
PRIVITAK 2: GENERIRANI PODACI I DOBIVENI REZULTATI.....	199

1. UVOD

Kontejnerski terminali predmet su brojnih znanstvenih istraživanja kojima je svrha unaprijediti efikasnost sustava i kvalitetu usluge. Razlog takvog interesa je kontinuirani rast kontejnerskog prometa u svijetu u odnosu na promet drugih vrsta tereta, što zahtijeva brze prilagodbe sustava zahtjevima korisnika. Međutim, transport kontejnera posebno unutrašnji transport na kontejnerskim terminalima i tehnološki procesi prekrcaja i skladištenja, vrlo su slični proizvodnim procesima u individualnoj proizvodnji. Iz tog razloga optimizacijski problemi koji se javljaju pri taktičkom planiranju tehnoloških procesa na kontejnerskim terminalima imaju sličnost s problemima koji se javljaju u proizvodnim procesima poput problema pakiranja, krojenja ili redoslijeda rada strojeva.

Planiranje lučkih kontejnerskih terminala moguće je podijeliti na tri segmenta: strateško planiranje, taktičko planiranje i operativno planiranje. Pri tome se taktičko i operativno planiranje sadržajno bitno ne razlikuju. Razlike se uglavnom svode na vremensku komponentu i vremenski horizont planiranja.

Strateško planiranje odnosi se na fazu izgradnje novih ili modernizaciju postojećih kapaciteta i obuhvaća dimenzioniranje komponenti terminala. Za njegovu provedbu važno je poznavati unutarne i vanjske čimbenike koji mogu pozitivno ili negativno djelovati na razvitak terminala te zahtjeve funkcionalnosti i tehničke kvalitete. Strateško planiranje kod lučkih kontejnerskih terminala uključuje: planiranje optimalnog broja pristana, optimalnog broja kontejnerskih mostova na pristanu, zatim određivanje statičkog i dinamičkog kapaciteta terminala, određivanje potrebnih površina slagališta za kontejnere, broja portalnih prijenosnika na slagalištu, broja i vrste prijevoznoprekrcajnih sredstava za transportne operacije između pristana i slagališta itd.

Taktičko i operativno planiranje kod lučkih kontejnerskih terminala uključuje mjesečno, tjedno i dnevno planiranje koje obuhvaća brojne operativne postupke koji se odvijaju na terminalu. U okviru taktičkog i operativnog planiranja izdvajaju se specifični problemi koji se javljaju na kontejnerskim terminalima, a koje nije moguće empirijski riješiti.

Takvi problemi zahtijevaju primjenu jedne ili više metoda optimizacije poznatih iz teorije operacijskih istraživanja.

Problem, predmet i objekt istraživanja postavljeni su u odnos s obzirom na navedene vrste planiranja pri čemu je naglasak stavljen na taktičko i operativno planiranje.

1.1. Problem, predmet i objekt istraživanja

Lučki kontejnerski terminali sastoje se od triju glavnih komponenti koje se, s obzirom na funkcionalnost, nazivaju još i podsustavima terminala. To su: obalni prekrcajni podsustav ili podsustav operativne obale, podsustav slagališta te kopneni prekrcajni podsustav. Za funkcionalnost terminala potrebno je međusobno uskladiti navedene podsustave, a prvi korak u ostvarivanju tog cilja je funkcionalno dizajnirati tehnološke procese na operativnoj obali tako da se optimalno iskoriste lučki resursi. To je važno jer je upravo ta komponenta dominantna za ocjenu kvalitete rada terminala, posebno u odnosu na brodare koji su glavni korisnici luke.

Funkcionalni dizajn obuhvaća optimalnu raspodjelu lučkih resursa. Pod resursima se ovdje prvenstveno misli na pristane i vezove za prihvat brodova te obalne kontejnerske dizalice koje uslužuju brodove. Prilikom najave dolaska broda u luku potrebno je unaprijed isplanirati mjesto i vrijeme priveza broda te dodijeliti brodu odgovarajući broj dizalica, ovisno o teretu koji se planira ukrcati ili iskrcati s broda. Vrijeme boravka broda u luci pri tom je kritični i dominantni čimbenik kod ocjene konkurentnosti i kvalitete lučke usluge. Iz tog razloga nastoji se to vrijeme što je moguće više skratiti, a često ga se postavlja kao mjerilo ispunjavanja ugovornih obveza između brodara i lučkog operatera.

Kako bi se operativna mjerila ispunila, potrebno je dobro uskladiti planove ukrcaja/iskrcaja tereta s operaterom na terminalu. Svrha tog usklađivanja je optimalno iskorištavanje kapaciteta lučkih obalnih dizalica i učinkovitost lučkog obalnog prekrcajnog podsustava. Problem koji se tu javlja je kako najbolje rasporediti kontejnerske dizalice po pristanu, a da se pri tom ostvare operativna mjerila.

Nabrojani elementi funkcionalnog dizajna tehnoloških procesa na kontejnerskom terminalu, odvijaju se u okviru taktičkog i operativnog planiranja. Taktičke probleme koji se javljaju na kontejnerskim terminalima moguće je razvrstati na sljedeći način:

- problem dodjeljivanja veza brodu ili „*Berth Allocation Problem*“, skraćeno BAP,
- problem raspoređivanja obalnih dizalica po brodovima ili „*Crane Allocation Problem*“, skraćeno QCAP,
- problem određivanja redoslijeda rada obalnih dizalica po brodu ili „*Quay Crane Scheduling Problem*“, skraćeno QCSP.

Problem dodjele veza sastoji se u tome da se svakom brodu, ovisno o predviđenom vremenu dolaska, odredi mjesto na pristanu tj. pridruži odgovarajući segment pristana. Problem raspoređivanja obalnih dizalica po brodovima treba osigurati dovoljan broj dizalica po brodu da bi se omogućilo odvijanje prekrcajnih operacija u predviđenom vremenu. Redoslijed prekrcajnih operacija određuje se ovisno o rasporedu tereta na brodu i operativnom planu iskrcaja/ukrcaja kontejnera. Plan predstavljaju zadaci ili aktivnosti koje obalne kontejnerske dizalice moraju izvršiti određenim redoslijedom kako bi se ispunio zadani cilj, a najčešće je to što raniji završetak prekrcajnog procesa.

Navedena tri temeljna problema, BAP, QCAP i QCSP, objedinjuju zadatak koji se postavlja u odnosu na problem istraživanja. Potrebno je probleme sintetizirati tako da se ostvari cilj optimizacijske funkcije s obzirom na ukupno vrijeme boravka brodova u luci, uzimajući u obzir specifičnu konfiguraciju lučkih kontejnerskih pristana.

Tradicionalni pristup projektiranju lučkih vezova pretpostavlja određivanje fiksnih pozicija u odnosu na obalu (pristan) čija duljina je određena na temelju očekivane veličine broda. Tako određene pozicije predstavljaju vezove, a takva konfiguracija pristana naziva se konfiguracija pristana s fiksnim vezovima.

S obzirom da veličina kontejnerskih brodova koji dolaze u luku može znatno varirati, tradicionalni pristup ne osigurava optimalno iskorištenje pristana. Zbog toga se, suprotno tradicionalnom načinu projektiranja i označavanja vezova, pristan određuje kao kontinuirani vez gdje se svakom brodu dodjeljuje prostor ovisno o njegovoj duljini. U tom slučaju radi se o konfiguraciji pristana s kontinuiranim vezovima. Međutim, pristan je moguće podijeliti na dovoljan broj diskretnih pozicija dovoljno male duljine tako da se može osigurati bolje iskorištenje obale.

U ovom doktorskom radu istražuju se modaliteti rješavanja operativnih problema koji se javljaju u obalnom prekrcajnom podsustavu, na lučkim kontejnerskim terminalima

manje i srednje veličine, u odnosu na prostornu konfiguraciju pristana. Istraživanje je usmjereno na rješavanje pojedinačnih problema i na njihovu integraciju kako bi se osigurala optimizacija na funkcionalnoj razini. Predmet istraživanja su kontejnerski terminali ukupnog kapaciteta do 1 milijun TEU-a godišnje i njihov obalni prekrcajni podsustav. Istražuju se varijante optimizacije po različitim kriterijima koji se javljaju u procesu transporta i konceptualni model kao integralno rješenje za terminale s nezavisnim pristanima odnosno nezavisne terminale.

Objekt istraživanja ovog rada su tehnološki procesi u sklopu obalnog prekrcajnog podsustava lučkog kontejnerskog terminala. Oni obuhvaćaju procese planiranja dolazaka i odlazaka brodova, izradu planova priveza broda, raspodjelu vremena rada i planove rada obalnih dizalica te grupne i pojedinačne prekrcajne aktivnosti.

1.2. Znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze istraživanja

U skladu s definiranim problemom i predmetom istraživanja postavlja se radna hipoteza istraživanja koja glasi:

Moguće je optimizirati raspodjelu vezova i obalnih kontejnerskih dizalica po brodovima na lučkim kontejnerskim terminalima s nezavisnim pristanima, primjenom metode linearnog programiranja, sa svrhom minimiziranja ukupnog vremena boravka brodova u luci.

U okviru postavljene znanstvene hipoteze moguće je istraživanje usmjeriti u nekoliko smjerova raščlanjivanjem problema i definiranjem nekoliko pomoćnih hipoteza:

1. Moguće je dobiti optimalno rješenje za problem dodjele veza za različite konfiguracije lučkih kontejnerskih terminala neovisno o prostornoj dispoziciji pristana.
2. Model problema dodjele veza za nezavisne pristane moguće je prilagoditi različitim prometno-tehničkim uvjetima i funkcionalnim zahtjevima korisnika.
3. Raspodjela obalnih dizalica po brodovima na pristanu osigurava garantiranu kvalitetu usluge u odnosu na brodarku, uz optimalno iskorištenje ukupno raspoloživog vremena rada u smjeni.

4. Rješavanjem problema redoslijeda prekrcajnih operacija moguće je optimalno rasporediti dizalice po brodu i dodijeliti prekrcajne zadatke u ovisnosti o rasporedu tereta na brodu.
5. Relaksacijom modela optimizacije moguće je povećati praktičnu primjenljivost modela, uvažavajući prometno-tehnološke specifičnosti i obilježja manjih i srednjih kontejnerskih terminala, bez da se ugrozi vjerodostojnost modela.
6. Korištenjem heurističkih metoda mogu se ubrzati i olakšati postupci traženja optimalnog rješenja.

U prilog potvrdi postavljene znanstvene hipoteze mogu poslužiti dosadašnja istraživanja koja su usmjerena na terminale kod kojih su pristani projektirani pravolinijski s velikim brojem vezova, što je obilježje velikih kontejnerskih terminala. Na manjim i srednjim terminalima, koji su prostorno nezavisni ili su im pristani međusobno fizički odvojeni, također postoji potreba za optimalnim rasporedom brodova po vezovima te potreba da se prekrcajni procesi planiraju tako da se minimizira boravak brodova u luci i da se što bolje iskoriste lučki resursi. Bez obzira na različitost uvjeta u kojima kontejnerski terminali ostvaruju svoju funkciju, svi oni imaju isti cilj i na jednak način moraju osigurati kvalitetu usluge u odnosu na korisnike, ponajprije u odnosu na brodare.

Potvrda postavljene hipoteze ovisi o složenosti problema s obzirom na mogućnost dobivanja optimalnog rješenja. Kako se u slučaju nezavisnih pristana radi o većem broju varijabli odlučivanja u odnosu na konvencionalni oblik pristana, istraživanje je ograničeno na manje i srednje kontejnerske terminale kakvi su uobičajeni u jadranskom i mediteranskom okruženju.

1.3. Svrha i ciljevi istraživanja

Svrha istraživanja je rješavanje parcijalnih problema koji se javljaju u obalnom prekrcajnom podsustavu lučkih kontejnerskih terminala i njihova sistemska integracija kroz programska rješenja u ovisnosti o funkcionalnom dizajnu terminala. Glavni cilj istraživanja je strukturirati model optimizacije obalnog prekrcajnog podsustava na lučkim kontejnerskim terminalima s diskontinuiranim tj. nezavisnim pristanima kojim će se olakšati taktičko i operativno planiranje na terminalu.

Funkcionalnost optimizacijskog procesa provjerit će se transformacijom matematičkih modela u programski kod, pri čemu će se koristiti programski alati specijalizirani za rješavanje problema linearnim programiranjem. Za ostvarivanje svrhe i cilja istraživanja postavljeni su sljedeći zadaci istraživanja:

- analizirati i sistematizirati dosadašnja teorijska i empirijska istraživanja iz područja optimizacije tehnoloških procesa na lučkim kontejnerskim terminalima,
- utvrditi različite varijante i kriterije o kojima ovisi struktura optimizacijske funkcije,
- utvrditi vrste ograničenja za svaki pojedinačni problem,
- postaviti modele optimizacije za pojedinačne probleme (BAP, QCAP i QCSP) ovisno o odabranoj strukturi objektne funkcije i postavljenim ograničenjima,
- transformirati matematičke modele u programski kod,
- strukturirati integralno rješenje problema,
- provjeriti funkcionalnost rješenja eksperimentom na temelju simuliranih dolazaka brodova.

1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja

Razvoj metoda kojima se omogućuje efikasnija eksploatacija kontejnerskih terminala od samih početaka kontejnerizacije u središtu je interesa brojnih istraživača, kako iz područja tehnologije prometa, tako i iz drugih znanstvenih disciplina. S obzirom na sustavna obilježja lučkih kontejnerskih terminala i sličnost tehnoloških obilježja lučkih procesa s onima iz industrije i teorije tokova materijala, znanstveni radovi mogu se grupirati u dvije osnovne kategorije, ovisno o metodološkom pristupu prema radnom procesu i rezultatima koji se očekuju. Prvoj kategoriji pripadaju radovi optimizacije u kojima se traženjem ekstrema funkcije cilja istražuje vrijednost ulaznih sistemskih varijabli na temelju konstruiranog modela procesa. U drugu kategoriju pripadaju radovi koji se temelje na simulaciji procesa gdje se varijacijom ulaznih parametara i modela istražuju vrijednosti izlaznih sistemskih varijabli.

Radovi u kojima se istražuju operativni problemi koji su usmjereni na taktičko planiranje tehnoloških procesa, prema raspoloživoj bibliografiji, dominiraju u odnosu na strateške probleme planiranja. Problemi optimizacije koji su predmet istraživanja ovog

doktorskog rada u priličnoj su mjeri zastupljeni u znanstvenim publikacijama, a dominiraju autori s područja dalekog istoka. No, kada je riječ o domaćoj znanstvenoj literaturi, taktičko-operativni problemi vrlo rijetko su predmet znanstvenih istraživanja. Dominiraju radovi koji se u osnovi bave strateškim problemima planiranja lučkih terminala i strateškim odlučivanjem u planiranju sustava.

U nastavku se daje pregled radova prema kategorijama problema koji su predmet istraživanja ovog rada.

1.4.1. Radovi iz kategorije BAP optimizacije

Postoje dva osnovna tipa problema dodjele vezova koji su predmet istraživanja. To su problem s fiksnim ili diskretnim vezovima (BAPD) i problem s promjenjivom duljinom veza koji se još naziva i kontinuirani problem dodjele veza (BAPC). Kod diskretnih vezova pristan je podijeljen na segmente točno određene duljine pri čemu jedan brod zauzima cijelom svojom duljinom jedan vez. Kod kontinuiranih vezova pozicije veza nisu fiksno određene, već brod zauzima dio pristana koji odgovara njegovoj duljini. Kontinuirani vezovi mogu biti projektirani i kao sekcije proizvoljne duljine pri čemu jedan brod zauzima više sekcija, tj. zauzima samo onoliko sekcija koliko mu je potrebno, dok su preostale sekcije slobodne za privez drugih brodova.

Drugi bitan kriterij po kojem se dijele radovi optimizacije vezova, proizlazi iz obilježja sustava u odnosu na problem koji se promatra. Po tom kriteriju problem se istražuje kao statički i dinamički problem dodjele veza. Kod statičkog problema vremena dolazaka brodova u sustav odgovaraju početku vremenskog horizonta planiranja. Dinamički problem dodjele veza rješava slučajeve kada brodovi dolaze u luku i ulaze u sustav u bilo kojem trenutku za vrijeme vremenskog horizonta planiranja.

Prvi autori koji su obradili problem s diskretnim vezovima jesu Imai et al. (2001) te Nishimura et al. (2001). U prvom radu autori predstavljaju problem javnih luka u Japanu pri čemu naglašavaju nedovoljno iskorištenje vezova. Da bi se povećala efikasnost predlažu uvođenje dinamičkog plana dodjele vezova kojim bi se smanjila potreba za većim brojem vezova uz zadržavanje postojeće kvalitete usluge. Postavljena optimizacijska funkcija minimizira ukupno vrijeme boravka brodova na vezu tako da određuje najraniji vremenski termin kada vez postaje slobodan. U tu svrhu brodovi su

grupirani u grupe za svaki vez. Ovako formuliran problem koji je orijentiran na iskorištenje vezova, a ne na kvalitetu usluge prema brodarima, uzima u obzir kumulativno vrijeme prekrcajnih operacija. Prezentirane su dvije varijante modela, statička i dinamička, a obje varijante pretpostavljaju fiksne duljine vezova. Za rješavanje modela prikazan je heuristički algoritam temeljen na Lagrangeovoj relaksaciji.

U drugom radu autori kao cilj optimizacije utvrđuju ukupno vrijeme boravka brodova u luci. Budući da je vrijeme prekrcajnih operacija unaprijed poznato, optimizacija je svedena na određivanje vremena priveza čime je onda određeno i vrijeme čekanja broda. Ovaj problem formuliran je kao nelinearni problem jer su varijable odlučivanja u ograničenjima postavljene kao međusobni produkt. Da bi se omogućilo rješavanje problema, autori su predložili odgovarajući genetski algoritam.

Problem koji se javlja s fiksnim vezovima uočili su Cordeau et al. (2005) koji su cilj optimizacije dodjele vezova sagledavali sa stajališta terminal operatera, želeći postići što manje praznog hoda u usluživanju brodova između dva sukcesivna dolaska na vez. Za svaki vez diskretnog tipa određen je niz brodova koji se trebaju uslužiti pri čemu je odlučujući čimbenik za određivanje redoslijeda - vrijeme završetka prekrcajnog procesa broda prethodnika. Ograničenje fiksnih vezova, kod brodova koji moraju zauzeti veću duljinu pristana od duljine pojedinačnog veza, pokušali su riješiti heuristički, transformacijom u problem s kontinuiranim vezovima.

Istraživanje s kontinuiranim vezovima prvi put spominje Lim (1998). U radu se plan priveza brodova zasniva na određivanju pozicije broda na pristanu koja je promjenljiva s obzirom na duljinu broda. Cilj je prostor između brodova što više smanjiti i time maksimalno iskoristiti pristan. Kao ulazne veličine uzimaju se duljina broda, vrijeme dolaska broda u luku i trajanje prekrcajnog procesa. Uz ove veličine, uzimaju se u obzir minimalno dopuštene udaljenosti između susjednih brodova na pristanu te udaljenost brodova od rubova pristana. Problem je transformiran u *2D-packing* problem gdje se traži optimalni raspored po osima y i x koje predstavljaju poziciju broda na pristanu i vremenski horizont planiranja.

Kim i Moon (2003) problem dodjele veza optimiziraju uzimajući u obzir preferiranu poziciju na pristanu. Odstupanja od te pozicije povećavaju udaljenost koju trebaju proći

transportna sredstva između broda i lokacije na slagalištu gdje su smješteni kontejneri pa se optimizacija svodi na usporedbu troškova u ovisnosti o odabranom vezu.

Za razliku od njih Guan i Cheung (2004) uvrštavaju koeficijent prioriteta o kojem ovisi rezultat optimizacije. Uvođenjem koeficijenta prioriteta nisu svi brodovi ravnopravno tretirani, već oni s većim prioritetom imaju manju vjerojatnost da će čekati na slobodan vez. No, zanimljivost ovog rada je što su brodovi podijeljeni u grupe ovisno o predviđenom vremenu dolaska. Ovakva podjela ima praktičnu primjenu jer je teško potpuno točno predvidjeti vrijeme dolaska nekoliko dana unaprijed. Umjesto toga određuju se vremenska razdoblja, time windows, na temelju kojih je onda moguće grupirati brodove.

Kontejnerski terminali koji nisu namijenjeni određenom brodaru, nego su pod jednakim uvjetima dostupni svima, obilježja su javnih luka. Ovakvo načelo zastupaju japanski autori nazivajući ih terminalima u višekorisničkom okruženju gdje problemu dodjele veza treba pristupiti na način da se što bolje iskoristi prostor pristana (Imai *et al.*, 2005, 2007a, 2007b). Pri tome na terminal dolaze brodovi različitih veličina kojima nije unaprijed određeno mjesto na terminalu, već lokacija na koju će se brod vezati ovisi o rezultatima optimizacije.

Autori navode kako fiksni vezovi nisu najbolje rješenje, već se problem treba riješiti na način da se pristan promatra kao kontinuirani prostor. Model koji je razrađen ima za cilj minimizirati vrijeme boravka broda u luci. Za njegovo rješavanje predložena je heuristička metoda koja se temelji na dvostupanjskom rješavanju problema. U prvom stupnju rješava se problem s diskretnim vezovima, a u drugom stupnju se koristi tzv. BAPC heuristika za dobivanje rješenja s kontinuiranim vezovima. BAPC heuristika se sastoji u tome da se brodovi slažu po vremenskom redoslijedu priveza na temelju BAP rješenja s diskretnim vezovima te da se potom oni čije se pozicije preklapaju repozicioniraju tako da se pri tom ne mijenjaju pozicije ni vremena priveza prethodno složenih brodova. Brodovi se dijele na tzv. brodove s visokim prioritetom i brodove s niskim prioritetom. Brodovi s visokim prioritetom su oni kojima promjena pozicije na pristanu, u odnosu na optimalnu, znatno utječe na produljenje vremena prekrcaja, zbog položaja kontejnera na terminalu u odnosu na poziciju broda na pristanu. Prioritet se ne utvrđuje na osnovu pripadnosti određenom brodaru.

Isti autori nude zanimljivo rješenje u slučaju kada na terminal dolaze brodovi različitih veličina, brodovi matice i *feeder* brodovi. Formulirana su dva problema. Prvi ne uzima u obzir razlike u veličini brodova koji konkuriraju za vez pa se radi o konvencionalnom problemu dodjele veza na višekorisničkim terminalima (BAPM). Matematički model rješava problem s diskretnim vezovima, ali omogućuje da dva broda mogu dijeliti isti vez čime se nastojalo pojednostaviti problem, a da se istovremeno u određenoj mjeri poboljša prostorno iskorištenje pristana. Predložena je modificirana varijanta modela kod koje mega kontejnerski brodovi imaju apsolutni prioritet i forsira se njihov vez odmah po dolasku.

U drugom slučaju predviđeni su posebni vezovi za mega kontejnerske brodove pa je problem prikazan kao problem dodjele veza s namjenskim vezovima (BAPI). Ukoliko je, međutim, namjenski vez slobodan i nije predviđen dolazak mega kontejnerskog broda u određenom razdoblju, njega je moguće dodijeliti *feeder* brodovima. Međutim, ovdje se ipak radi o slučaju koji je specifičan s obzirom na oblik lučkog bazena.

Drugačiji pristup imaju Moorthy i Teo (2006) kojima je glavni kriterij za optimizaciju vezova količina tereta namijenjenog za ukrcaj/iskrcaj. Pri tom pretpostavljaju da brodovi s većom količinom tereta imaju veći prioritet od onih koji imaju manje tereta što opet dovode u vezu s komercijalnim uvjetima poslovanja u odnosu na pojedine brodare. Posebnost ovog rada je što je predložena optimizacija po dva kriterija koja se temelji na pojmu tzv. domaćeg veza. Domaći vez dodjeljuje se u sklopu taktičkog planiranja kod najave dolaska broda, a svodi se na to da se isti dodjeljuje brodovima istog broдача kad god je to moguće. Na taj način žele se minimizirati troškovi premještanja i alokacije kontejnera na terminalu, ponajprije u slučajevima prekrcajnih procesa brod-slagalište-brod, tj. kada se obavlja *transshipping*. Model ima za cilj optimizirati vrijeme čekanja broda na slobodan vez i troškove koji ovise o dispoziciji kontejnera na terminalu i brodova na vezu u slučajevima direktnog ili indirektnog prekrcaja s broda na brod. Kod toga se vrednuje sposobnost povezivanja obalnog i slagališnog podsustava u odnosu na pojedinog broдача te elastičnost modela. Elastičnost je definirana otpornošću taktičko-operativnog plana na promjene koje nastaju kao posljedica neravnomjernosti dolazaka brodova i odstupanja od očekivanih vrijednosti. Ovakvim pristupom autori naglašavaju važnost dinamičkog sagledavanja problema dodjele veza.

Dva rada su specifična s obzirom na kriterije funkcije optimizacije koja je postavljena. Prvi je rad autora Du et al. (2011) koji problem optimizacije formuliraju na temelju varijabilnog određivanja vremena dolaska broda u korelaciji s potrošnjom goriva broda. Autori objašnjavaju kako nije samo važno minimizirati vrijeme čekanja broda, nego je potrebno uskladiti vremena dolaska brodova. Elaboriraju se razlike u strategijama s obzirom na obilježja parametra koji definira vrijeme dolaska broda u luku. U osnovi postoje dvije strategije: prva, kod koje je vrijeme dolaska konstantna i unaprijed određena veličina te druga, kod koje je vrijeme dolaska varijabilno i u modelu predstavlja varijablu odlučivanja. Kod varijabilnog određivanja vremena dolaska važno je uočiti relaciju između vremena dolaska, brzine broda i potrošnje goriva. Autori su formulirali nelinearni model koji uspostavlja relaciju između potrošnje goriva i vremena dolaska broda u luku te su isti transformirali u tzv. MISOCP *Mixed integer second order cone programming* model.

Drugi je rad autora Xu et al. (2012) koji formuliraju problem dodjele veza uzimajući u obzir ograničenja dubine na vezovima te ograničenja uslijed plime i oseke. Za ograničenje morskih mijena postavljena su dva intervala koja se periodički izmjenjuju, interval visokih voda i interval niskih voda. Uzima se u obzir statička i dinamička varijanta problema dodjele veza, a cilj je minimizirati ukupno vrijeme brodova u luci uz pretpostavku da je trajanje prekrcaja fiksno i unaprijed određeno za svaki brod.

Na kraju analize radova iz područja problematike dodjele vezova, prema dostupnim bibliografskim izvorima, treba spomenuti jedan rad domaćih autora Gudelj, Krčum i Twrđy (2010). U tom radu predstavljen je model temeljen na simulaciji diskretnih događaja korištenjem Petrijevih mreža i genetskog algoritma. Cilj je dobiti sekvencijalni raspored brodova na pristanu koji minimizira ukupne gubitke zbog vremenskih oscilacija dolazaka brodova u luku. Simulacija funkcionalno oponaša proces dolazaka brodova po FIFO (*First-In-First-Out*) principu gdje su vezovi fiksni, a penalizira se odstupanje od preferirane pozicije na pristanu, dolazak ranije od najavljenog vremena dolaska te kašnjenje dolaska broda.

1.4.2. Radovi iz kategorije QCAP optimizacije

Rješavanje problema dodjele obalnih dizalica brodovima ima za cilj optimalno rasporediti raspoložive dizalice na pristanu uz uvjet zadovoljavanja transportne

potražnje za prekrcajom koja je određena količinom tereta namijenjenog za ukrcaj/iskrcaj, a prema planovima ukrcaja/iskrcaja. Iz navedenog uvjeta jasno je da problem ovisi o konkretnom planu tereta za pojedini brod što znači da je ovaj problem u direktnoj korelaciji s problemom dodjele veza. Drugim riječima, rezultat dobiven rješavanjem BAP problema predstavlja ulazni parametar za QCAP optimizaciju. Ključno pitanje je pri tom na koji se način tretira veličina kojom se određuje trajanja prekrcaja, da li kao parametar ili kao varijabla odlučivanja. Zbog neposredne povezanosti ova dva problema većinom se u literaturi obrađuju integralno.

Ovisnost pozicije i vremena veza o raspoloživosti obalnih dizalica postavili su kao uvjet optimizacije Zhou i Kang (2008). Ovdje je zauzeto stajalište da je za bolje rezultate optimizacije nužno napustiti načelo po kojem se brodovi prihvaćaju po redoslijedu dolaska. Umjesto toga uvedeno je tzv. prihvatljivo vrijeme čekanja za svaki brod koje predstavlja maksimalno izgubljeno vrijeme koje je prihvatljivo za pojedini brod, ovisno o njegovim obilježjima i zahtjevima brodara. Vremena dolaska broda i vremena trajanja prekrcajnih operacija definirana su unaprijed, ali kao očekivane vrijednosti slučajnih varijabli za koje je moguće odabrati željenu vjerojatnost. Ovako formuliran model više je orijentiran na obalne dizalice, nego na brod jer se njime brodovi prilagođavaju vremenu rada dizalica.

Kod modela kojeg su formulirali Imai et al. (2008), vrijeme prekrcajnog procesa je unaprijed određeno kao i zahtijevani broj dizalica po brodu. Taj broj je stalan i nepromjenjiv za čitavo vrijeme prekrcaja. Stoga proces prekrcaja ne može započeti dok nije osiguran dovoljan broj dizalica za rad. Problem je rješavan u dva koraka gdje se u prvom koraku rješava problem dodjele veza pomoću genetskog algoritma, a u drugom koraku se rješava problem dodjeljivanja dizalica po vezovima pomoću razvijenog heurističkog algoritma. Po dobivanju rezultata genetskim algoritmom, ispituje se je li zadovoljen uvjet dovoljnog broja dizalica za obavljanje prekrcajnog procesa. Ukoliko to nije slučaj i pojedini brod ne dobije dovoljan broj dizalica, njegov privez se odgađa dok zahtijevani broj dizalica ne bude raspoloživ.

Problem dodjele veza i alokacije obalnih kontejnerskih dizalica s pozicije jednog lučkog operatera koji upravlja s više terminala u luci elaborirali su Hendriks et al. (2011). Cilj je uravnoteženje opterećenja obalnih kontejnerskih dizalica i minimizacija transporta

kontejnera među terminalima. Problem se definira kao *multiple-job-on-one processor* ili problem višestrukih procesnih zadataka, gdje proces predstavljaju terminali, a zadatke predstavljaju brodovi. Problem je podijeljen u dva dijela. U prvom se dijelu rješava dodjela veza i osiguravanje dovoljnog broja dizalica kao garancija da prekrcajni proces neće trajati dulje od predviđenoga. U drugom se dijelu razmatra mogućnost preraspodjele brodova po terminalima u ovisnosti o lučkoj logistici. Kod planiranja dolazaka brodova pretpostavljeno je da brodovi dolaze po strogo definiranom redu plovidbe. Drugim riječima, dolasci su potpuno deterministički.

Integrirani problem dodjele veza i raspodjele dizalica razvio je Meisel (2009) i definirao ga pod nazivom BACAP. Integrirano rješenje temelji se na varijabilnom vremenu prekrcajnog procesa, ovisno o broju pridruženih dizalica, a zbog različitih obilježja vremenskih varijabli optimizacijska funkcija svedena je na troškovnu komponentu. Glavni problem koji se javlja kada trajanje prekrcaja predstavlja varijablu odlučivanja jest aproksimacija ravnomjernog prekrcajnog učinka obalnih dizalica što pretpostavlja homogen raspored tereta po brodskim skladištima. Meisel nastoji problem u što većoj mjeri približiti realnoj situaciji, uvodeći prosječnu stopu iskorištenja kapaciteta dizalice kao ograničenje funkcije optimizacije. U tu svrhu autor je razvio posebne heurističke metode rješavanja i usporedio rezultate s matematičkim rješenjem.

1.4.3. Radovi iz kategorije QCSP optimizacije

Problem optimizacije redoslijeda rada obalnih kontejnerskih dizalica temelji se na planovima ukrcaja/iskrcaja kontejnera svakog pojedinog broda u kojima su obilježene pozicije na kojima su smješteni i označeni kontejneri za ukrcaj/iskrcaj. Potrebno je pronaći optimalni redoslijed rada dizalica što u najvećem brojem slučajeva znači što raniji završetak prekrcajnih operacija da bi se omogućilo isplavljenje broda.

Problem redoslijeda rada obalnih dizalica prvi je obradio Daganzo (1989). Autor je klasičan problem paralelnog rada strojeva na jednom procesu, poznatom iz industrije, preslikao na lučke obalne dizalice i brodove. Kao cilj optimizacije postavljeno je najmanje ukupno vrijeme kašnjenja broda u odnosu na predviđeno vrijeme završetka prekrcajnog procesa. S obzirom da se radi o prvom radu s ovom tematikom, postavljeni model ima više teoretsko značenje budući da se nisu uzela u obzir važna tehnička ograničenja poput opsega kretanja dizalica ili nemogućnosti pretjecanja i ometanja.

Prilikom izrade modela opravdano je polaziti od činjenice da su planovi slaganja tereta na brodu napravljeni tako da su kontejneri grupirani prema luci iskrcaja i prema njihovim tehničkim obilježjima. Ovo vrijedi u mjeri u kojoj je moguće tako nešto ostvariti s obzirom na tehnička i maritimna obilježja broda i sigurnosne zahtjeve. U slučaju ukrcaja kontejnera na brod vrijedi isto pravilo. Ukoliko su kontejneri iz iste grupe složeni tako da zauzimaju susjedne ili bliske pozicije tj. odjeljke (*bays*), takve pozicije predstavljaju tzv. klaster. Dakle, klaster predstavlja skup susjednih ili bliskih pozicija odnosno odjeljaka u kojima su složeni ili će biti složeni kontejneri iz iste grupe. Ideju o klasterima, u kontekstu rješavanja problema rasporeda obalnih dizalica, prvi su razradili Kim i Park (2004) s ciljem postizanja optimalnog rješenja problema. Oni su svakom klasteru pridružili jedan zadatak pri čemu zadatak podrazumijeva ukrcaj ili iskrcaj kontejnera na pozicije u okviru zajedničkog klastera. Aktivnost je neprekidna za čitav klaster što znači da zadatak završava kada obalna dizalica ukrca i iskrca sve kontejnere u tom klasteru. Funkcija cilja određena je kao minimizacija težinskih suma najkraćeg vremena za izvršenje svih aktivnosti na brodu i pojedinačnih vremena završetka prekrcajnih zadataka kontejnerskih dizalica. Problem je rješavan matematički uz pomoć računala i softvera LINDO/PC, a predložena su i heuristička rješenja problema.

Model koji prilikom rješavanja QCSP uzima u obzir poziciju broda na pristanu prvi su razradili Liu et al. (2005). Rezultat dobiven rješenjem BAP problema korišten je kao ulazni podatak. U većini radova koji se odnose na rješavanje problema dodjele veza, podrazumijeva se da je vrijeme prekrcajnog procesa unaprijed poznato i određeno. To vrijeme pretpostavljeno je na temelju podataka o broju kontejnera za ukrcaj/iskrcaj i na temelju poznatog normativa tehnološkog procesa tj. proizvodnosti rada. Međutim, u toj aproksimaciji nije moguće točno znati hoće li se predviđeni broj obalnih dizalica, a samim tim i zadana produktivnost, moći ostvariti. Autori su u tom radu predstavili heurističku dekompoziciju problema na dvije razine: model na razini broda i model na razini veza. Prva razina određuje najkraće vrijeme trajanja prekrcajnog procesa za određeni broj obalnih dizalica pridruženih brodu i predstavlja u osnovi rješenje problema redoslijeda. Druga razina uzima u obzir sve brodove na terminalu. Na toj razini se samo određuje kojem brodu će se pridružiti pojedina dizalica, a ne i na kojem dijelu broda tj. na kojim zadacima će raditi.

Nastavak istraživanja QCSP rezultiralo je uvrštavanjem u modele ograničenja ometanja dizalica kod istovremenog rada na susjednim aktivnostima (Lim *et al.*, 2004; Zhu & Lim, 2005; Zhu, Yi & Lim, 2011). Ograničenje je formulirano na način da se susjedne dizalice i aktivnosti ne mogu križati. Primjena modela nije ograničena na kontejnerske mostove, nego ga je moguće primijeniti i na konvencionalne obalne dizalice kada se želi uzeti u obzir međusobno ometanje dizalica. U kontekstu kontejnerskih mostova ograničenje u biti onemogućuje pretjecanje dizalica jer kontejnerski mostovi nemaju mogućnost rotacije pa je klasično križanje trajektorija u radu nemoguće. Funkcija optimizacije ima za cilj određivanje najranijeg završetka posljednje aktivnosti u nizu. Osim matematičkog modela u radovima su predložene metode grananja i ograničavanja *branch and bound* te metoda simuliranog kaljenja.

Na kraju treba spomenuti rad autora Lee *et al.* (2008) koji su formulirali prilagođeni problem raspodjele dizalica po brodu za kontejnerske mostove. Radni zadaci i kontejnerske dizalice hijerarhijski su postavljeni od niže prema višoj vrijednosti. Uvažavajući postavljeni osnovni raspored, ograničenja onemogućavaju pomicanje prekrcajnog mosta na zadatak koji je po hijerarhiji iznad prethodnog zadatka na način da se preskače zadatak susjedne dizalice. Isto tako važno je spomenuti da su autori vrijeme kretanja dizalica, kod prelaska s jednog na drugi zadatak, ignorirali s obzirom da se radi o relativno kratkom vremenu u odnosu na ukupno trajanje prekrcajnog procesa. U pogledu funkcije optimizacije autori nisu odstupili od prethodnih radova. I u ovom slučaju cilj je minimizirati vrijeme završetka posljednjeg zadatka u nizu. U drugom dijelu rada prikazan je razvijeni genetski algoritam za rješavanje problema redoslijeda.

1.4.4. Važniji radovi iz područja planiranja kontejnerskih terminala

Iako je predmet istraživanja ovog rada optimizacija obalnog prekrcajnog podsustava, potrebno je sagledati cjelinu problematike planiranja kontejnerskih terminala i procesa koji se na njima odvijaju. Opsežnu klasifikaciju radova s obzirom na različite podsustave kontejnerskih terminala i razine planiranja napravili su Vis i Koster (2003). Autori razlučuju tri razine planiranja: stratešku, taktičku i operativnu, te klasificiraju radove s obzirom na predmet istraživanja.

U eksploataciji kontejnerskog terminala potrebno je svakodnevno donositi odgovarajuće odluke koje se odnose na upravljanje pojedinim podsustavima kontejnerskog terminala i

koje utječu na funkcionalnost čitavog terminala. Važnost donošenja odluka na funkcionalnost kompletnog sustava LKT naglašavaju Twrđy i Beškovnik (2008) te predlažu model procesa odlučivanja koji se sastoji od tri interaktivna modula: prognoziranja, simulacije te planiranja uz optimizaciju proizvodnih parametara.

Uočavajući odnose između pojedinih podsustava terminala i pripadajućih optimizacijskih problema te promatrajući čitav terminal kao sustav, Murty et al. (2005) tvrde da se radi o višeobjektnom problemu kod kojega je zbog kompleksnosti i neizvjesnosti ishoda parcijalnih rješenja nemoguće napraviti jedinstveni matematički model optimizacije. Čak kad bi se takav model i napravio bio bi izrazito nefleksibilan za praktičnu primjenu. Zbog toga autori preferiraju istraživanja koja idu u smjeru rješavanja parcijalnih optimizacija za pojedine podsustave, nakon čega je moguće izvršiti finu prilagodbu pojedinih komponenti zahtjevima sustava.

Pojedini autori problematici optimizacije na kontejnerskim terminalima pristupaju primjenjujući teoriju redova čekanja pri čemu se nastoji odrediti najbolja konfiguracija terminala. Ovakav pristup dominantan je u domaćim znanstvenim izvorima (Zenzerović, 1995, 2005; Dundović & Zenzerović, 2000; Dundović & Hess, 2005; Zenzerović & Vilke, 2011). Na temelju tehnoloških obilježja i očekivanog prometa testiraju se različite konfiguracije terminala, te dobivaju rezultati koji pokazuju u kojoj mjeri je sustav optimalan i koje je uvjete potrebno ispuniti za postizanje optimalne propusnosti. Ovakav pristup prije svega je pogodan kod donošenja strateških odluka vezanih uz programiranje tehnoloških procesa i uz planiranje izgradnje i modernizacije kontejnerskih terminala te dimenzioniranje komponenti pojedinih podsustava terminala, a manje za rješavanje operativnih problema.

Drugo, vrlo bitno obilježje radova domaćih autora je pristup problematici koji se temelji na optimizaciji ukupnih lučkih troškova koji uključuju troškove luke (terminala) i troškove brodaru (Zenzerović, 1995). Ovakav pristup imaju također Park i Dragović (2009) koji nastoje simulacijom tehnoloških procesa postići efikasnost terminala s ciljem da se dobiju što manji ukupni troškovi. Treba, međutim, naglasiti da takav pristup na kontejnerskim terminalima ima svoje slabosti s obzirom na aktualne zahtjeve pomorskog tržišta i odnose brodar – lučki operater koji se temelje na postizanju što veće

kvalitete lučke usluge u odnosu na korisnika i prilagodbu pružatelja lučke usluge zahtjevima tržišta tj. zahtjevima broдача.

S obzirom da dinamiku promjene kontejnerskog prometa i tržišta prijevoza, u lukama su također nužne prilagodbe. To se ponajprije odnosi na funkcionalne zahtjeve u pogledu tehničkih i eksploatacijskih obilježja, tehnologije rada, veličine i dimenzija terminala. Navedeni zahtjevi predmet su strateškog planiranja kontejnerskih terminala koji su obrađeni u brojnim znanstvenim publikacijama (United Nations Conference on Trade and Development, 1985; Dundović, 2002; Tsinker, 2004; Brinkmann, 2005; Maritime Navigation Commission, 2008; Thoresen, 2010).

Na kraju treba spomenuti radove domaćih autora koji obrađuju probleme operativnog planiranja u kontejnerskom transportu, a nisu usko vezani uz optimizaciju lučkih tehnoloških procesa. U ovim radovima, u cijelosti ili djelomično, koriste se metode linearnog programiranja i optimizacijska funkcija u rješavanju praktičnih problema koji se javljaju u transportu kontejnera.

Kos i Zenzerović (2003, 2004) obrađuju problematiku prijevoza kontejnera s ciljem optimalnog iskorištavanja kapaciteta broда i distribucije kontejnera po lukama ukrcaja i iskrcaja prema različitim kriterijima. Zenzerović i Bešlić (2003) u radu prikazuju modeliranje problema prijevoza raznovrsnog tereta jednim prijevoznim sredstvom iz jednog ishodišta do jednog ili više odredišta. Matematički model takvog problema može imati različite oblike, često s nelinearnom funkcijom cilja i ograničenjima u obliku linearne ili nelinearne funkcije za koji se optimalno rješenje dobiva metodom dinamičkog programiranja. Zenzerović (2005) predstavlja kvantitativne metode za optimalnu funkcionalnost sustava pa između ostalog prikazuje dva matematička modela: prvi za prijevoz praznih kontejnera, a drugi za određivanje optimalne strukture prijevoza tereta kontejnerskim brodom. Oba modela temelje se na rješavanju navedenih operativnih problema metodom linearnog programiranja.

1.5. Znanstvene metode istraživanja

Tijekom provedbe znanstvenog istraživanja korištene su standardne znanstvene metode: induktivna metoda, deduktivna metoda, metoda analize i sinteze, metoda klasifikacije, metoda deskripcije, metoda kompilacije te metoda komparacije.

Glavni dio istraživanja koji se odnosi na optimizaciju obalnog prekrcajnog procesa i postupak dokazivanja postavljene hipoteze temeljen je na metodi modeliranja i primjeni matematičkih metoda, prvenstveno iz znanstvene discipline operacijskih istraživanja, metode linearnog i cjelobrojnog programiranja. Prilikom testiranja modela korištena je metoda simulacije, uz primjenu teorije vjerojatnosti i teorije redova čekanja.

S obzirom na obilježje kontejnerskih terminala, u istraživanju je na odgovarajući način korištena teorija sustava kao znanstvena metoda. Prilikom definiranja koncepta optimizacije, postavljanja modela za rješavanje individualnih taktičko-operativnih optimizacijskih problema te njihovo objedinjavanje kroz sistemsku integraciju, primijenjen je metodološki postupak sistemskog inženjeringa.

Prilikom dokazivanja hipoteze korištene su deduktivna metoda, eksperimentalna metoda te metoda uzoraka. Eksperimentalna metoda zasnovana je na slučajno generiranom uzorku brodova i njihovih tehničko-operativnih parametara na temelju kojih su simulirani njihovi dolasci, a dobivene vrijednosti su poslužile kao ulazni parametri za optimizacijsku funkciju. Na kraju je napravljena komparacija dobivenih rezultata i potrebnih resursa za dobivanje optimalnog rješenja za različite razine kompleksnosti problema.

Za transformaciju matematičkih modela u programski kod i njihovo rješavanje korišteni su programski alati AIMMS s pripadajućim solverima¹ za linearno programiranje te LINGO/12, akademska verzija. Za kreiranje programskih skripti za generiranje uzorka brodova i tereta te simulaciju dolazaka brodova korišten je programski jezik R. Za potrebe znanstvenog istraživanja korištena je raspoloživa i dostupna znanstvena bibliografija.

1.6. Struktura doktorskog rada

Rad je konceptualno sastavljen od 7 poglavlja i 2 privitka. Nakon uvodnog dijela dat je prikaz kontejnerskog terminala kao proizvodnog sustava s kratkim pregledom razvoja kontejnerskog prometa te prikaz glavnih obilježja kontejnerskog terminala kao proizvodnog sustava i tehnoloških procesa na LKT. Strateško planiranje obrađeno je u

¹ Matematički program za rješavanje optimizacijskih problema

trećem poglavlju s prikazom analitičkih postupaka koji se koriste pri planiranju operativnih površina i određivanju kapaciteta vezova.

U četvrtom poglavlju postavljeni su temeljni modeli na kojima se zasniva optimizacija obalnog prekrcajnog podsustava. Izdvojena su tri osnovna problema: problem dodjele veza, problem raspodjele obalnih dizalica i problem određivanja redoslijeda rada obalnih dizalica. Svaki od navedenih problema obrađen je uz primjenu odgovarajućih modificiranih rješenja prilagođenih predmetu i cilju istraživanja. Naglasak je stavljen na integrirano rješenje BAP i QCAP problema te na kreiranje modela za rješavanje QCSP problema uz optimalno iskorištenje resursa.

U petom poglavlju predstavljen je integrirani model optimizacije za nezavisne pristane s pripadajućom metodologijom optimizacije u tri faze. Predložena metoda temelji se na izboru tri scenarija i dva nezavisna pristana. Na primjerima je prikazana funkcionalnost integriranog modela.

U šestom poglavlju izvršeno je testiranje modela i analiza rezultata. U tu svrhu izrađene su posebne programske skripte za generiranje podataka o brodovima i raspoređivanje tereta po brodovima. Napravljena je simulacija dolazaka brodova i prekrcajne potražnje kako bi se na temelju toga izvršilo testiranje integriranog modela optimizacije. Na kraju je izvršena analiza dobivenih rezultata i postoptimalna analiza.

U zaključku su objedinjeni kompletni rezultati istraživanja te su isti postavljeni u odnos s postavljenom hipotezom i pomoćnim hipotezama.

U dva privitka priložene su tablice s generiranim podacima o brodu i teretu, rezultati parcijalnih modela optimizacije te listovi izrađenih programskih skripti korištenih u radu.

2. KONTEJNERSKI TERMINAL KAO PROIZVODNI SUSTAV

2.1. Razvoj kontejnerskog prometa

Kontejneri su danas uobičajeni način transporta generalnog tereta čija uniformnost, fleksibilnost i čvrstoća konstrukcije osiguravaju jednostavan, efikasan i siguran način prijevoza bez obzira na udaljenost. U gotovo 50 godina od inovacije čiji je tvorac Malcolm McLean, američki prijevoznik-poduzetnik škotskog porijekla², kontejneri su postali nezamjenjivi do te mjere da je danas nemoguće zamisliti transport robe bez njih. Prvi kontejnerski brod bio je Ideal-X. Na svom prvom putovanju iz Newarka (New Jersey) do Houstona prevezao je 58 kontejnera (35 stopa prema tadašnjem standardu).



Slika 1: Modeli brodova: Ideal-X – prvi prenamijenjeni brod za prijevoz kontejnera (1956.) i Maersk Triple-E (2013.) najnovija klasa kontejnerskih brodova

Izvor: www.spiegel.de i www.maerskline.com, 2013.

Tijekom pola stoljeća kapaciteti kontejnerskih brodova konstantno su se povećavali, sve do današnje Triple-E klase od 18.000 TEU. Veličina kontejnerskih brodova (Tablica 1) utjecala je na razvoj kontejnerskih luka tako da su luke gubile ili dobivale bitku na tržištu, ovisno o tome koliko su se brzo prilagodile novim zahtjevima transporta.

² Malcolm je, kako je sam izjavio, došao na ideju o kontejneru dok je vozio vlastiti kamion 1937. godine. Promatrao je kako radnici iskrcavaju njegov kamion u luci i bale s pamukom ukrcaju na brod. Pri tom je uočio da se gubi puno vremena dok se bale ne povežu bragama, ukrcaju na brod te brage ponovno oslobode za prihvrat novih bala. Nezadovoljan time razmišljao je kako čitavi kamion ukrcati na brod i potom ga s teretom iskrcati u odredišnoj luci. Malcolm je kasnije osnovao Sea-Land Shipping, prvog kontejnerskog brodarka.

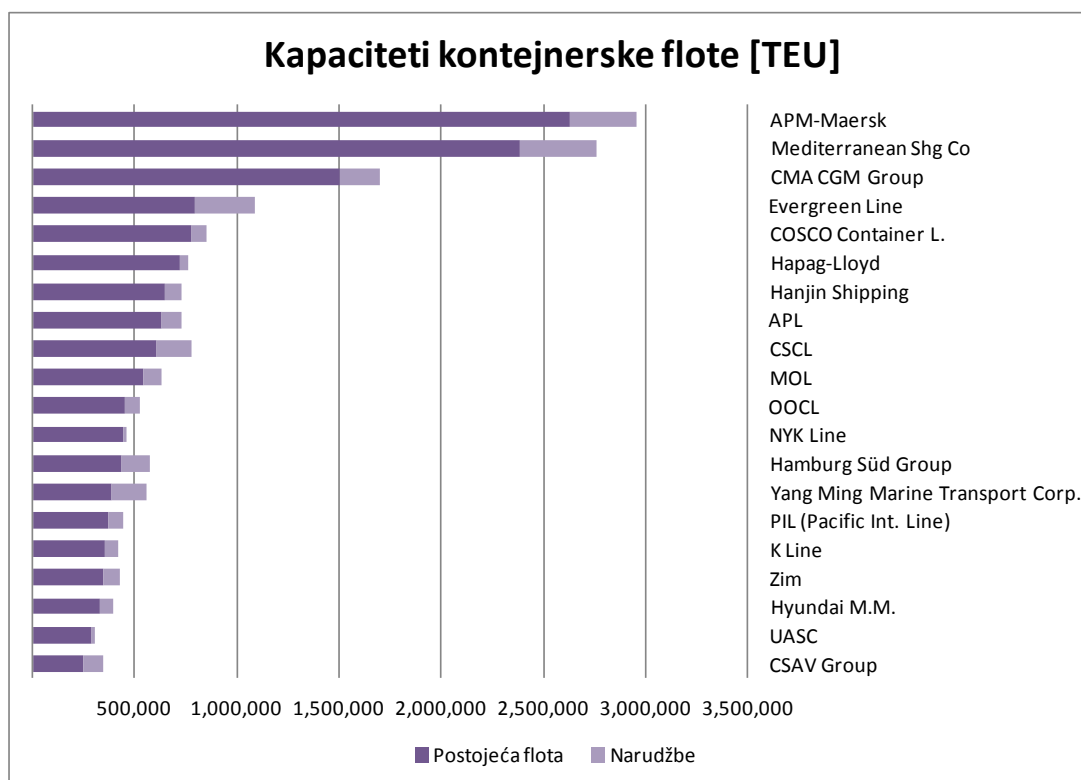
Veličina brodova posljedica je ekonomije razmjera s ciljem postizanja što nižih jediničnih troškova po TEU jedinici. Međutim, ukoliko je iskorištenje kapaciteta mega kontejnerskih brodova manje od 90% , prednost manjeg jediničnog troška zbog veličine broda se poništava. Danas u svijetu plovi oko 5.000 kontejnerskih brodova ukupnog kapaciteta preko 17 milijuna TEU-a (Slika 2) .

Tablica 1: Razvoj kontejnerskih brodova

	Klase kontejnerskih brodova	Godina gradnje	Kapacitet (TEU)	Duljina (m)	Širina (redova)	Gaz (m)
1.	Višenamjenski brodovi	1960.	< 1000	135-200	6-8	< 9
2.	Celularni brodovi	1970.	1000-2500	215-250	10	10
3.	Panamax klasa	1980.	3000-4000	250-290	13	11-12
4.	Post panamax klasa	1988.	4000-5000	285-305	15	13
5.	Post panamax plus klasa	2000.	6000-8000	300	17	14.5
6.	Novi panamax (ULCS)	2006.	12.500	366	20	15.2
7.	Triple E klasa	2013.	18.000	400	23	15.5

Izvor: Izradio autor prema dostupnim podacima

Za razliku od razvoja kontejnerskih brodova, kontejneri sami po sebi nisu doživjeli značajnije promjene. Standardne veličine od 20 i 40 stopa tek se razlikuju po visini, 8.5 ili 9.5 stopa (HC), te po tipu i namjeni. S obzirom na zahtjeve prema terminalu, treba izdvojiti rashladne (*frigo*) kontejnere za koje treba osigurati poseban odjeljak, čitav blok ili neki drugi prostor na terminalu s potrebnim izvorom električne energije.



Slika 2: Kapaciteti flote 20 najvećih kontejnerskih brodara za 2013. godinu

Izvor: Alphaliner, 2013.

Povećanje potražnje za prijevozom i prijenosom kontejnera donosi stalan pritisak na luke i lučke operatere od kojih se zahtijeva što veći obrt kontejnera, pouzdanost i kontinuitet procesa. Konkurentnost luka se ogleda upravo u činjenici da se tijekom čitave godine osigura pristup terminalu i što kraće zadržavanje broda na vezu. Kontejnerizacija je izmijenila odnose koji su ranije postojali između luke i brodara. Ti odnosi moraju biti partnerski s visokom razinom uzajamne suradnje kako bi se zadovoljio zajednički cilj, a to je što efikasnije transportni proces na čitavom logističkom lancu.

2.2. Struktura kontejnerskog terminala kao proizvodnog sustava

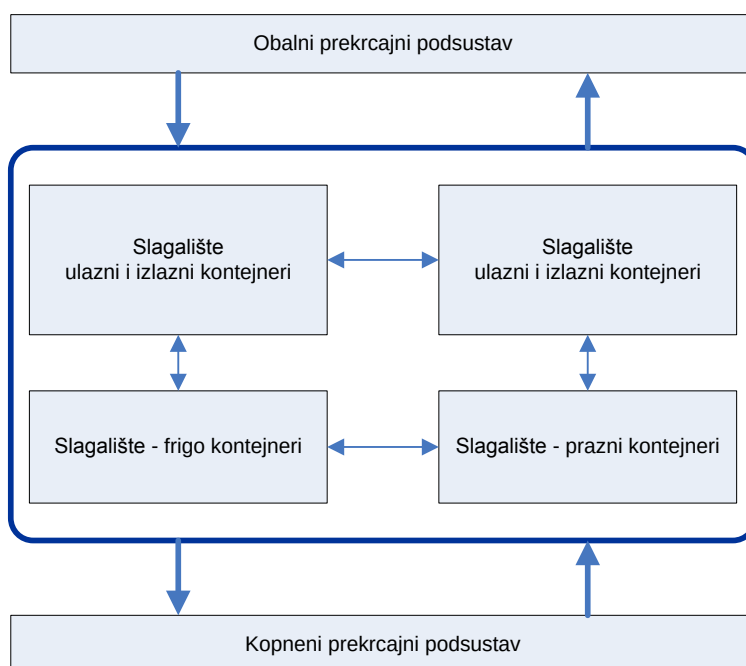
Kontejnerski terminal može se promatrati kao proizvodni sustav unutar kojeg se odvija tehničko-tehnološki proces transporta kontejnera. Tako Dundović i Hess (2005) kod kontejnerskih terminala razlikuju tri elementa: operativnu obalu, slagalište te zonu isporuke. Kontejneri ulaze u sustav i izlaze iz njega preko obalnog prekrcajnog podsustava i kopnenog prekrcajnog podsustava. Unutar terminala kontejneri se

skladište kako bi se osigurala održivost i funkcionalnost sustava zbog neravnomjernosti i stohastičnosti procesa ulaza i izlaza kontejnera na terminalu. Zbog toga se može govoriti o tri podsustava ili prostorno tri zone kontejnerskog terminala :

- obalna zona ili obalni prekrcajni podsustav,
- zona slagališta ili skladišni prekrcajni podsustav,
- kopnena zona ili kopneni prekrcajni podsustav.

Unutar zona i među zonama odvijaju se tehnološki procesi prekrcaja, prijevoza i prijenosa kontejnera. Twrđy i Beškovnik (2008) uz tri podsustava lučkog kontejnerskog terminala povezuju tri glavne vrste tehnoloških procesa: operacije priveza, ukrcaja i iskrcaja broda, zatim operacije prihvata i otpreme na kopnena prijevozna sredstva te prekrcajne operacije na slagalištu.

Teoretski, svaka od zona egzistira kao samostalni podsustav u kojeg ulaze jedinice u sustav i izlaze iz njega, međutim, funkcionalnost kontejnerskog terminala kao cjeline ne može se postići bez integralnog djelovanja svake od komponenti, povezanih sistemskim vezama. Visoka razina povezanosti između pojedinih podsustava utječe na cjelokupnu proizvodnost i učinkovitost sustava (Twrđy & Beškovnik, 2008).



Slika 3: Zone kontejnerskog terminala i tijek procesa

Izvor: prilagodio autor prema Stenken et al. (2004, p.6)

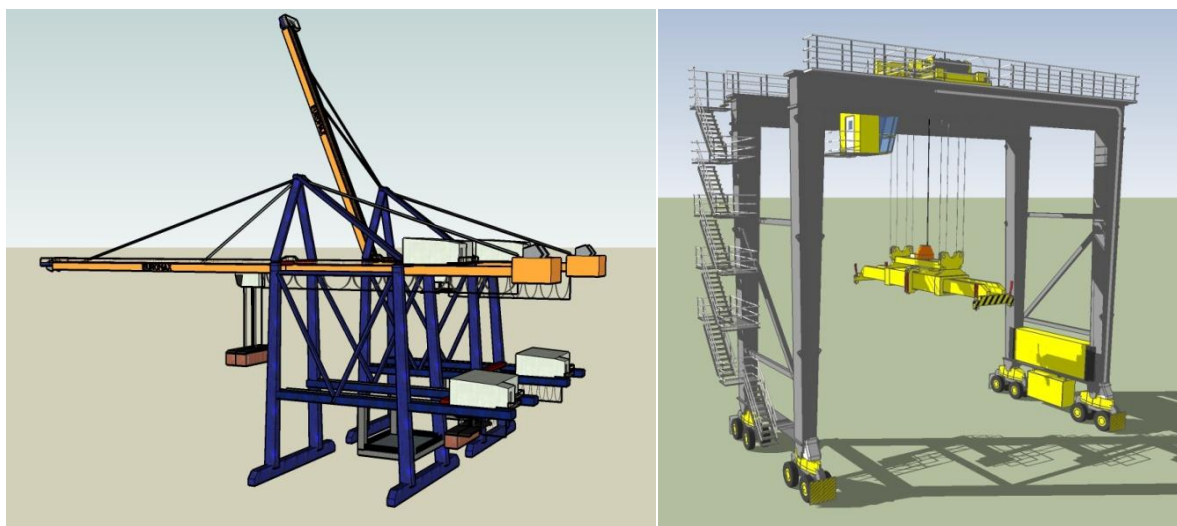
Sistemske veze čine informacije, instrukcije te prijevozno-prekrcajna sredstva koji osiguravaju kontinuirano odvijanje tehnoloških procesa i kretanje transportnih entiteta između pojedinih podsustava te unutar podsustava. Iako postoje i drugačije podjele na zone prema kojima postoji četiri ili pet zona, ovakva podjela najbolje oslikava lučki terminal kao proizvodno-procesni sustav.

Lučki kontejnerski terminal može se promatrati i kao logistički sustav. Prema Stenkenu (2004), na terminalu postoje samo dvije komponente sustava: skladište – *stock* i transportna sredstva. Stenken razlikuje skladište kao statičku komponentu sustava koja ima sposobnost uskladištenja kontejnera od dinamičkih procesa slaganja, ukrcaja i iskrcaja kontejnera koji se odvijaju na temelju instrukcija i pravila kojima se određuje način rukovanja, mjesto i položaj kontejnera. Prema tome, slagalište, brodovi, kamioni i vagoni imaju svojstvo skladišta, dok u kategoriju transportnih sredstava spadaju horizontalna prijevozno-prekrcajna sredstva, kontejnerski prijenosnici na slagalištu i obalne dizalice. Obilježje transportnih sredstava u logističkom sustavu jest da njima za obavljanje tehnoloških procesa moraju biti dodijeljeni zadaci i redoslijed izvršavanja zadataka. Da bi se to omogućilo potrebno je izvršiti proračun, a on se temelji na simulaciji realnih procesa i optimizaciji funkcije cilja.

2.3. Vrste i tehnička svojstva prekrcajnih sredstava LKT

Razvoj kontejnerskih brodova postavljao je posebne zahtjeve prema prekrcajnim uređajima na kontejnerskim terminalima. Najveći zahtjevi odnose se na dohvat obalnih dizalica. Međutim, u lukama gdje pristaju mega kontejnerski brodovi (ULCS) pored dohvata problem predstavlja i put kojeg kontejner mora proći iz dubine brodskih skladišta do iskrcaja na obalu. Zbog toga razvoj dizalica ide u smjeru smanjenja trajanja prekrcajnog ciklusa. U implementaciji su tako obalne dizalice s dvostrukim voznim kolicima i platformom (Slika 4 lijevo) te tzv. *supertainer* obalne dizalice (Thi, Ryu & Kim, 2012). Kod dizalica s dvostrukim kolicima postoji platforma na koju se kontejner odlaže prilikom iskrcaja s broda, gdje ga preuzima automatski uređaj koji upravlja donjim kolicima i iskrca ga na obalu ili prikolicu. *Supertainer* obalne dizalice imaju dvije vozne staze, jednu na morskoj, a drugu na obalnoj strani. Na svakoj se nalaze vozna kolica, dok je između pokretna platforma. Na ovaj način skraćuje se prekrcajni ciklus i povećava proizvodnost. Tehnički kapacitet prema specifikacijama ovakvih dizalica iznosi 55

kontejnera na sat. Osim voznih kolica vremenom je unaprijeđen sustav zahvaćanja kontejnera. Tako većina današnjih dizalica može raditi u *twin-lift* načinu rada i podizati više od jednog kontejnera odjednom. Produktivnost obalnih kontejnerskih dizalica ovisi o tipu dizalica i zahtjevima terminala, a kreće se od 22-30 ciklusa na sat (Steenken, Voss & Stahlbock, 2004).



Slika 4: Obalne i RTG kontejnerske dizalice

Druga skupina dizalica, koja se u stručnoj i znanstvenoj literaturi obrađuje u sklopu kontejnerskih terminala, jesu skladišne dizalice u koje spadaju: RMG ili u doslovnom prijevodu portalne dizalice na tračnicama, RTG - portalne dizalice na gumenim kotačima (Slika 4 desno) te OBC - visoke mosne dizalice. U domaćoj literaturi koristi se još termin portalni prijenosnici. Sva navedena sredstva imaju svojstvo da su ograničeno pokretna i da im je primarna namjena rad na slagalištu što uključuje prihvaćanje kontejnera u prihvatnoj ili transfer zoni te njegovo odlaganje na odgovarajuće mjesto na slagalištu, zatim dostava kontejnera sa slagališta u prihvatnu zonu te premještanje kontejnera unutar skladišnog bloka. Obično je svakoj RTG dizalici dodijeljen jedan blok na slagalištu na kojem obavlja prekrcajne operacije. Portalne dizalice na slagalištu mogu posluživati kontejnere posložene po širini u 8-12 vrsta te po visini u 4-10 redova.

Prijevozno-prekrcajna sredstva koriste se za transport kontejnera između zona. Još se nazivaju i horizontalna transportna sredstva ili horizontalni prijenosnici. Klasificiraju se u dvije osnovne grupe: pasivna i aktivna (Steenken, Voss & Stahlbock, 2004, p.9).



Slika 5: Prijevozno-prekrcajna sredstva: *straddle carrier* i tegljač s prikolicom.

U prvu skupinu spadaju: kamioni-tegljači i prikolice (trejleri) koji se još nazivaju i ITs³, multitrejleri te AGV vozila. Njihovo obilježje je da mogu samo prevoziti kontejner, ali ga ne mogu samostalno ukrcati ili iskrcati s vozila. U drugu skupinu spadaju: portalni prijenosnik *straddle carrier*, viličari te prijenosnik *reachsteaker*. Obilježje ove grupe horizontalnih prijenosnika je da pored prijevoza kontejnera između zona terminala mogu samostalno prihvatiti kontejner u prihvatnoj zoni, odložiti kontejner u prihvatnoj zoni te obavljati određene prekrcajne operacije na slagalištu.

Raznovrsnost transportnih sredstava na LKT omogućuje različite kombinacije konfiguracije sustava. Od izbora obalnih dizalica, odabira načina slaganja kontejnera do odabira prijevozno-prekrcajnih sredstava. Tako prevladavaju dvije osnovne grupe terminala: jedna čija se konfiguracija zasniva na portalnim prijenosnicima *straddle carrier*, manjim blokovima s nižom visinom slaganja kontejnera, ali i s većim brojem blokova, te druga koja se zasniva na RTG/RMG dizalicama, obično manjem broju blokova, ali većeg kapaciteta i visine slaganja, uz korištenje tegljača s prikolicama ili automatiziranih vozila za horizontalni prijevoz kontejnera. Osim prostora koji determinira izbor komponenti sustava, važnu ulogu imaju sposobnost i spremnost prilagodbe organizacije rada na samom terminalu te određene preferencije uređaja i opreme, pri čemu ulogu ima prethodno iskustvo i tradicija.

³ ITs – *Internal Trucks*

2.4. Tehnološki procesi na LKT

Funkcionalnost LKT ostvaruje se kontinuiranim protokom kontejnera između pojedinih podsustava terminala te između terminala i okoline. Protok kontejnera osigurava se obavljanjem tehnoloških procesa na terminalu pri čemu za svaki proces postoje ulazni elementi sustava i izlazni elementi sustava. Suštinski u tome ne postoji razlika između sustava LKT i bilo kojeg drugo proizvodnog sustava (Dundović, 2001).

Kontejneri koji dolaze na terminal grupiraju se prema smjeru odakle dolaze na: dolazne kontejnere (*inbound*) i odlazne kontejnere (*outbound*). Dolazni kontejneri (nazivaju se i uvozni kontejneri), jesu oni koji dolaze brodom iz neke druge luke, smještaju se na slagalištu i potom otpremaju do odredišta, najčešće kopnenim prijevoznim sredstvima.⁴ Odlazni kontejneri (nazivaju se i izvozni kontejneri) jesu oni koji dolaze na terminal kopnenim prijevoznim sredstvima radi otpreme brodom u neku drugu luku. Prijevoz kontejnera do terminala i na samom terminalu razlikuje se s obzirom na prijevozno sredstvo. Naime, na terminalima je ograničeno kretanje standardnih cestovnih kamiona te se koriste vlastiti kamioni-teglači unutar terminala. U literaturi se koriste pojmovi „vanjski“ kamioni, *external trucks* – XTs i „unutrašnji“ kamioni, *internal trucks* – ITs. (Murty *et al.*, 2005).

Tehnološki procesi na LKT mogu se odvijati u svakom od navedenih smjerova pri čemu nema bitne razlike u načinu njegovog odvijanja niti u izboru transportnih sredstava. Ako se promatra dolazni smjer kontejnera, tehnološki proces obuhvaća:

- prihvrat – privez broda,
- iskrcaj kontejnera s broda na obalu ili prijevozno-prekrcajno sredstvo,
- transport kontejnera do slagališta,
- uskladištenje kontejnera,
- transport/premještanje unutar slagališta,
- ukrcaj kontejnera na kopneno prijevozno sredstvo radi otpreme.

Obavljanje navedenih procesa ključno je za ostvarivanje funkcije terminala. Zbog toga je unaprijed potrebno donijeti odgovarajuće odluke na strateškoj, taktičkoj i operativnoj

⁴ Mogu se otpremati i drugim brodovima, morem do drugih luka (*transshipment*) ili plovilima unutarnjih voda do riječnih pristaništa.

razini. Važno je istaknuti da se tehnološki procesi obavljaju na temelju instrukcija kojima se odgovara na pitanja kako, gdje, kada i kojim redoslijedom obaviti određene postupke. Da bi se odgovorilo na ova pitanja i donijele odgovarajuće odluke, potrebno je riješiti logističke probleme koji su karakteristični za svaki od procesa. Standardni logistički problemi na LKT jesu (Rashidi & Tsang, 2006):

- dodjela veza brodu i raspodjela dizalica po brodovima,
- određivanje pozicije kontejneru na slagalištu,
- redoslijed izvođenja operacija RTG/RMG dizalica na slagalištu,
- određivanje rasporeda kretanja prijevozno-prekrcajnih sredstava,
- određivanje vremena preuzimanja kontejnera od strane XTs.

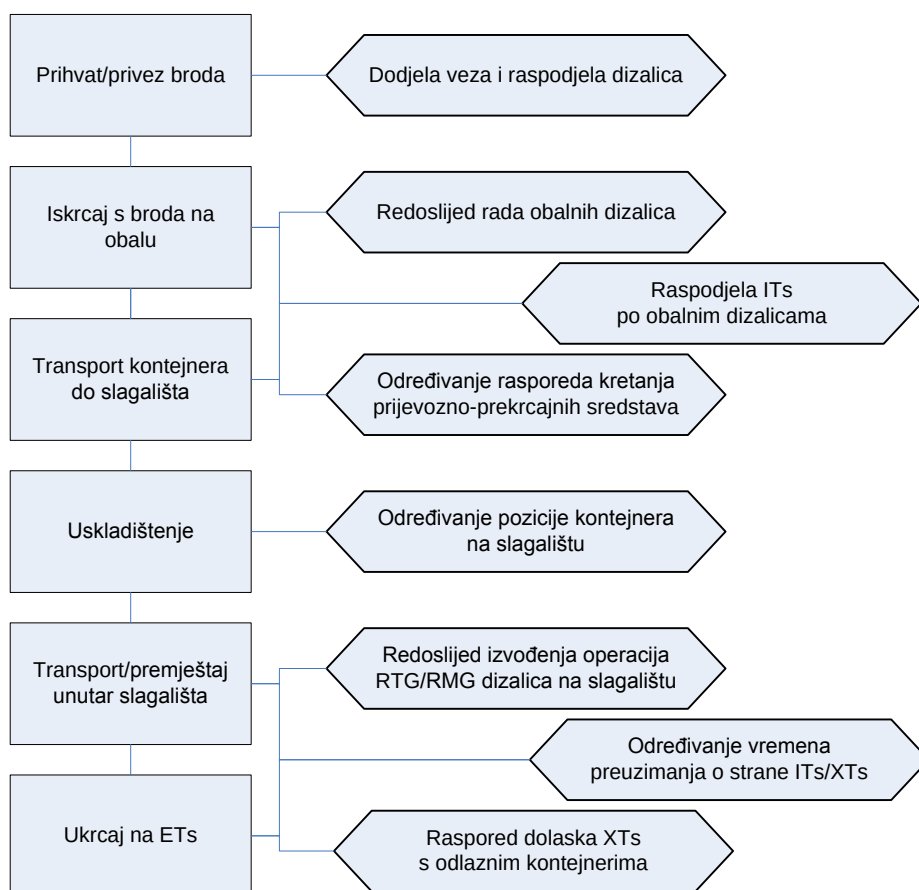
U standardne probleme pored ovih koje navodi Rashidi, spada i problem određivanja redoslijeda rada obalnih dizalica, a mogu se ubrojiti još i oni koje navode Murty et. al. (2005) tako da bi uz prethodno navedene, standardni problemi obuhvaćali i sljedeće:

- određivanje redoslijeda rada obalnih dizalica,
- raspored dolaska XTs-a s odlaznim kontejnerima,
- raspodjela ITs-a po obalnim dizalicama.

Ovisnost tehnoloških procesa i odluka o načinu njihovog odvijanja temeljenih na rješavanju standardnih logističkih problema na LKT prikazana je na slici 6.

Dodjela veza brodu i raspodjela dizalica po brodovima odnosi se na proces prihvata i priveza broda pri čemu je potrebno odrediti vez broda tj. mjesto priveza na pristanu te broj dizalica s kojima će se obavljati prekrcajne operacije. Iskrcaj kontejnera s broda na obalu obavlja se obalnim dizalicama za koje treba unaprijed odrediti redoslijed izvođenja operacija. Određivanje rasporeda kretanja prijevozno-prekrcajnih sredstava te pridruživanje odgovarajućeg broja ITs-a obalnoj ili skladišnoj dizalici preduvjet je za uspješno obavljanje procesa transporta kontejnera do slagališta. Za uskladištenje kontejnera unaprijed se mora odrediti mjesto i pozicija (visina) na slagalištu gdje će biti smješten. Tehnološki procesi na slagalištu moraju biti optimizirani tako da se osigura prazan prostor za smještaj kontejnera i njegova dostupnost prilikom otpreme, što uključuje i zahtjeve za što manje premještaja unutar skladišnih blokova i među njima. Zbog toga je određivanje redoslijeda izvođenja operacija RTG/RMG dizalica na slagalištu

posebno kompleksan problem. Kontejneri se preuzimaju od strane XTs-a prema vremenu preuzimanja koje mora biti prethodno utvrđeno i usklađeno s rasporedom dolaska kamiona tako da ne nastanu zastoji na ulazu u terminal.



Slika 6: Standardni logistički problemi na LKT

Izvor: autor

Rješavanje standardnih logističkih problema o čijim rezultatima ovisi uspješnost tehnoloških procesa na LKT, otežava činjenica da je dolazak kontejnera na terminal, bilo brodovima, bilo kopnenim prijevoznim sredstvima, stohastički proces. Iako su dolasci slučajni oni se mogu predvidjeti i planirati nekoliko dana unaprijed. Upravo je to osnova za rješavanje logističkih optimizacijskih problema. Na odvijanje tehnoloških procesa utječu i odstupanja od očekivanih, srednjih vrijednosti na kojima se temelje rezultati optimizacije. Zbog toga je dobro ukalkulirati dodatna međuvremena, tampon ili *buffer* vremenske zone kojima se održava kontinuitet procesa i funkcionalnost sustava.

3. PLANIRANJE LUČKIH KONTEJNERSKIH TERMINALA

3.1. Klasifikacija planiranja

Stalne i brze promjene na kontejnerskom transportnom tržištu postavljaju nove zahtjeve prema lučkim kontejnerskim terminalima. Zato je planiranje kontejnerskih terminala osjetljivije i kompleksnije, nego što je to slučaj s nekim drugim dijelovima lučkog sustava. Planiranje bi se najbolje moglo interpretirati kao aktivnost kojom se pokušava odrediti buduće stanje i smjer djelovanja u budućnosti. Kako je budućnost uvijek neizvjesna, tako se i kod planiranja mora računati s većom ili manjom dozom vjerojatnosti da će se procesi odvijati prema očekivanjima.

Planiranje LKT može se odvijati na razini sustava ili pojedinih dijelova. Može se govoriti o dva ključna segmenta planiranja: planiranje infrastrukture i planiranje procesa. Planiranje infrastrukture uključuje lokaciju, akvatorij, pristane, kopnene površine, dizalice, prekrcajna sredstva, energetska i druga postrojenja na terminalu te lučke i prilazne prometnice. Planiranje procesa odnosi se na tehnološke procesa transporta tereta unutar terminala te između terminala i okoline.

Prema klasifikaciji koju navode Moorthy i Chung (2006), postoje tri vrste planiranja:

- strateško planiranje,
- taktičko planiranje,
- operativno planiranje.

Strateško planiranje je dugoročno, a bavi se razvojem terminala, posebno u pogledu izgradnje lučke infrastrukture. Međutim, isto tako strateško planiranje uključuje i određenu marketinšku aktivnost kojom se utječe na poslovnu politiku i odnose s brodarima. Drugim riječima, moraju se utvrditi razvojna i poslovna strategija, tako da budu usklađene s interesima korisnika, kako bi investicije u lučku infrastrukturu bile na vrijeme prepoznate i prihvaćene te bile ekonomski opravdane.

Taktičko planiranje bavi se optimizacijom tehnoloških procesa i rješavanjem logističkih problema koji se pritom javljaju. Između ostalog tu spadaju i problemi određivanja

vezova i dodjele vezova brodovima, raspodjela dizalica te problemi redoslijeda prekrcajnih operacija. Također, tu spadaju i specifični problemi slagališta te redoslijeda dolazaka kamiona na isporuku i dostavu. Taktički planovi jesu nužan preduvjet za izradu operativnih planova.

Operativno planiranje uključuje izradu operativnih planova rada na dnevnoj osnovi u odnosu na raspoložive resurse u skladu s prethodnim rezultatima optimizacije. Ovi planovi vrlo su dinamični i često su posljedica odluka koje se donose „u hodu“.

U nastavku ovog poglavlja bit će riječi o strateškom planiranju, poglavito o planiranju infrastrukture te će biti predstavljene analitičke metode za dimenzioniranje LKT koje se koriste kod projektiranja. Taktičko-operativnim problemima posvećen je ostatak rada pa se u ovom poglavlju neće dalje elaborirati.

3.2. Planiranje prostora za izgradnju LKT

Sistemska obilježje lučkih terminala zahtijeva sustavni pristup planiranju. Konvencionalni pristup planiranju infrastrukture kod kojega je primarna tehnička razina projektiranja, pri čemu nije jasno artikulirana funkcija niti su definirana operativna mjerila za ostvarivanje funkcionalnosti, nosi veliki rizik s obzirom na mogućnost ostvarivanja kvalitativne razine koja se zahtjeva na kontejnerskom transportnom tržištu. Konvencionalni pristup planiranju usmjeren je na pojedinačne komponente sustava, a ne na sustav u cjelini. Tipičan primjer je izgradnja dodatnih vezova i proširenje terminala, a zanemarivanje kapaciteta kopnenih prometnica kojima se ostvaruje pristup terminala na prometnu mrežu. Drugi problem predstavlja zanemarivanje zahtjeva korisnika ili nedovoljna prisutnost operativnih zahtjeva korisnika u odnosu na sustav LKT.

Zbog toga je jedino ispravno strateško planiranje provoditi primjenom sistemskih metoda koje se temelje na znanstveno utemeljenim metodama sistemskog inženjeringa i upravljanja životnim ciklusom (Blanchard, 2004; Kossiakoff *et al.*, 2011; Maritime Navigation Commission, 2008). Prema Blanchardu, svrha sistemskog inženjeringa je „kvalitetno osmišljen i tehnički razrađen projekt u kojem će se transformirati operativni zahtjevi u funkcionalni opis i parametre učinkovitosti“. Na taj način osigurava se optimalna konfiguracija sustava.

Od kontejnerskih terminala zahtjeva se funkcionalnost tijekom čitave godine. Funkcionalnost predstavlja razinu ostvarivanja glavnih funkcija za koje je terminal izgrađen prema funkcionalnim i operativnim zahtjevima korisnika (Grubišić & Dundović, 2011). Naglasak je na razini ostvarivanja, što znači da učinkovitost i kvalitetu usluge treba konstantno mjeriti i uspoređivati s očekivanim rezultatima. Kriteriji za vrednovanje operativne učinkovitosti i kvalitete usluge u lukama i lučkim terminalima dijele se na kriterije funkcionalnosti i kriterije tehničke kvalitete (Maritime Navigation Commission, 2008). Ovi kriteriji detaljno su elaborirani u radu „Tehničko-tehnološki parametri vrednovanja prekrcajnih sredstava na kontejnerskim terminalima“ (Grubišić & Dundović, 2011) .

S prometno-tehničke razine LKT mora udovoljiti svim onim elementima poput bilo kojeg drugog lučkog terminala. To se odnosi na prilazni plovni put, dubinu mora i širinu akvatorija, te veličinu prostora na kopnu, ali i prostora za moguću ekspanziju u slučaju potrebe. Kad se planira izgradnja novog terminala važno je utvrditi najprihvatljiviju lokaciju. Kod odabira lokacije moraju se uzeti u obzir sljedeći čimbenici (Thoresen, 2010, p.298):

- dovoljno površine za funkcionalnost terminala,
- mogućnost širenja u budućnosti,
- dostupnost kopnene prometne mreže,
- prilaz terminalu s morske strane,
- priroda morskog dna, nanos sedimenata, geotehnički problemi,
- utjecaj vjetrova, valova i morskih struja,
- seizmološke opasnosti,
- ekološka prihvatljivost.

Terminal prostorno obuhvaća nekoliko funkcionalnih cjelina, a ovisno o veličini terminala one mogu sadržavati specijalizirane namjenske prostore. Te funkcionalne cjeline jesu: pristan s vezovima, obalna operativna površina, slagalište koje se može sastojati od nekoliko namjenskih blokova za slaganje kontejnera, kopnena prometna operativna površina koja može uključivati specijaliziranu željezničku prekrcajnu postaju te prostor ulaza na terminal s parkiralištem za kamione, kontrolnim i uslužnim centrom.

Ukupna površina kontejnerskog terminala, bez površina za logistički centar i usluge s dodanom vrijednošću, može se odrediti izrazom (Brinkmann, 2005, p.196) :

$$A_{KT} = A_{ob} + A_{skl} + A_{ko} + A_z + A_{park} [ha] \quad (3.1)$$

gdje su:

A_{ob} – obalna operativna površina, A_{skl} – površina slagališta, A_{ko} – kopnena operativna površina, A_z – površina željezničke prekrcajne postaje te A_{park} – površina parkirališta za kamione.

Površina slagališta za kontejnere ovisi o dva bitna elementa: obrtu kontejnera na terminalu i tehnologiji transporta na slagalištu. Pored toga konfiguracija slagališta, a time i potrebna površina ovisi i o tipu kontejnera te udjelu praznih kontejnera u transportu. Za izračun površine slagališta može se primijeniti sljedeća formula:

$$A_{skl} = \frac{QDA_{ks}k_v}{365h} [m^2] \quad (3.2)$$

gdje su:

A_{skl} – minimalno potrebna površina slagališta,

Q – godišnji promet kontejnera na terminalu (TEU/god.),

D – prosječno vrijeme zadržavanja kontejnera na slagalištu (*dwel time*) u danima,

A_{ks} – površina kontejnerskog slot⁵,

h – visina slaganja izražena brojem redova kontejnera u skladišnom bloku,

k_v – koeficijent vršnog opterećenja (kreće se od 10-50%).

Ukoliko se u gornjoj formuli uzima maksimalna visina slaganja, utoliko u slučaju vršnih opterećenja može doći do manjka prostora. Isto vrijedi i za slučajeve kada je potreban

⁵ Kontejnerski slot ovdje označava jedan stupac u skladišnom bloku za smještaj 20' kontejnera. Broj kontejnera u slotu ovisi o visini slaganja kontejnera tj. broju redova.

veliki broj pomicanja i premještanja kontejnera na slagalištu. Zbog toga je bolje za h uzeti prosječnu visinu slaganja.

Površina kontejnerskog slota ili jedinična površina 1 TEU jedinice, ovisi o tehnologiji transporta na slagalištu. Ukoliko se koriste RTG, RMG ili OBC dizalice jedinična površina bit će manja, dok u slučaju rada s portalnim prijenosnicima površina je veća jer ova sredstva zahtijevaju više prostora za rukovanje i zahvaćanje kontejnera. Neto površina kontejnerskog slota određuje se prema konfiguraciji skladišnog bloka pri čemu je važno utvrditi razmake između odjeljaka i između vrsta u koje se polažu kontejneri. Bruto površina kontejnerskog slota dobije se kada se na neto površinu dodaju razmaci između skladišnih blokova koji služe za prometovanje transportnih sredstava. Detaljnu kalkulaciju površine slagališta napravila je Brinkmann u svom radu (2005, pp.295–301). Treba naglasiti da proračun prema Brinkman uzima u obzir različite tipove kontejnera koji se slažu u namjenske blokove, tako da je za svaki pojedini tip (standardne, *frigo*, prazne te kontejnere s opasnim teretom) potrebno izračunati veličinu i površinu namjenskog skladišnog bloka.

Modificiran izraz za površinu slagališta predlaže Thoresen (2010). On razlikuje neto i bruto površinu slagališta. Bruto površina slagališta dobije se ako se na neto površinu prema izrazu (3.2) uvrste dodatni koeficijenti koji korigiraju dobiveni iznos uzimajući u obzir oblik površine, sekundarne površine te segregaciju kontejnera. Prema toj varijanti ukupna bruto površina slagališta glasi (Thoresen, 2010, p.320):

$$A_{skl}^{brutto} = \frac{A_{skl}}{NLS} \left[m^2 \right] \quad (3.3)$$

gdje su:

N – udio primarnog slagališta u odnosu na cjelokupni prostor slagališta,

L – koeficijent tlocrtnog oblika slagališta,

S – segregacijski koeficijent.

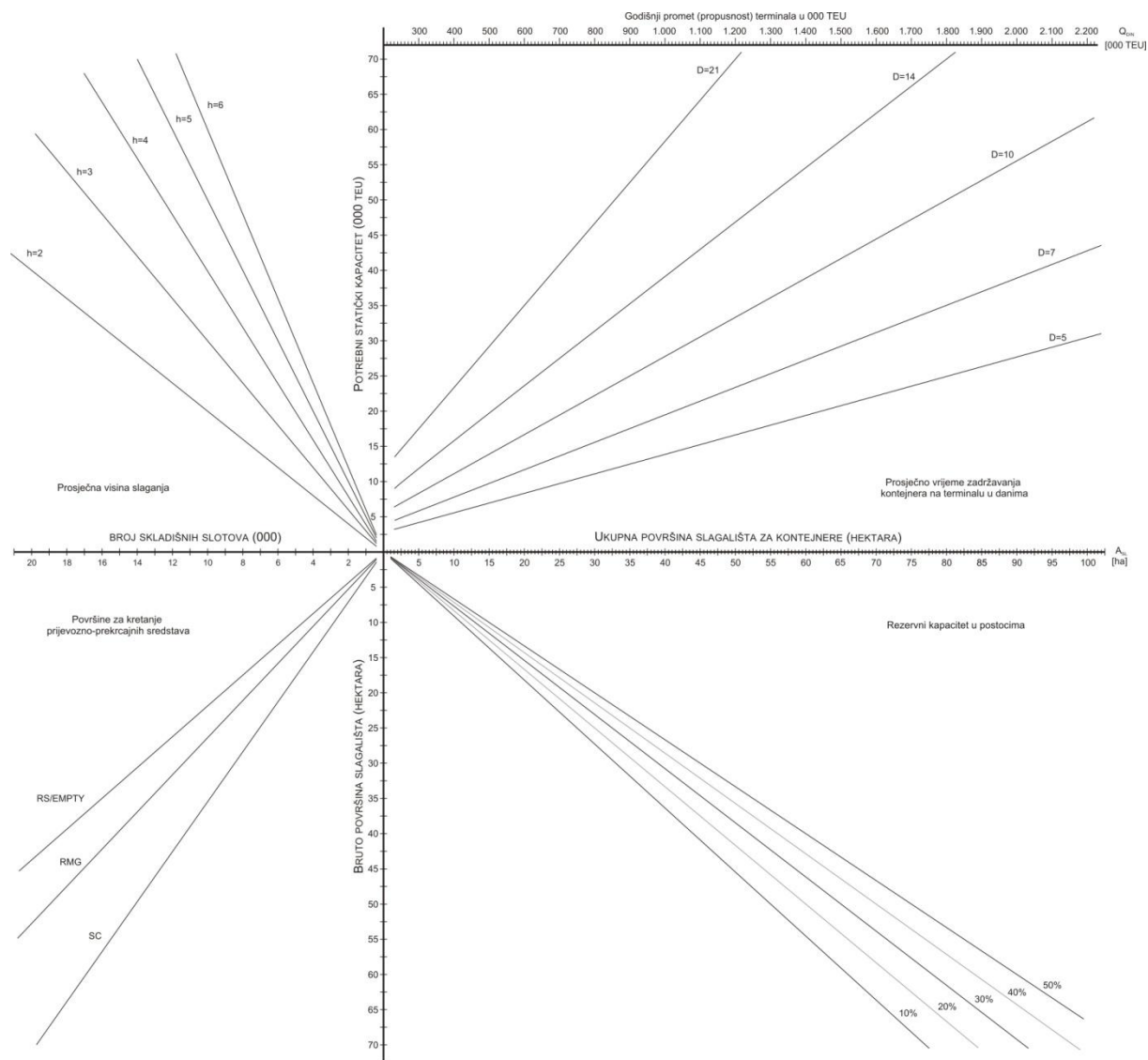
Udio primarnog slagališta odnosi se na slagalište za pune kontejnere, dok se pod sekundarnim slagalištem podrazumijeva prostor za prazne kontejnere. Koeficijent tlocrtnog oblika važan je ako površina nije pravilnog oblika pa dio prostora nije moguće

korisno iskoristiti za slaganje. Segregacijski koeficijent uzima u obzir zahtjeve za odvajanjem skladišnog prostora prema odredištima te potrebu da se dio kontejnera izdvoji radi provođenje posebnih procedura nad njima (inspekcijski pregled, popravak i sl.).

Korisno je veličinu površine slagališta iskazati brojem kontejnerskih slotova. Broj slotova dobije se jednostavno, dijeljenjem ukupne površine slagališta s površinom kontejnerskog slota. U slučaju namjenskih blokova, broj slotova prema tipu kontejnera dobije se dijeljenjem površine namjenskih blokova s površinom kontejnerskog slota. Veličina slota tj. broj kontejnera u slotu, važna je zbog maksimalno dozvoljenog opterećenja tla o čemu se treba voditi računa kod projektiranja.

Za potrebe izračuna površine slagališta konstruiran je nomogram po uzoru na slične koji se pojavljuju u literaturi i koje je objavio UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development, 1985). Konstruirani nomogram prilagođen je s obzirom na veličinu i tehnološka svojstva koja utječu na proračun površine slagališta današnjih kontejnerskih terminala. Nomogram je konstruiran prema izrazu (3.2). Za razliku od originalne verzije koja nije prikladna za današnju veličinu kontejnerskih terminala, ova verzija je znatno fleksibilnija i može se primijeniti za većinu današnjih terminala. Omogućuje neposredno očitavanje potrebnog broja kontejnerskih slotova i odabir tehnologije transporta na slagalištu jer su razmaci koji utječu na površinu slota ovisno o transportnom sredstvu već ukalkulirani u grafički predložak. Nomogram je moguće prilagoditi specifičnostima pojedinog terminala, a može se koristiti kao pomoćni alat prilikom strateškog planiranja.

Statički kapacitet kontejnerskog terminala također je moguće utvrditi preko nomograma. Za njegovo određivanje treba predvidjeti godišnji promet na terminalu i odrediti zahtijevani obrt kontejnera koji se iskazuje kroz prosječno vrijeme boravka kontejnera na slagalištu.



Slika 7: Nomogram za proračun površine slagališta kontejnerskog terminala

3.3. Kapacitet vezova

Određivanje potrebnog broja vezova i njihovog kapaciteta važno je iz prometno-tehnoloških i ekonomskih razloga. Nedovoljan broj vezova ne bi mogao osigurati potrebnu kvalitetu usluge prema brodarima, dok s druge strane preveliki broj vezova ne bi bio opravdan zbog troškova izgradnje i nižih prihoda ostvarenih po vezu ili jediničnoj duljini pristana.

Prije elaboracije samog problema autor želi istaknuti terminološke razlike u značenju pojmova vez, pristan i operativna obala. Definicija pristana koju navodi Dundović (2001, p.21) glasi: „Pristan, privezište, vez (engl. *berth*, *pier*, *quay*) vodeni je prostor uz rub operativne obale ili gata na kojemu brod može biti sigurno vezan i obavljati ukrcaj ili iskrcaj ljudi, tereta ili vozila“. Dok za operativnu obalu isti autor navodi: „Operativna obala (engl. *quay*, *wharf*) izgrađena je čvrsta obalna građevina s lučkim uređajima, najčešće građena usporedno s obalnom vodenom linijom namijenjena pristajanju brodova radi iskrcaja ili ukrcaja tereta ili putnika“.

Iz ovih definicija proizlazi da su riječi pristan i vez sinonimi i da odgovaraju engleskoj riječi *berth*, dok pojmu operativne obale odgovara engleska riječ *quay* pri čemu je naglašena njena namjena. Međutim, brod ili bilo koja druga vrsta plovila ne mora u luci pristati samo na operativnu obalu. Luka može i ima vezove na kojima smiju pristati brodovi, a da obale na kojima se nalaze nisu operativne. Nadalje, brod može pristati uz obalu tako da zauzima više vezova. Vezovi su prebrojivi i odgovaraju numeraciji pozicija koje brodovi zauzimaju uz obalu. Pristan je s druge strane pogodniji izraz za opis pojma *quay* kojim se označava dio obalne infrastrukture koji je namijenjen pristajanju brodova ili druge vrste plovila bez obzira na svrhu zbog koje plovilo pristaje.

Ova terminološka razgraničenja važna su za razumijevanje daljnjeg teksta. Autor u ovom radu koristi pojmove vez i pristan na način da oni odgovaraju po svom značenju engleskim pojmovima *berth* i *quay*. To znači da na kontejnerskom terminalu može postojati više pristana ovisno o konfiguraciji obalne infrastrukture i akvatorija, a na svakom pristanu više vezova ili pozicija za privez, bez obzira na način numeracije tih vezova i veličinu prostora kojeg brod zauzima uz obalu.

Problem određivanja optimalnog broja vezova ili kako se još navodi optimalni broj pristana dosta je prisutan u domaćoj literaturi (Dundović & Zenzerović, 2000; Zenzerović, 1995, 2005; Zenzerović & Poletan, 1997; Zenzerović & Vilke, 2011). U pravilu se radi o primjeni metoda redova čekanja gdje se lučki sustav tj. podsustav operativne obale promatra kao sustav masovnog posluživanja. U tom kontekstu za kapacitet vezova se koristi pojam propusna moć pristana (Kirinčić, 1991) koji implicira da se radi o dinamičkom sustavu i da kapacitet vezova treba promatrati prema učinku. Kako je učinak tehnološki pojam, on je iskazan brojem ukranih odnosno iskrcanih kontejnera u jedinici vremena. Ovdje je važno naglasiti – brojem kontejnera, a ne brojem obrađenih brodova. Veličina broda međutim, ima dominantnu ulogu na učinak tj. protok tereta. (Dundović & Kesić, 2001, p.98).

U nekim radovima (Zenzerović, 2005), kod formulacije sustava masovnog posluživanja, kanalima posluživanja opisuju se pristani (tj. vezovi, op.a) dok je intenzitet posluživanja definiran kao prosječan broj kontejnerskih brodova ili kontejnera koji se mogu procesirati u jedinici vremena. Kod takve aproksimacije treba biti oprezan jer broj brodova obrađenih u jedinici vremena ne mora biti realni pokazatelj proizvodnosti veza ili pristana. Na taj način se zanemaruje količina tereta tj. kontejnera koja se obrađuje po brodu. Ako je prosječni broj kontejnera po brodu malen, a brod je velik mogu se dobiti visoki učinci po vezu, a ako brodovi dolaze puni, dobit će se mali učinci po vezu. No to nam ne daje realnu sliku o stvarnoj propusnoj moći pristana i posredno o kvaliteti lučke usluge. Zbog toga u takvim kalkulacijama treba izričito navesti razdiobu prekrcajne potražnje po brodovima ili prosječnu količinu tereta po brodu.

Izračunavanje broja potrebnih vezova i kapaciteta vezova moguće je na dva načina. Prvi način, statički, zasniva se na prosječnim vrijednostima dok se drugi, dinamički, temelji na primjeni metoda teorije redova čekanja.

Kod statičkog proračuna uputno je srednje vrijednosti ograničiti na kraće vremensko razdoblje. Zbog obilježja kontejnerskog prometa najpogodnije razdoblje je 1 tjedan. Iako ima različitih pristupa određivanju broja i kapaciteta vezova, autor preferira analitički pristup koji je postavio Thoresen (2010) i koji se prenosi u nastavku.

Thoresen (2010, pp.322–324) definira sljedeće veličine kod proračuna kapaciteta vezova te pripadajuće formule⁶:

- kapacitet veza,
- broj dolazaka kontejnerskih brodova,
- vrijeme boravka broda na vezu,
- radni sati obalnih dizalica,
- koeficijent iskorištenja (zauzeća) veza.

Kapacitet veza određen je sljedećim izrazom:

$$C_{BOX} = \frac{C_{TEU} P}{W_W R_{BT}} \quad (3.4)$$

gdje su:

C_{BOX} – broj kontejnera (komada) prekranih u jednom tjednu,

C_{TEU} – broj kontejnera (TEU-a) prekranih godišnje,

W_W – radni tjedni u godini,

R_{BT} – odnos između veličine TEU jedinica i broja kontejnera (kreće se između 1.4 i 1.7).

Broj dolazaka kontejnerskih brodova ovisi o presumpciji srednje vrijednosti broja kontejnera koji je potrebno ukrcati/iskrcati po brodu te glasi:

$$S_{CS} = \frac{C_{BOX}}{S_{BCS}} \quad (3.5)$$

gdje su:

S_{CS} – broj dolazaka kontejnerskih brodova tjedno,

S_{BCS} – srednja vrijednost broja kontejnera za ukrcaj/iskrcaj po brodu.

⁶Izrazi u formulama i oznake veličina istovjetne su izvorniku.

Nakon što su određeni broj dolazaka brodova i prosječna količina kontejnera po brodu, potrebno je odrediti vrijeme boravka broda na vezu i ukupno iskorištenje veza. Vrijeme boravka broda na vezu određuje se prema izrazu:

$$T_{WTC} = \frac{S_{BCS}}{C_N G_{BH} L_{SC} W_{CT}} \quad (3.6)$$

gdje su:

T_{WTC} – ukupno vrijeme boravka broda na vezu,

C_N – ukupni broj obalnih kontejnerskih dizalica po jednom brodu,

G_{BH} – proizvodnost dizalice – broj prekrcajnih kontejnera po satu po dizalici,

L_{SC} – koeficijent efektivnosti radnog vremena (odnos između vremena trajanja radnog ciklusa i ukupnog trajanja prekrcajnog procesa, kreće se između 0.8 i 0.9),

W_{CT} – koeficijent efektivnosti procesa (odnos između vremena trajanja prekrcajnog procesa i ukupnog vremena boravka broda na vezu, kreće se između 0.8 i 0.9).

Ukupno vrijeme iskorištenja veza može se poistovjetiti s ukupnim tjednim radnim satima dizalica te glasi:

$$G_{STS} = S_{CS} T_{WTC} \quad (3.7)$$

gdje G_{STS} predstavlja ukupne sate rada dizalica tjedno ili ukupni broj sati boravka brodova na vezovima tjedno.

Vezu između statičkog i dinamičkog načina određivanja broja vezova predstavlja koeficijent iskorištenja ili zauzeća veza. Računa se na osnovu ukupnog broja vezova te iskazuje u postocima prema izrazu:

$$B_{OR} = \frac{G_{STS} \cdot 100}{B_N W_D W_H} \quad (3.8)$$

gdje su:

B_{OR} – koeficijent iskorištenja veza,

B_N – broj vezova,

W_D – broj radnih dana u tjednu,

W_H – broj radnih sati u danu.

Na temelju dobivenog koeficijenta iskorištenja veza može se inicijalno odrediti broj vezova. U tu svrhu mogu se koristiti tablice s preporučenim vrijednostima koeficijenta iskorištenja veza u ovisnosti o broju vezova (Tsinker, 2004; United Nations Conference on Trade and Development, 1985) .

Nakon statičkog proračuna potrebno je provesti simulaciju sustava primjenjujući teoriju redova čekanja te prema poznatim formulama odrediti vjerojatnost zauzetosti veza, vjerojatnost čekanja i broj jedinica u sustavu (Zenzerović, 2003).

Kod primjene teorije redova čekanja karakteristične veličine imaju sljedeće značenje:

- intenzitet dolazaka brodova – λ ,
- intenzitet posluživanja - μ ,
- stupanj opterećenja uslužnog mjesta ili intenzitet prometa – ρ .

Ranije je rečeno da vezu između statičkog i dinamičkog načina određivanja kapaciteta ili propusnosti pristana predstavlja koeficijent iskorištenja veza (statički) odnosno stupanj opterećenja pristana (dinamički). Dakle veličina B_{OR} istovjetna je stupnju opterećenja kanala (veza) ρ koji se dobije po dobro poznatoj formuli iz teorije redova čekanja $\rho = \lambda / \mu$ odnosno za sustav s više vezova $\rho_S = \rho / S$ (Zenzerović, 2003).

Za određivanje parametara λ i μ potrebno je odrediti po kojoj funkciji razdiobe vjerojatnosti će se ponašati slučajni događaj tj. dolasci brodova, ali isto tako ne manje važno je i pitanje kako opisati neravnomjernosti prekrcajne potražnje po brodu te kako aproksimirati navedeni proces. O tome će biti riječi u poglavlju 6.1.

4. OPTIMIZACIJA OBALNOG PREKRCAJNOG PODSUSTAVA LKT

4.1. Problem dodjele veza (BAP problem)

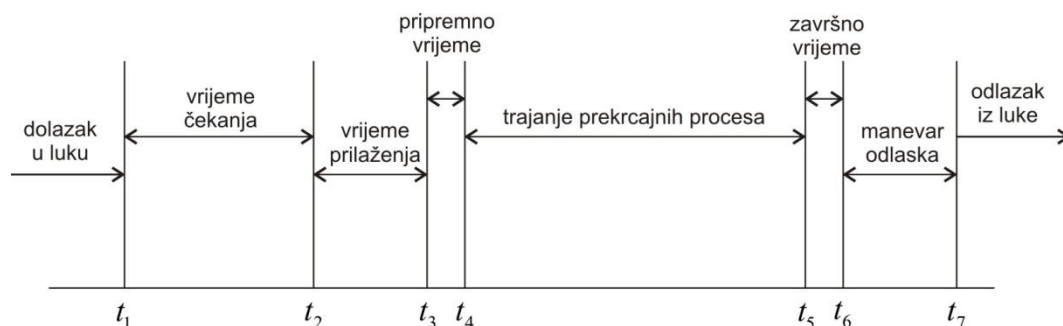
4.1.1. Definiranje problema

Postoji čitav niz čimbenika koji utječu na vrijeme priveza broda. Ti čimbenici mogu imati tehničke, prometno-tehnološke, organizacijske, sigurnosne, ekonomske ili pravne attribute. Mogu ovisiti o unutarnjoj poslovnoj politici luke, odnosu prema brodarima, a mogu biti uvjetovani eksternim utjecajima, vremenskim, klimatološkim ili hidrološkim prilikama. Već je ranije rečeno da luka ima sistemska obilježja pa tako treba promatrati i procese koji se odvijaju od dolaska do odlaska broda iz luke. Za samu optimizaciju i hipotezu koja se želi dokazati, ovi čimbenici nisu primarni jer je većinu njih moguće iskazati kao parametarske veličine. Isto tako svaka luka je specifična s obzirom na njihove vrijednosti i mogućnost primjene pa bi uključivanje ovih parametara zahtijevalo strogo selektivan pristup optimizaciji. Zbog toga se kod izrade BAP modela u ovom radu ne uzimaju u obzir raznovrsni utjecajni čimbenici na vrijeme priveza broda. Ipak, bit će prikazana varijacija osnovnog BAP modela uvažavajući dubinu pristana kao mogući utjecajni čimbenik na raspodjelu vezova i samim tim na vrijeme priveza broda.

Problem dodjele veza sastoji se u određivanju optimalnog rasporeda brodova na pristanu pri čemu se s jedne strane nastoji postići maksimalno iskorištenje prostora pristana, a s druge strane minimalno ukupno vrijeme boravka brodova u luci. Minimum ukupnog vremena boravka broda u luci postiže se minimizacijom ukupnog vremena procesiranja broda. Ono uključuje vrijeme od dolaska broda na lučko područje do vremena početka prekrcajnih operacija te vrijeme izvođenja prekrcajnih operacija do vremena odlaska broda iz luke.

Distribuciju vremena boravka broda na lučkom području prikazuje slika 8. Točka t_1 predstavlja vrijeme dolaska broda na lučko područje, t_2 je vrijeme početka manevra prilaznja u luku koji završava privezom broda, što odgovara vremenu t_3 . Nakon priveza potrebno je izvjesno kraće vrijeme za pripremu broda pa je početak prekrcajnih operacija određen vremenom t_4 . Završetak prekrcajnih operacija određen je s t_5 , nakon

čega se brod priprema za manevar odlaska iz luke. Odvez broda predstavlja t_6 , te konačno t_7 vrijeme kada brod napusti lučko područje odnosno završi manevar odlaska iz luke.



Slika 8: Raspodjela vremena boravka broda u luci

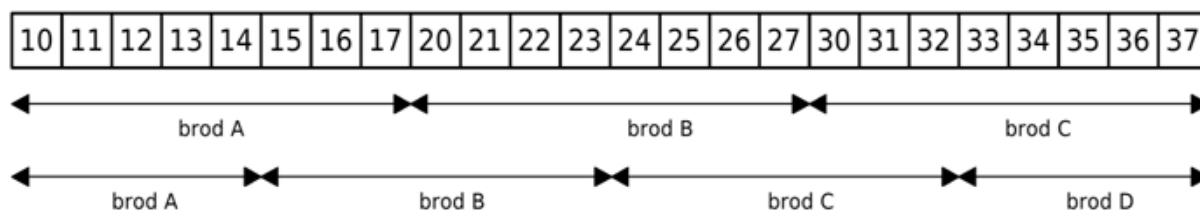
Modeli BAP problema razlikuju se ovisno o pristupu prema veličinama kojima se određuje pozicija broda na vezu, vrijeme priveza, trajanje prekrcajnih operacija te u kojoj mjeri se uzimaju ostali utjecajni čimbenici o kojima ovisi vez broda i boravak u luci. Osnovna podjela je sljedeća:

- prema vremenu dolaska broda: statički, dinamički,
- prema vrsti vezova: diskretni, kontinuirani, hibridni,
- prema trajanju prekrcajnih operacija,
- prema ciljevima optimizacije tj. objektnoj funkciji.

Problem dodjele veza s gledišta vremena dolaska broda može se promatrati kao statički ili dinamički problem. Statički problem podrazumijeva raspored brodova koji su već došli na lučko područje i nalaze se u sustavu. U tom slučaju svi brodovi su „dostupni“, spremni su za raspoređivanje i mogu ravnopravno konkurirati za vez. Statički BAP problem nema veliko praktično značenje kod morskih kontejnerskih luka jer brodovi u realnim situacijama dolaze u različitim vremenskim intervalima. Za razliku od statičkog, dinamički BAP problem uzima u obzir vrijeme dolaska brodova te ih ovisno o tome raspoređuje po pristanu za unaprijed definirani vremenski horizont (nekoliko dana, tjedan dana ili sl. unaprijed). Statički BAP problem zanimljiv je samo s teoretskog gledišta, u svrhu pojednostavljenja problema radi provjere ispravnosti postavljenog modela i programskog algoritma.

Na kontejnerskim terminalima pristani za brodove uglavnom su smješteni u liniji kako bi se osigurala dobra komunikacija sa slagalištem. Već kod terminala s ukupnom duljinom pristana većom od 600 metara javlja se problem raspodjele vezova uzduž obale. Tradicionalni pristup pretpostavlja određivanje fiksnih vezova u odnosu na obalu (pristan) čija duljina je određena na temelju očekivane veličine broda. S obzirom da duljina kontejnerskih brodova varira u ovisnosti o njihovom kapacitetu, tradicionalni pristup ne osigurava optimalno iskorištenje pristana. Primjerice na duljinu pristana od 700 metara mogu se vezati dva broda dulja od 300 metara ili tri broda od oko 200 metara.

Nasuprot tradicionalnom načinu određivanju vezova, gdje je položaj vezova fiksno određen i označen, pristan kontejnerskog terminala može se podijeliti na segmente tako da se svakom brodu, ovisno o njegovoj duljini, pridruži odgovarajući broj segmenata (Slika 9). Na ovaj način moguće je bolje iskoristiti raspoloživi obalni prostor i samim tim skratiti boravak brodova u luci.



Slika 9: Primjer označavanja kontejnerskog pristana

Ovisno o načinu kako su projektirani vezovi, razlikuju se tri vrste tlocrtne izvedbe kontejnerskih pristana (Bierwirth & Meisel, 2010):

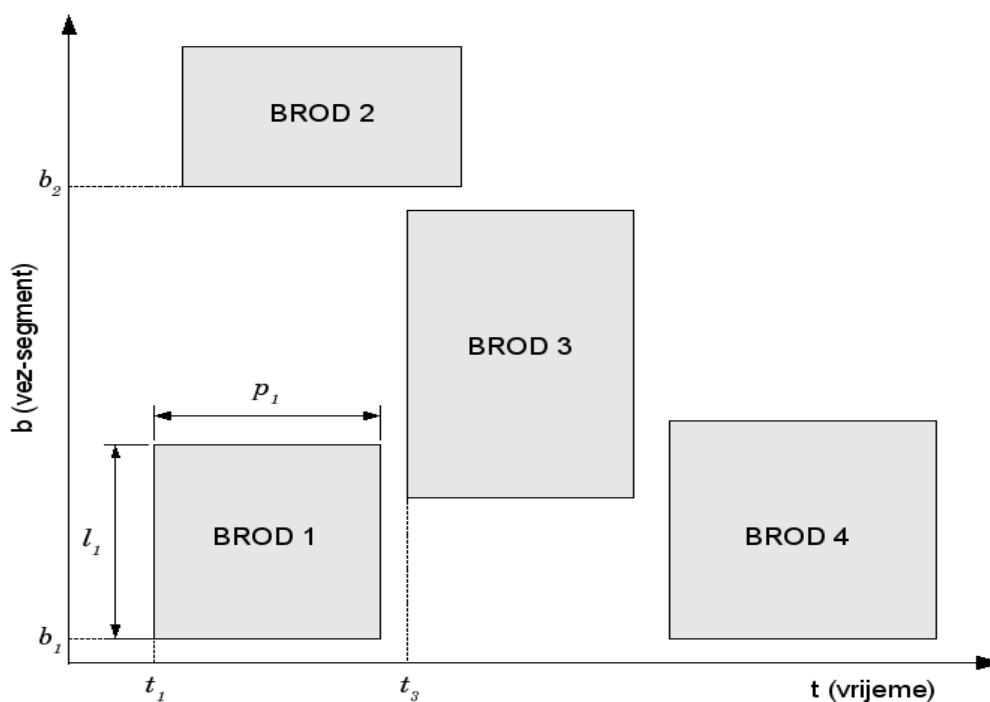
- izvedba s fiksnim vezovima,
- izvedba s kontinuiranim vezovima,
- hibridna izvedba vezova.

U izvedbi s fiksnim vezovima primjenjuje se tradicionalni način određivanja vezova. Svaki brod zauzima točno jedan vez označen odgovarajućim brojem. Kod ovakve izvedbe vezova pristan ne mora biti u linijskoj izvedbi već su moguće i druge varijante (npr. „L“, „T“ ili „U“ izvedba).

Kod izvedbe s kontinuiranim vezovima nema strogo određenih vezova, nego se brod može vezati bilo gdje uzduž pristana. Određivanje pozicije na pristanu složenije je nego u prvom slučaju, ali na ovaj način bolje se iskorištava prostor.

Hibridna izvedba predstavlja kombinaciju dviju prethodno spomenutih varijanti (Slika 9) prema kojoj je pristan podijeljen na niz diskretnih vezova ili segmenata koji mogu biti proizvoljnih dimenzija. Brod može zauzimati više segmenata (vezova) ovisno o svojoj duljini.

Dodjela vezova odvija se na način da se svakom brodu ovisno o predviđenom vremenu dolaska u luku, odredi mjesto na pristanu, odnosno pridruži mu se odgovarajući broj segmenata lučkog pristana. Da bi to bilo moguće, potrebno je znati duljinu broda, očekivano vrijeme dolaska broda, predviđeno vrijeme trajanja prekrcajnih operacija i očekivano vrijeme odlaska broda.



Slika 10: Grafički prikaz BAP problema

Izvor: autor prema Lim (1998)

Problem se može prikazati grafički Kartezijevim koordinatnim sustavom gdje apscisa predstavlja vrijeme, a ordinata duljinu pristana (Slika 10). Prostorno-vremenska pozicija

broda određena je četverokutom čija je površina produkt te dvije veličine. Rješenje problema predstavlja optimalan raspored brodova uzduž pristana u planiranom vremenskom horizontu, a rezultat je funkcije minimizacije ukupnog vremena boravka brodova u luci.

Pozicija brodova na kontejnerskom pristanu važna je zbog rasporeda rada kontejnerskih obalnih dizalica i zbog određivanja pozicija kontejnera na slagalištu. Treba uvijek težiti da su kontejneri smješteni što je bliže moguće mjestu na kojem će brod biti privezan. Ukoliko se radi o ukrcaju kontejnera na brod, prije dolaska broda potrebno je izvršiti konsolidaciju kontejnera na terminalu. U tom slučaju potrebno je znati unaprijed na koji dio terminala će se brod vezati. Kod postavljanja modela ovo ograničenje može se uzeti u obzir i pozicije kontejnera na terminalu vrednovati kroz objektu funkciju kojom se definira optimalno rješenje.

Formulacija BAP modela u mnogome ovisi o odnosu prema vremenu trajanja prekrcajnih operacija. U većini modela koji se javljaju u literaturi ovo vrijeme je određeno deterministički, a razlog je taj što je trajanje prekrcajnog procesa samo po sebi rezultat rješenja jednog ili više optimizacijskih problema. Vrijeme prekrcajnih operacija ovisi o rezultatu rješenja problema redoslijeda rada obalnih dizalica (*QCSP* problem), a ono pak o rasporedu tereta na brodu, broju pridruženih dizalica i prekrcajnoj potražnji. Zbog toga se trajanje prekrcajnih operacije svodi na parametarsko određivanje veličine p , pojedinačno za svaki brod i služi kao ulazni podatak za model.

S obzirom na odnos prema trajanju prekrcajnih operacija, BAP problemi se mogu klasificirati (Meisel, 2009, p.20) u četiri skupine:

- trajanje prekrcajnih operacija je fiksno određeno i nepromjenljivo,
- trajanje prekrcaja različito je ovisno o dodijeljenom vezu,
- trajanje prekrcaja ovisno je o broju dizalica koje su dodijeljene brodu,
- trajanje prekrcaja ovisno je o redoslijedu rada obalnih dizalica.

Ukoliko se BAP problem promatra samostalno, onda su prve dvije opcije prihvatljive. Međutim, ako se optimizira cjelokupni proces obalnog prekrcajnog podsustava, onda se moraju uzeti u obzir posljednje dvije opcije što uključuje rješavanje *QCSP* problema i integriranje *QCAP* problema.

Cilj optimizacije kod BAP problema je u osnovi raspodjela vezova i vremena priveza na način da ukupno vrijeme boravka brodova u luci bude minimalno. To znači da je potrebno što bolje iskoristiti prostor pristana i pravovremeno osigurati privez broda na odgovarajuće mjesto na pristanu. U teoriji postoje različite varijacije BAP problema i funkcije cilja ovisno o tome koja se svrha želi postići (Tablica 2).

Tablica 2: Varijacije BAP problema ovisno o funkciji cilja

<i>Cilj optimizacije</i>	<i>Veličina</i>	<i>Objekt</i>
minimum	vrijeme	ukupno vrijeme čekanja brodova u luci
minimum	duljina	duljina pristana kojeg zauzimaju brodovi na vezu
minimum	trošak	penali uslijed kašnjenja isplovljenja broda
minimum	vrijeme	trajanje prekrcajnog procesa
maksimum	vrijeme	razdoblje između dva sukcesivna dolaska brodova na vez
minimum	promjena vremena	odstupanje od početnog rasporeda brodova
minimum	promjena vremena	odstupanje od predviđenog vremena isplovljenja broda
minimum	trošak/ušteda	potrošnja goriva prilagođavanjem dolaska broda u određeno vrijeme
minimum	trošak	prilagodba pozicije priveza na terminalu

Osim osnovnih varijacija prikazanih u tablici 2 postoje i različite kombinacije veličina i objekata optimizacije.

4.1.2. Model za rješavanje BAP problema

U nastavku se prikazuju dva tipa algoritma za rješavanje BAP problema te se navode specifičnosti njihovog rješavanja. Modeli razvijeni od strane pojedinih autora transformirani su u programski kod, analizirani su njihovi rezultati te su navedeni uočeni nedostaci. Temeljem toga izvršena je odgovarajuća prilagodba modela.

4.1.2.1. Algoritam 1

Definiraju se sljedeći skupovi podataka:

$V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$ predstavlja skup brodova s indeksom $i \in \mathbb{N} : i \leq N$, gdje je N ukupni broj brodova u sustavu.

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_L\}$ predstavlja skup vezova tj. pozicija na pristanu s indeksom $s \in \mathbb{N} : s \leq L$, gdje je L maksimalni broj segmenata pristana odgovarajuće duljine.

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_H\}$ predstavlja skup vremenskih segmenata odgovarajućeg trajanja s indeksom $t \in \mathbb{N} : t \leq H$, gdje je H vremenski horizont planiranja.

Trajanje prekrcajnog procesa kod BAP problema unaprijed je pretpostavljeno i fiksno određeno. U trajanje prekrcajnog procesa sadržana su vremena samog prekrcaja tereta, pripremno vrijeme te završno vrijeme. Vremena prilaza broda te napuštanja veza nisu uzeta u obzir tj. $t_2 = t_4$, $t_6 = t_7$ (Slika 8). Vrijeme trajanja prekrcajnog procesa predstavlja ukupno vrijeme boravka broda na vezu koje se unaprijed određuje za svaki brod, uz poznati normativ za tehnološki proces ukrcaja/iskrcaja tereta. Pored toga, za svaki brod unaprijed je poznato vrijeme dolaska u luku (ETA) dok predviđeno vrijeme isplovljenja (ETD) predstavlja zbroj vremena dolaska, vremena čekanja na vez i vremena boravka na vezu.

Ulazni parametri za rješavanje modela su:

l_i – duljina broda,

α_i – predviđeno vrijeme dolaska broda (ETA),

p_i – trajanje prekrcaja (vrijeme boravka broda na vezu),

L – duljina pristana (broj segmenata)⁷,

H – vremenski horizont planiranja u vremenskim jedinicama⁸,

M – velika cjelobrojna vrijednost.

⁷ Duljina segmenata uzima se proizvoljno, ovisno koliko se selektivno želi podijeliti pristan na sekcije.

⁸ Vremenska jedinica često se izražava terminom vremenski prozor (*engl. time window*). Vremenski horizont dijeli se u proizvoljni broj vremenskih prozora čije trajanje ovisi o konkretnom slučaju. U praksi se vremenski prozori vezuju uz smjenski rad.

Zavisne varijable postavljene u modelu su:

w_i – čekanje broda na slobodan vez,

d_i – vrijeme odlaska broda,

A – slobodan, neiskorišten prostor u L-H dijagramu.

Definiraju se trodimenzionalne binarne varijable kojima se određuje relacija broda, vezova i vremena boravka na vezu:

$$x_{ist} = \begin{cases} 1, & \text{ako je brod } i \text{ smješten na poziciji } s \text{ u intervalu } t \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{ako su početnom dijelu broda } i \text{ pridruženi segmenti } j \text{ i } k \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (4.2)$$

Objektna funkcija minimizira ukupno vrijeme boravka brodova u luci u zadanom vremenskom razdoblju. Modificirani oblik funkcije bez prioriteta⁹ na temelju modela koji su u originalnoj verziji izradili Guan i Cheung (2004, p.81) glasi:

$$MinZ = \sum_{i \in V} (d_i - a_i) \quad (4.3)$$

uz ograničenja (Guan & Cheung, 2004, p.81):

$$\sum_{j=1}^{L-l_i+1} \sum_{k=a_i}^{H-p_i+1} y_{ijk} = 1 \quad \forall i \in V \quad (4.4)$$

$$\sum_{s=j}^{j+l_i-1} \sum_{t=k}^{k+p_i-1} x_{ist} \geq l_i p_i + M(y_{ijk} - 1) \quad \forall i \in V, \forall j \in S, \forall k \in T | k \geq a_i \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ist} \leq 1 \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (4.6)$$

$$\sum_{j=1}^{L-l_i+1} \sum_{k=a_i}^{H-p_i+1} k y_{ijk} + p_i = d_i \quad \forall i \in V \quad (4.7)$$

⁹ U originalnom modelu brodovima se pridružuju odgovarajući prioriteti, narušavajući pravilo jednakog tretmana brodova koji dolaze u luku.

$$x_{ist} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (4.8)$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V, \forall j \in S, \forall k \in T \quad (4.9)$$

Ograničenje (4.4) osigurava dodjeljivanje točno jedne početne pozicije, uvažavajući duljinu i vrijeme dolaska broda. Binarna varijabla y_{ijk} postavlja početni segment broda na poziciju veza koja se nalazi unutar intervala $[1, (L - l_i + 1)]$ i u vremenski segment koji se nalazi unutar intervala $[a_i, (H - p_i + 1)]$. Ukoliko bi njezina vrijednost $y_{ijk} = 1$ bila na poziciji veza izvan zadanog intervala, brod ne bi bilo moguće smjestiti na pristan. Primjerice, kada bi brod V_1 zauzimao 6 od ukupno 10 pozicija, početni segment broda može biti postavljen na segmente $S_{V_1} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$.

Ograničenje (4.5) osigurava da se brodu pozicije dodjeljuju sukcesivno, jedna za drugom, ovisno o duljini broda. Izraz $M(y_{ijk} - 1)$ ukida ovo ograničenje u slučaju kada je $y_{ijk} = 0$ tj. kada brodu i nije dodijeljena pozicija, kako bi se osiguralo postojano rješenje. U tom slučaju velika cjelobrojna konstanta M osigurava da izraz $M(y_{ijk} - 1)$ ima negativnu vrijednost i da time uvjet nejednadžbe (4.5) bude zadovoljen.

Izraz (4.6) određuje da samo jedan brod smije biti pridružen određenoj poziciji pristana u istom vremenskom segmentu. Vrijeme priveza broda predstavlja izraz $\sum_{j=1}^{L-l_i+1} \sum_{k=a_i}^{H-p_i+1} ky_{ijk}$ u (4.7), na temelju kojega se uz konstantno p_i izračunava vrijeme isplovljenja. Uvjet za binarne varijable postavljen je u ograničenjima (4.8) i (4.9).

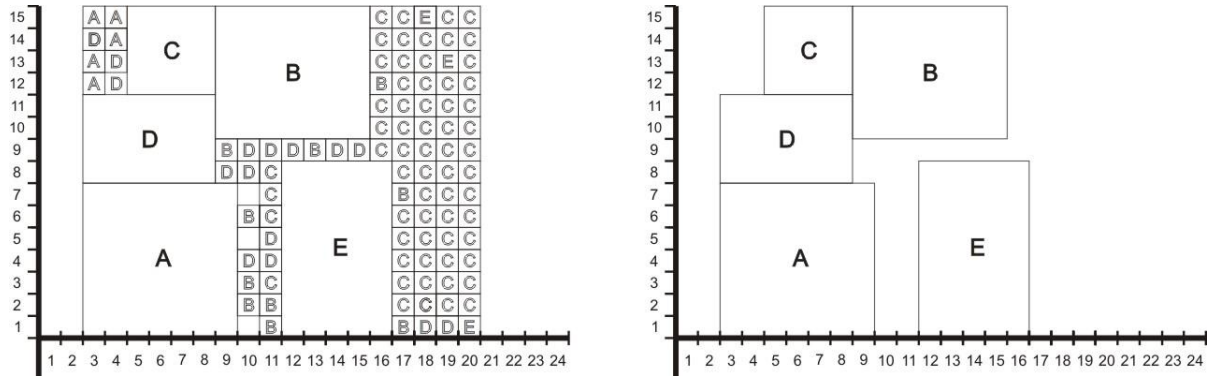
Primjer 1

Programskim alatom LINGO konstruiran je programski kod te je kao primjer postavljen sustav s pet brodova s vrijednostima parametara :

Tablica 3: Ulazni podaci za problem raspodjele vezova (*Primjer 1*)

V_i	A	B	C	D	E
l_i	7	6	4	4	8
a_i	3	5	5	3	12
p_i	7	7	4	6	5

Grafičko rješenje problema prikazuje slika 11. Na lijevom dijagramu prikazano je rješenje prema originalnom modelu. Vidljivo je da model ne pridružuje ispravno pozicije i segmente brodovima te, pored onih koje su ispravno pridružene, postoji veliki broj krivo pridruženih segmenata tako da njihov broj ne odgovara prostorno-vremenskim dimenzijama brodova koje su predstavljene četverokutima.



Slika 11: Grafičko rješenje BAP problema - *Primjer 1*

Uočeni problem uvelike otežava identifikaciju pravih pozicija i segmenata tj. otežava lokaciju broda u L-H dijagramu. Kako bi se korigirao model, potrebno je dodati sljedeća ograničenja:

$$\sum_{i=1}^N l_i p_i + A = L \cdot H \quad (4.10)$$

$$\sum_{s=1}^L \sum_{t=1}^H x_{ist} = l_i p_i \quad \forall i \in V \quad (4.11)$$

$$d_i = \alpha_i + p_i + w_i \quad \forall i \in V \quad (4.12)$$

Najprije je izrazom (4.10) potrebno definirati prostor mogućih rješenja. Brod može zauzeti samo onoliko pozicija na pristanu koliko je njegova duljina i samo onoliko vremenskih segmenata koliko je njegov očekivani boravak na vezu što je osigurano s (4.11). Konačno, iako ne utječe na sliku rješenja, poželjno je da model ujedno izračunava vrijeme čekanja ovisno o zadanim parametrima (4.12). Nakon izvršene modifikacije i

dodavanja ograničenja (4.10)-(4.12) na desnom dijagramu prikazano je ispravno rješenje za postavljeni primjer (Slika 11).

4.1.2.2. Algoritam 2

Prethodni model koristi algoritam koji kreira veliki broj cjelobrojnih varijabli. Ukoliko je 6 brodova u sustavu, a veličina prostorno-vremenske matrice 15x20, model generira 3600 cjelobrojnih varijabli od čega je veliki broj binarnih. Za svaki dodatni brod u sustavu generira se dodatnih 600 cjelobrojnih varijabli. Na taj način model postaje prekompleksan s nemogućnošću pronalaženja optimalnog rješenja u prihvatljivom vremenu.

Algoritam koji slijedi, pozicioniranje brodova na pristanu i određivanje varijabli odlučivanja svodi na odnose između brodova umjesto na slaganje segmenata. Za razliku od prvog algoritma, broj cjelobrojnih varijabli za 6 brodova i istu veličinu matrice iznosi 72, a ukupni broj varijabli 102. Za isti problem LINGO (*Pentium Dual-Core* procesor na 2.7 MHz) je za nalaženje optimalnog rješenja po algoritmu 1 trebao 20 minuta, dok je za algoritam 2 bila dovoljna 1 sekunda.

Ovaj algoritam izveden je iz tzv. problema višerednog tlocrtnog raspoređivanja (engl. *multirow layout problem*) u kojem se određuje raspored pojedinih proizvodnih ili uslužnih entiteta nejednake površine kod projektiranja poslovnih prostora, zgrada ili prometnih terminala (Heragu, 2008). Cilj je dobiti takav raspored koji će osigurati najkraći slijed kretanja korisnika usluga ili ako je riječ o proizvodnom pogonu najkraći put kretanja proizvodnog materijala.

Primjena *multirow layout* problema na problem dodjele veza relativno je jednostavna. Pri tome brodovi predstavljaju uslužne entitete, a jedina razlika je u tome što je kod *multirow layout* problema prostor fiksno određen, dok je kod BAP problema samo prostorna dimenzija fiksno određena duljinom pristana.

U nastavku se daje prikaz algoritma temeljenog na *multirow layout* problemu, prema Guan & Cheung (2004). Definiraju se sljedeći skupovi podataka:

$V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$ predstavlja skup brodova s indeksima $i, j \in \mathbb{N} : i, j \leq N$, gdje je N ukupni broj brodova u sustavu. Ulazni parametri za rješavanje modela: l_i, a_i, p_i, L, H istovjetni su kao i kod prvog algoritma. Isto vrijedi i za varijable w_i te d_i .

Postavljaju se nove varijable odlučivanja:

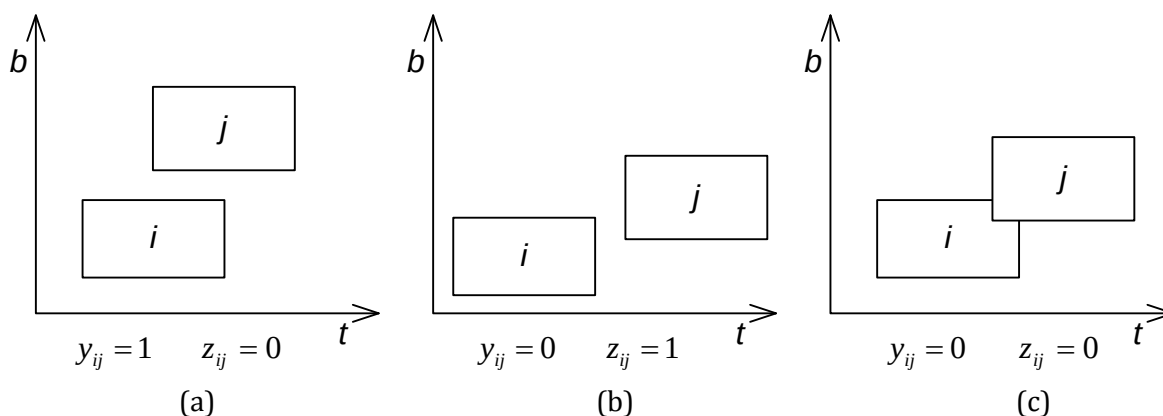
b_i – pozicija broda na pristanu (pozicija na kojoj je vezan početni dio broda),

s_i – vrijeme priveza broda tj. vrijeme početka prekrcaja,

y_{ij} – odnos parova brodova u prostoru (vertikalna komponenta),

z_{ij} – odnos parova brodova u vremenu (horizontalna komponenta).

Varijable y_{ij} i z_{ij} $i, j \in V$ jesu binarne varijable odlučivanja koje uspoređivanjem parova brodova u sustavu određuju njihov položaj u prostorno-vremenskom dijagramu (Slika 12). Ukoliko se nalaze u položaju kao na dijagramu (a), vremena boravka na vezu im se preklapaju pa ih treba prostorno razdvojiti. Ako dolaze u različita vremena na vez, mogu dijeliti isti vez ili pozicije (b). Treći slučaj je kada se brodovi preklapaju po vremenu i pozicijama koje trebaju zauzeti (c) što model treba onemogućiti.



Slika 12: Vrijednost varijabli odlučivanja ovisno o položaju brodova

Izvor: autor prema Moorthy i Teo (2006)

Varijabla y_{ij} određuje da li je brod i „ispod“ broda j ili nije te na taj način određuje položaj brodova na pristanu. Varijabla z_{ij} određuje da li je brod i „lijevo“ od broda j ili nije te na taj način određuje vrijeme priveza. Domene varijable definirane su kako slijedi:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & b_j \geq b_i + l_i \\ 0, & b_j < b_i + l_i \end{cases} \quad (4.13)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & s_j \geq d_i \\ 0, & s_j < d_i \end{cases} \quad (4.14)$$

Objektna funkcija određena je izrazom (4.3) kao i u slučaju algoritma 1. Ograničenja predstavljaju modificiranu varijantu prema Guanu i Cheungu (2004, p.79):

$$b_j + M(1 - y_{ij}) \geq b_i + l_i \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (4.15)$$

$$s_j + M(1 - z_{ij}) \geq d_i \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (4.16)$$

$$y_{ij} + y_{ji} + z_{ij} + z_{ji} \geq 1 \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (4.17)$$

$$s_i + p_i = d_i \quad \forall i \in V \quad (4.18)$$

$$a_i + w_i = s_i \quad \forall i \in V \quad (4.19)$$

$$s_i \geq a_i \quad \forall i \in V \quad (4.20)$$

$$w_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (4.21)$$

$$b_i \in [1, (L - l_i + 1)] \quad (4.22)$$

Ograničenja (4.15) , (4.16) i (4.17) određuju poziciju broda u prostorno-vremenskom dijagramu na način da ne postoji preklapanje. Ako je $y_{ij} = 1$ u (4.15) početni dio „gornjeg“ broda j ne smije biti na nižoj poziciji b od pozicije na kojoj se nalazi krajnji dio „donjeg“ broda i uvažavajući sigurnosni razmak između njih. Slično vrijedi i u slučaju kada je $z_{ij} = 1$ u (4.16) jer tada brod koji je „desno“ i dolazi kasnije na pristan ne smije biti vezan prije nego što brod prije njega napusti vez, uvažavajući vrijeme potrebno za manevriranje. Ako je u (4.15) ili (4.16) vrijednost varijabli $y_{ij} = 0$ odnosno $z_{ij} = 0$ tada se ograničenja neutralizira velikom cjelobrojnomo konstantom M kako bi se osigurao prostor mogućih rješenja. Slučaj kada se brodovi u potpunosti preklapaju tj.

$y_{ij} = 0 \wedge z_{ij} = 0$ nije dozvoljen zbog (4.17) tako da barem jedna od ovih varijabli mora imati vrijednost 1.

Potrebno je osigurati odnos između vremena dolaska, čekanja, priveza i odlaska. Ti odnosi definirani su u (4.18) i (4.19). Vrijeme priveza ne smije biti određeno ranije od vremena dolaska broda. Područje vrijednosti varijabli s_i , w_i i b_i određeno je sa (4.20), (4.21) i (4.22). Gornja granica b_i je najveća pozicija na kojoj, ovisno o duljini broda, njegov početni dio može biti smješten, a da se brod cijelom svojom dužinom nalazi uz pristan.

4.2. Problem raspoređivanja obalnih dizalica

4.2.1. Definiranje problema

Rješavanjem problema dodjele veza dobiva se optimalan raspored brodova na pristanu za odabrani vremenski horizont planiranja. Rješavanjem modela iz prethodnog poglavlja kao rezultat se dobije maksimalno iskorištenje obalnog prostora i najkraće ukupno vrijeme boravka brodova u luci. Glavni parametri pri tome su duljina broda, duljina pristana, vrijeme dolaska broda te trajanje prekrcajnih operacija. Trajanje prekrcajnog procesa unaprijed je procijenjeno na temelju prekrcajne potražnje i fiksno određeno posebno za svaki brod.

Upravo posljednja činjenica predstavlja slabost BAP rješenja s obzirom na dinamičnost lučkog sustava i nemogućnost da se ostvari pretpostavljena produktivnost prekrcajnog procesa. Pri tom je izgledno da do prekoračenja vremena trajanja prekrcajnog procesa pojedinog broda može doći uslijed ograničene dostupnosti resursa (obalnih dizalica) na terminalu.

Kako bi se dobilo prihvatljivo rješenje s obzirom na realne uvjete rada, potrebno je osim raspodjele brodova po pristanu, rasporediti dizalice po brodu tj. uz BAP problem riješiti i QCAP problem. Svakom se brodu dizalice dodjeljuju ovisno o njegovoj prekrcajnoj potražnji, broju kontejnera za ukrcaj/iskrcaj te s obzirom na njihovu dostupnost. Potražnja za resursima – potrebni rad, dobiva se iz prekrcajne potražnje, a iskazuje brojem dizalica-sati. Može se odrediti kao kvocijent ukupnog broja kontejnera koje je

potrebno ukrcati/iskrcati i normiranog broja radnih ciklusa u jednom satu, prema formuli (4.23).

$$m_i = \frac{D_i}{N_c} [QCh] \quad \forall i \in V \quad (4.23)$$

gdje je:

m_i – potražnja za resursima – potreban rad, iskazan u dizalica-satima $[QCh]$,

D_i – prekrcajna potražnja, broj kontejnera koje je potrebno prekrcati,

N_c – broj ciklusa obalne kontejnerske dizalice u jednom satu.

Na temelju prekrcajne potražnje i u ovisnosti o broju pridruženih dizalica q može se izračunati očekivano trajanje prekrcajnog procesa p_i za pojedini brod. Međuzavisnost trajanja prekrcajnog procesa i broja pridruženih dizalica, međutim, nije linearna. Ona ovisi o koeficijentu iskorištenja kapaciteta dizalica koji se može kretati između $(0 < \alpha < 1)$ ovisno o rasporedu tereta na brodu i redoslijedu obavljanja prekrcajnih zadataka. Meisel (2009) kako je navedeno u radu Schonfelda i Sharafeldiena (1985), ovaj koeficijent naziva eksponentom ometanja koji smanjuje efektivni učinak dizalica. Očekivano trajanje prekrcajnog procesa tada glasi¹⁰ (Meisel, 2009, p.57):

$$p_i = \frac{D_i}{N_c} \cdot \frac{1}{q_i^\alpha} = m_i q_i^{-\alpha} [h] \quad (4.24)$$

gdje je:

q_i – broj dizalica koje se pridružuju brodu,

α – koeficijent iskorištenja kapaciteta (eksponent ometanja),

p_i – očekivano trajanje prekrcajnih operacija za brod i .

¹⁰ Pojednostavljen izraz u odnosu na izvornik jer nije uzet u obzir utjecaj preferirane pozicije veza na povećanje prekrcajne potražnje.

Formula (4.24) daje različite vrijednosti trajanje prekrcajnog procesa za pretpostavljeni broj obalnih dizalica koje se mogu pridružiti brodu. Istu je za određivanje minimalnog i maksimalnog trajanja prekrcajnog procesa moguće modificirati tako da glasi:

$$p_i^{\min} = m_i(q_i^{\max})^{-\alpha} \quad (4.25)$$

$$p_i^{\max} = m_i(q_i^{\min})^{-\alpha} \quad (4.26)$$

Kada se dobije rješenje problema raspodjele dizalica na opisani način, vrijeme trajanja prekrcajnog procesa za određeni brod vrlo vjerojatno neće biti istovjetno pretpostavljenom vremenu p iz BAP modela. Razlog tome je što QCAP uzima u obzir raspoloživost dizalica i njihovu dostupnost brodu u određeno vrijeme, dok BAP ovu okolnost ignorira. To znači da se mora ponoviti proces rješavanja BAP problema s novim pretpostavljenim vremenima trajanja prekrcaja, a potom ponovno rješavati QCAP problem. Na taj način optimizaciju nije moguće jednostavno postići zbog međuzavisnosti veličina koje imaju svojstvo varijabli odlučivanja u jednom slučaju te parametarskih varijabli u drugom slučaju.

4.2.2. Model integriranog rješavanja BAP i QCAP problema

Drugi način je integracija oba problema u jedinstveni problem raspodjele brodova i dizalica po pristanu. Integracija se ostvaruje jedinstvenim modelom optimizacije kojeg su prvi predstavili Park i Kim (2003). Daljnji doprinos rješavanju integriranog problema predstavlja model kojeg su predstavili Meisel i Bierwirth (2009). Model koji se ovdje razmatra predstavlja modificiranu formulaciju BACAP¹¹ modela pri čemu su korišteni već razvijeni matematički oblici navedenih autora. Sama objektna funkcija također je modificirana. Za razliku od navedenih autora koji integraciju ostvaruju pridodavanjem ekonomskih atributa, ovdje se objektna funkcija temelji na tehnološkoj integraciji sustava.

¹¹ BACAP – engl. *Berth Allocation and Crane Assignment Problem* označava objedinjeni problem dodjele veza i raspodjele dizalica po brodovima na terminalu

Definiraju se sljedeći skupovi podataka:

$V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$ predstavlja skup brodova s indeksom $i \in \mathbb{N} : i \leq N$, gdje je N ukupni broj brodova u sustavu.

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_H\}$ predstavlja skup vremenskih segmenata odgovarajućeg trajanja s indeksom $t \in \mathbb{N} : t \leq H$, gdje je H vremenski horizont planiranja.

$Q = \{1, 2, \dots, q\}$ predstavlja skup obalnih dizalica s indeksom $k \in \mathbb{N} : k \leq q$, gdje je q ukupni broj dizalica na pristanu.

Ulazni parametri za rješavanje modela su:

l_i – duljina broda,

α_i – predviđeno vrijeme dolaska broda,

m_i – potrebni rad dizalica iskazan u broju dizalica-sati,

q_i^{max} – maksimalni broj dizalica koje je moguće pridružiti brodu¹²,

q – ukupni broj dizalica na pristanu,

L – duljina pristana,

H – vremenski horizont planiranja,

M – velika cjelobrojna vrijednost.

Zavisne varijable postavljene u modelu su:

w_i – trajanje čekanja broda na slobodan vez,

p_i – trajanje prekrcajnog procesa,

d_i – vrijeme odlaska broda.

¹² Maksimalni broj dizalica koje mogu istovremeno raditi na brodu ovisno o rasporedu tereta na brodu i tehničkim obilježjima broda.

Treba uočiti da trajanje prekrcajnog procesa za pojedini brod p_i nije unaprijed definirani parametar nego varijabla čija vrijednost ovisi o broju pridruženih vremenskih jedinica u zavisnosti o broju pridruženih dizalica.

Varijable odlučivanja postavljene u modelu jesu iste one koje su sadržane u BAP modelu $(b_i, s_i, y_{ij}, z_{ij})$, uz dodatak varijabli r_{it} i r_{itk} koje određuju trajanje prekrcajnog procesa, a time posredno i vrijeme odlaska broda s veza. Definirane su sljedećim izrazima (Meisel, 2009):

$$r_{it} = \begin{cases} 1, & \text{ako je barem jedna dizalica pridružena brodu } i \text{ u vremenu } t \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (4.27)$$

$$r_{itk} = \begin{cases} 1, & \text{ako je točno } k \text{ dizalica pridruženo brodu } i \text{ u vremenu } t \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (4.28)$$

Objektna funkcija minimizira ukupno vrijeme boravka broda u luci kao zbroj ukupnog vremena čekanja broda na vez i vremena boravka na vezu radi obavljanja prekrcajnih operacija. Ima sljedeći oblik:

$$MinZ = \sum_{i \in V} w_i + \sum_{i \in V} \sum_{t \in T} r_{it} \quad (4.29)$$

uz ograničenja:

$$\sum_{t=1}^H \sum_{k=1}^{q_i^{\max}} k r_{itk} \geq m_i \quad \forall i \in V \quad (4.30)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{q_i^{\max}} k r_{itk} \leq q \quad \forall t \in T \quad (4.31)$$

$$\sum_{k=1}^{q_i^{\max}} r_{itk} = r_{it} \quad \forall i \in V, \forall t \in T \quad (4.32)$$

$$\sum_{t=1}^H r_{it} = d_i - s_i \quad \forall i \in V \quad (4.33)$$

$$(t+1)r_{it} \leq d_i \quad \forall i \in V, \forall t \in T \quad (4.34)$$

$$tr_{it} + H(1 - r_{it}) \geq s_i \quad \forall i \in V, \forall t \in T \quad (4.35)$$

$$r_{it}, r_{itk}, y_{ij}, z_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4.36)$$

Potrebno je još dodati ograničenja za BAP problem od (4.15) - (4.22) čime je model kompletiran. Ograničenje (4.30) osigurava da je zadovoljena prekrcajna potražnja za prekrcajom kontejnera. Planirani transportni rad izražen u broju dizalica-sati mora biti dovoljan da se kompletan teret ukrca/iskrca. Dizalice se dodjeljuju brodovima prema vremenskim jedinicama pri čemu za svaki vremenski segment zbroj dodijeljenih dizalica po brodovima ne smije biti veći od stvarnog broja dizalica na pristanu (4.31). Međuzavisnost varijabli r_{it} i r_{itk} uspostavlja ograničenje (4.32).

Trajanje prekrcajnog procesa određeno je kao zbroj vremenskih segmenata u kojima je brodu dodijeljena barem jedna dizalica (4.33). Model pretpostavlja da se prekrcajni proces ne prekida pa se dizalici sukcesivno pridružuju vremenski segmenti u granicama koje su definirane varijablama s_i i d_i . To je osigurano ograničenjima (4.34) i (4.35). Uvjeti za binarne varijable postavljeni su u (4.36). Ograničenja prenesena iz BAP modela detaljno su objašnjena ranije.

4.2.3. Integrirani model optimizacije raspodjele vezova i obalnih dizalica uz ograničenu dubinu mora uz pristan

Jedan od čestih utjecajnih čimbenika na odluku o dodjeli veza je dubina mora uz pristan. Zbog ograničene dubine uz pristan ili na pojedinom dijelu pristana, nije moguće prihvatiti brodove čiji gaz je veći od dopuštenoga. U tom slučaju takve brodove potrebno je postaviti na vezove na kojima dubina nije ograničavajući čimbenik. Kako bi se ovo ograničenje moglo integrirati u prethodni model, potrebno je napraviti određene modifikacije.

Kako je objašnjeno u poglavlju 4.1 svaki brod zauzima pozicije iz skupa S ovisno o svojoj duljini. Ako je b_i početna pozicija broda, a l_i njegova duljina, tada brod zauzima $b_i + l_i - 1$ pozicija na pristanu. Za svaku od pozicija potrebno je pridružiti atribut maksimalne dubine uz pristan s oznakom h_s . Hoće li brod konkurirati za određeni vez ovisi o gazu broda koji je promjenljiva veličina, a ovisi o dimenzijama broda i masi tereta na brodu.

Gaz broda određen je parametrom τ_i ¹³. Njegova vrijednost mora se odabrati između stvarne vrijednosti gaza na dolasku u luku i hipotetske vrijednosti gaza kod odlaska broda iz luke, pri čemu se uzima veća vrijednost između gaza na dolasku τ_{arr} i gaza na odlasku iz luke τ_{dep} tj. $\tau_i = \max\{\tau_{arr}, \tau_{dep}\}$.

Za privez broda mora biti zadovoljen uvjet definiran izrazom $h_s > \tau_i + UKC$. To znači da dubina uz pristan mora biti veća od maksimalnog gaza broda uvećanog za minimalnu dubinu ispod brodske kobilice – UKC ¹⁴. Kako bi se utvrdilo koji vezovi zadovoljavaju zadani uvjet za pojedine brodove koji dolaze u luku i kako bi se onemogućio privez broda na pozicije koje nemaju dovoljnu dubinu mora uz pristan, definiraju se dvije nove binarne varijable:

$$W_{is} = \begin{cases} 1, & \text{ako je brodu } i \text{ dopušten vez na poziciji } s \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (4.37)$$

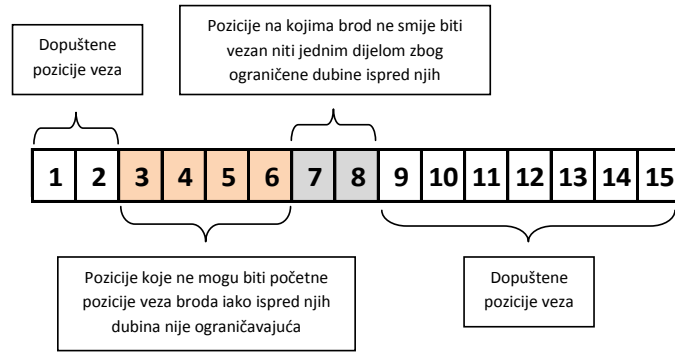
$$x_{is} = \begin{cases} 1, & \text{ako je početni dio broda } i \text{ vezan na poziciji } s \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (4.38)$$

Kako bi se pravilno utvrdila vrijednost W_{is} u (4.37), potrebno je uzeti u obzir ograničenja dubine po cijeloj duljini broda. To je učinjeno na sljedeći način:

Za $\forall i \in V$ definira se skup pozicija pristana $s \in S^0$ gdje je $S^0 \subset S$ za koje vrijedi $h_s \leq \tau_i + UKC$ na kojima vez nije dopušten tj. $b_i \notin S^0$. Skup S^0 definiran je na intervalu kojemu je donja granica određena izrazom $(s - l_i + 1)$. Na taj način izbjegnuti su slučajevi da brod dijelom svoje dužine bude na nedopuštenim pozicijama. Naime, ako je na poziciji s dubina ograničavajući čimbenik za brod i , onda isto ograničenje vrijedi za sve potencijalne početne pozicije koje su niže za duljinu broda (Slika 13). U suprotnom bi se mogao desiti slučaj da jedan dio broda ipak zauzme nedozvoljenu poziciju iako je njegov početni dio privezan na vez na kojem je dovoljna dubina. Slika 13 prikazuje dopuštene i nedopuštene pozicije veza za brod koji svojom dužinom zauzima 5 segmenata pristana.

¹³ Iako je uobičajeno da se gaz broda označava sa T , ovdje je napravljen izuzetak kako bi se oznaka veličine gaza razlikovala od oznake za skup vremenskih segmenata u razdoblju planiranja.

¹⁴ UKC – *Under keel clearance*, predstavlja udaljenost između najniže uronjene točke broda i morskog dna.



Slika 13: Dozvoljene pozicije broda na pristanu s obzirom na ograničenje dubine

Sukladno navedenom vrijednost W_{is} može se zapisati sljedećim izrazom:

$$W_{is} = 1 \quad \text{za} \quad \forall i \in V \wedge \forall s \in S \setminus S^0 \quad (4.39)$$

Konačno, koristeći model (4.29) potrebno je na postojeća ograničenja od (4.15)-(4.22) te (4.30)-(4.36) dodati nova:

$$\sum_{s=1}^L x_{is} = 1 \quad \forall i \in V \quad (4.40)$$

$$\sum_{s=1}^L s x_{is} W_{is} = b_i \quad \forall i \in V \quad (4.41)$$

Povezivanje s prethodnim modelom ostvaruje se preko varijable x_{is} . Ograničenje (4.40) onemogućava postojanje više početnih pozicija. Veza između varijabli odlučivanja kojima se definira početna pozicija broda na pristanu ostvaruje se preko (4.41). Istovremeno ovo ograničenje eliminira mogućnost da brod zauzme jednu ili više nedopuštenih pozicija jer bi u slučaju $W_{is} = 0$ vrijednost varijable b_i bila jednaka nuli, a to znači izvan intervala dozvoljenih vrijednosti kako je specificirano u (4.22).

Kako funkcionira kompletan integrirani model optimizacije dodjele veza i obalnih dizalica kada se kao uvjet pojavljuje zadovoljavanje minimalne dubine mora uz pristan u ovisnosti o gazu broda prikazano je na sljedećem primjeru.

Primjer 2

Potrebno je napraviti plan optimalnog rasporeda brodova na pristanu duljine 750 metara za vremenski horizont od 60 sati. Neka je pristan prostorno podijeljen na 30 segmenata (pozicija) svaki duljine od 25 metara. Vremenski horizont H podijeljen je na 60 vremenskih prozora, svaki u ovom slučaju predstavlja interval od 1 sata. Ukupni broj obalnih dizalica na pristanu $q = 6$. U sustavu se nalazi 6 brodova s podacima koje prikazuje tablica 4.

Tablica 4: Ulazni parametri o brodovima koji se očekuju na terminalu

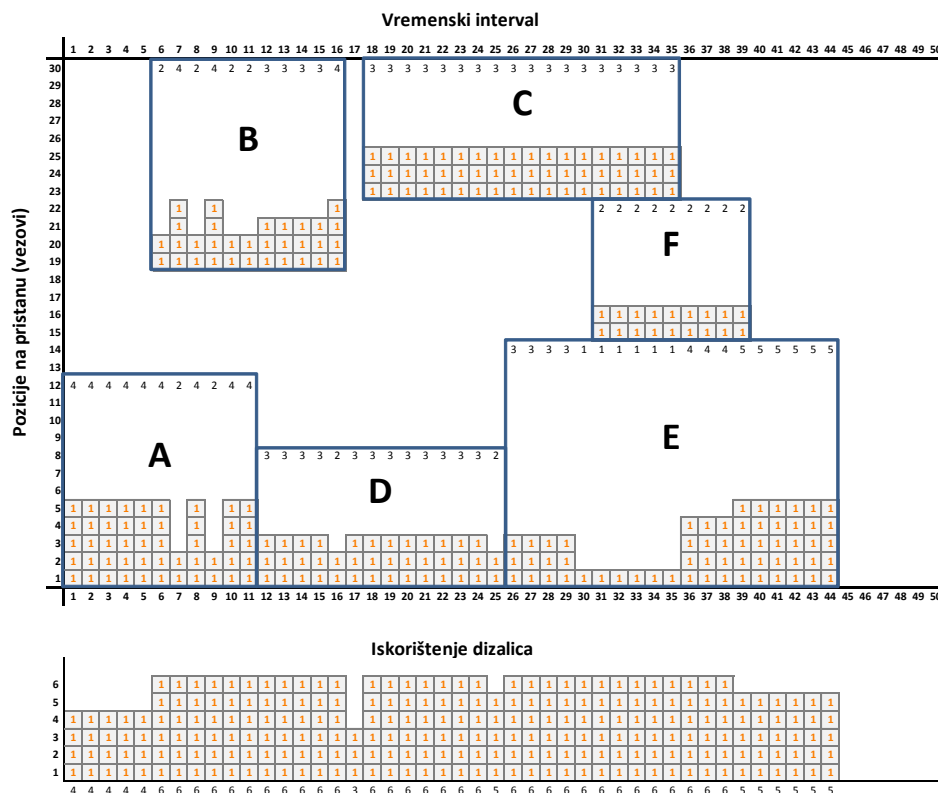
i	V	a	l	$\max\{\tau_{arr}, \tau_{dep}\}$	$q^{\max}$	m
1	A	1	12	15	4	40
2	B	6	12	15	4	32
3	C	18	8	10	3	54
4	D	12	8	10	3	40
5	E	14	14	10	5	60
6	F	30	8	10	2	18

Za rješavanje problema korišten je program za matematičku optimizaciju LINGO 12. Izrađeni programski kod modela prikazan je u privitku 1. Dobiveni rezultati prikazani su na slikama 14 i 15 te u tablici 5.

Tablica 5: Rješenje integriranog BAP i QCAP problema (Primjer 2)

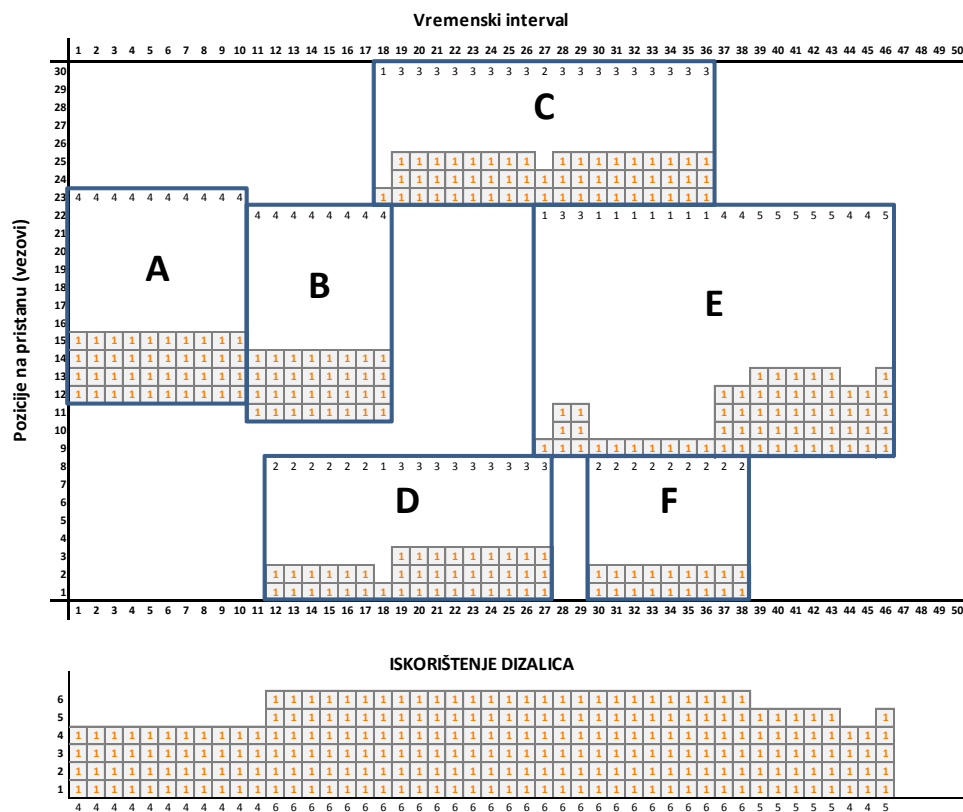
Rješenje bez ograničenja dubine				Rješenje s ograničenjem dubine			
Global Opt	Z = 84			Global Opt	Z = 90		
Čekanje na vez		Trajanje prekrcajnih operacija		Čekanje na vez		Trajanje prekrcajnih operacija	
$w(A)$	0	$p(A)$	11	$w(A)$	0	$p(A)$	10
$w(B)$	0	$p(B)$	11	$w(B)$	5	$p(B)$	8
$w(C)$	0	$p(C)$	18	$w(C)$	0	$p(C)$	19
$w(D)$	0	$p(D)$	14	$w(D)$	0	$p(D)$	16
$w(E)$	2	$p(E)$	19	$w(E)$	3	$p(E)$	20
$w(F)$	0	$p(F)$	9	$w(F)$	0	$p(F)$	9
$\sum w$	2	$\sum p$	82	$\sum w$	8	$\sum p$	82

Na slici 14 prikazano je rješenje kada dubina mora nije uzeta u obzir kao ograničenje s obzirom na gaz broda. Vrijednost objektne funkcije iznosi $Z = 84$. Svim brodovima dodijeljen je vez na dolasku osim za brod E koji mora čekati 2 sata $w(E)=2$.



Slika 14: Rješenje integriranog BAP i QCAP problema
bez ograničenja dubine

U drugom slučaju dodana su ograničenja za dubinu mora, ovisno o gasu broda prema formulama (4.39)-(4.41) i to tako da je za pozicije od 1-8 postavljena dubina mora od 14 metara, a za preostale pozicije dubina mora je 20 metara. Minimalna dubina ispod kobilice postavljena je na 0.5 metara. Na osnovu podataka o gasu (Tablica 4) jasno je da brodovi A i B s gazom od 15 metara ne mogu konkurirati za vez na pozicijama od 1-8 jer nije zadovoljeno $h_s > \tau_{A,B} + UKC$ tj. $h_{[1,8]} < \tau_{A,B} + UKC$, $h_{[1,8]} < 15.5$.



Slika 15: Rješenje integriranog BAP i QCAP problema

s ograničenjem dubine $[h_1, h_8] = 14$, $[h_9, h_{30}] = 20$

Usporedbom grafičkih prikaza rješenja vidljivo je da je brodovima promijenjen raspored te je brod A maknut s prethodne pozicije. Brodovima A i B dodijeljeni su vezovi na pozicijama iznad broja 8. Zbog tog razloga promijenjena je vrijednost objektne funkcije sa $Z = 84$ na $Z = 90$, što znači da je ukupno vrijeme boravka brodova u luci produljeno za 6 sati. Brodovi B i E moraju čekati na privez 5 odnosno 3 sata. Iz tablice je vidljivo da se ukupno vrijeme trajanje prekrcajnog procesa nije promijenilo, ali je došlo do preraspodjele dizalica u odnosu na brodove. To je dovelo do produljenja ili skraćanja prekrcajnih operacija za pojedini brod. Tako je brodu B, koji je prethodno čekao 5 sati na slobodan vez, preraspodjelom resursa (dodijeljeno mu je više dizalica sati) trajanje prekrcajnog procesa smanjeno s 11 na 8 sati. Njegovo ukupno vrijeme boravka u luci produljeno je stoga samo za 2 sata.

Koncept optimizacije koji je u ovom poglavlju predstavljen ima međutim i jedan bitan nedostatak. On se očituje u tome da model sam prilagođava broj dodijeljenih resursa i ovisno o tome utječe na prekrcajni proces i određuje njegovo trajanje. To, međutim, nije

uvijek ili nije najčešće realna aproksimacija jer teret na brodu nije homogeno raspoređen, što utječe na iskorištenje kapaciteta dizalica. Ova problematika bit će razmatrana u sljedećim poglavljima.

4.3. Problem redoslijeda rada obalnih dizalica

4.3.1. Definiranje problema

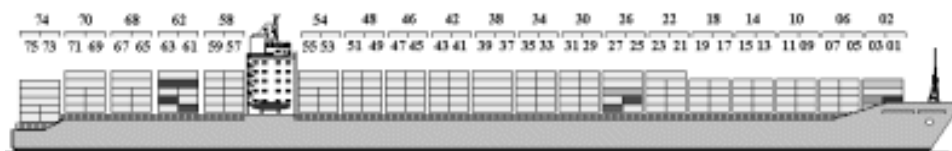
Redoslijed rada obalnih dizalica po brodu QCSP određuje se prema određenom kriteriju optimizacije. Kao kriterij optimizacije najčešće se uzima najkraće vrijeme završetka prekrcaja broda. To vrijeme jednako je vremenu završetka posljednjeg prekrcajnog procesa na brodu. Kao kriterij optimizacije može se uzeti i ukupno najkraće vrijeme zauzeća dizalica po brodu. U tom slučaju cilj je što veće iskorištenje dizalica. Prema kriteriju optimizacije funkcija optimizacije QCSP-a može biti:

- najraniji završetak prekrcajnih operacija na brodu,
- ukupno najkraće vrijeme zauzeća obalnih dizalica,
- minimalno vrijeme završetka prekrcajnih operacija uz garantiranu dostupnost dizalica.

Redoslijed rada određuje se na temelju potražnje za prekrcajom i broja dizalica koji je dodijeljen pojedinom brodu za svaki brod u sustavu. Ukupnu potražnju za prekrcajom određuje transportni rad koji moraju obaviti dizalice na pojedinom brodu. Uz konstantnu proizvodnost obalnih dizalica (broj ciklusa na sat) veličina transportnog rada, u slučaju prekrcaja kontejnera, određena je brojem kontejnera za ukrcaj/iskrcaj, a iskazuje se kroz ukupno vrijeme rada svih dizalica koje su angažirane na prekrcajnom procesu na jednom brodu.

Postavljeni modeli optimizacije za rješavanje QCSP problema pretpostavljaju da je proizvodnost obalnih dizalica konstantna, unaprijed zadana i određena na temelju normativa tehnološkog procesa tako da su njezina odstupanja neznatna s obzirom na postavljeni cilj optimizacije. Eventualno uključivanje koeficijenta odstupanja od normativa zahtjeva redefiniranje modela optimizacije što može biti predmet daljnjeg istraživanja.

Kompletan prekrcajni proces dijeli se na zadatke ili aktivnosti. Jedna aktivnost ili jedan zadatak uključuje rad na jednom dijelu broda. To može biti kontejnerski odjeljak (*bay*), grupa susjednih kontejnerskih pozicija, dio skladišta ili bilo koji dio na kojem se teret ukrcava ili iskrcava, uz uvjet da na tom dijelu nije moguć rad dviju dizalica istovremeno. Iz praktičnih razloga dobro je grupirati susjedne pozicije, gdje je teret smješten ili je planiran njegov ukrcaj, a na temelju planova ukrcaja i iskrcaja tereta.



Slika 16: Označavanje kontejnerskih odjeljaka brodu (*bays*)

Raspored tereta na brodu jedan je od ključnih čimbenika koji utječu na ukupnu funkcionalnost procesa i ekonomično korištenje resursa. Planovi ukrcaja/iskrcaja i operativni rad dizalica na ukrcajno-iskrcajnom procesu moraju se usklađivati pri čemu je cilj što kraće zadržavanje broda na vezu i što veće iskorištenje kapaciteta dizalica.

Problem redoslijeda rada obalnih dizalica može se riješiti parcijalno. Takvo rješenje predstavlja optimum u statičkom sustavu za svaki pojedini brod. Međutim, ovakvo rješenje ne garantira da će ono zaista biti ostvarivo jer optimalni broj dizalica ne mora u svakom vremenskom okviru biti dostupan brodu. Broj dizalica na pristanu stalan je i ograničen. Osim toga postoji mogućnost da pojedine dizalice ne mogu biti dostupne zbog ometanja prilikom prekrcajnih operacija i fizičkih ograničenja kretanja. Zbog toga QCSP nema svrhe rješavati parcijalno, nego sustavno u sklopu rješavanja BAP i QCAP problema. U nastavku se detaljnije analiziraju modaliteti problema i pristupi rješavanju QCSP problema.

4.3.2. Model s dvosmjernim kretanjem dizalica bez dijeljenja zadatka

Uvjet modela je da jedan zadatak uvijek izvršava jedna dizalica i da ga izvrši do kraja. Nije moguće prekinuti rad i započeti drugi dok se prvi ne završi tj. dok se ne ukrca/iskrca sav teret koji je pridružen tom zadatku. U pravilu ovaj uvjet odgovara stvarnom stanju na kontejnerskim terminalima.

Prikaz modela

$A = \{1, 2, \dots, \alpha\}$ predstavlja skup aktivnosti prekrcaja ili pojedinačnih zadataka u procesu ukrcaja/iskrcanja tereta za jedan brod, gdje su $i \in A$ pojedinačni zadatak te α ukupni broj zadataka u prekrcajnom procesu.

$Q = \{1, 2, \dots, q\}$ predstavlja skup dizalica $k \in Q$ koje obavljaju pojedine zadatke, pri čemu je q ukupni broj dizalica koje su pridružene brodu.

Za prekrcajne aktivnosti koje su predstavljene zadacima potrebno je utvrditi redoslijed izvršavanja i to tako da se definira skup $R = \{(1, 2), (1, 3), \dots, (i, j)\} \mid i, j \in A, i \neq j$ koji predstavlja moguće parove zadataka (Kim & Park, 2004).

Pojedini zadaci mogu biti uvjetovani izvršavanjem prethodnog. Primjerice, teret je potrebno najprije iskrcati iz broorskog skladišta ili s palubnog prostora, a potom na isto mjesto ukrcati novi teret. U tom slučaju potrebno je prekrcajni proces prikazati kao dva zadatka pri čemu prvi zadatak mora prethoditi drugom. Uvjetovani slijed aktivnosti moguće je prikazati kao izdvojeni skup zadataka $R' = \{(i, j) \mid i, j \in A, i \neq j$ gdje je $R' \subset R$. Uvjetovane zadatke potrebno je prethodno utvrditi i uključiti u model zajedno s ostalim ulaznim podacima.

Ulazni parametri za rješavanje modela su:

α – broj zadataka ili broj grupa zadataka u prekrcajnom procesu,

q – broj dizalica pridruženih brodu,

p_i – trajanje pojedinačnog prekrcajnog zadatka,

h_i – udaljenost pozicije pridruženog zadatka i (odjeljak, skladište) od referentne točke,

v – brzina vožnje dizalice,

d – raspon portala dizalice tj. udaljenost između portalnih odbojnika dizalice,

ω_1, ω_2 – težinski koeficijenti za usklađivanje objektne funkcije,

b – sigurnosni vremenski razmak (*buffer*),

M – velika cjelobrojna vrijednost.

Varijable postavljene u modelu su:

T – vrijeme završetka prekrcajnog procesa na brodu,

F_k – vrijeme završetka rada pojedine dizalice, završetak svih pojedinačnih zadataka pridruženih toj dizalici,

W_k – trajanje rada pojedine dizalice, zbroj vremena prekrcaja pojedinačnih zadataka,

I_k – vrijeme praznog hoda dizalice (vrijeme kretanja, čekanja i pripreme),

s_i – vrijeme početka pojedinačnog prekrcajnog zadatka,

c_i – vrijeme završetka pojedinačnog prekrcajnog zadatka.

Binarne varijable korištene u modelu:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{ako je zadatak } i \text{ pridružen dizalici } k \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (4.42)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ako zadatak } j \text{ slijedi nakon zadatka } i \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (4.43)$$

Postavljene su dvije binarne varijable koje predstavljaju varijable odlučivanja. Za razliku od modela kojeg koriste Kim i Park (2004) gdje je postavljena jedna trodimenzionalna varijabla, u ovom radu su postavljene dvije dvodimenzionalne varijable x_{ik} te y_{ij} po uzoru na model kojeg su razvili Lee, Wang i Miao (2008). Iako je na ovaj način model manje kompaktan u matematičkom smislu, kad se pretvori u programski kod postaje manje kompleksan zadatak za izračunavanje.

Objektna funkcija definirana je izrazom:

$$\text{Min } Z = \omega_1 T + \omega_2 \sum_{k \in Q} (F_k - W_k) \quad (4.44)$$

Izraz (4.44) predstavlja optimizaciju po dva kriterija: vremenu završetka rada na brodu T i iskoristivosti vremena eksploatacije dizalica. Izraz $(F_k - W_k)$ predstavlja u stvari vrijeme praznog hoda dizalice koje se utroši na kretanje, čekanje i pripremu za rad na dodijeljenom prekrcajnom zadatku.

Ovako definirana objektna funkcija bolje koristi raspoložive resurse, nego ako se kao kriterij optimizacije uzima samo krajnje vrijeme završetka rada na brodu, što je slučaj u većini radova koji obrađuju ovu tematiku (Zhu & Lim, 2005), (Lee, Wang & Miao, 2008) te (Meisel, 2009). Ako se kao jedini kriterij uzme vrijeme dovršetka prekrcajnog procesa, dizalice nisu nužno raspoređene tako da rade u kontinuitetu na zadacima. To rezultira većim praznim hodom dizalica i manjim iskorištenjem radnog vremena. U slučaju kada se pored kriterija dovršetka prekrcajnog procesa uzme u obzir kriterij iskoristivosti vremena eksploatacije dizalica, tada svaka dizalica „nastoji“ što ranije dovršiti slijed prekrcajnih zadataka koji su joj dodijeljeni. Na taj su način vremena, kada je dizalica u stanju pripravnosti, svedena na minimum ili jednaka nuli.

Ograničenja objektna funkcije predstavljaju kombinaciju ograničenja koja su postavljena u modelima (Kim & Park, 2004, pp.756–757), (Lee, Wang & Miao, 2008, p.127) i (Meisel, 2009, pp.91–92). Prilagodba je izvršena s obzirom na značenje primjene modela s pozicije lučkih tehnoloških procesa te s obzirom na mogućnost i jednostavnost postupka dobivanja optimalnog rješenja pomoću programskog koda. Detaljnija objašnjenja data su u nastavku.

Ograničenja funkcije:

$$c_i \leq T \quad \forall i \in A \quad (4.45)$$

$$c_i \geq 0 \quad \forall i \in A \quad (4.46)$$

$$s_i + p_i = c_i \quad \forall i \in A \quad (4.47)$$

$$W_k + I_k = F_k \quad (4.48)$$

$$\sum_{k=1}^q x_{ik} = 1 \quad \forall i \in A \quad (4.49)$$

$$\sum_{i=1}^a p_i x_{ik} = W_k \quad \forall k \in Q \quad (4.50)$$

$$c_i - F_k \leq M(1 - x_{ik}) \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.51)$$

$$c_i + v^{-1} |h_j - h_i| - s_j \leq M[3 - (x_{ik} + x_{jk} + y_{ij})] \quad \forall i, j \in A, \forall k \in Q \quad (4.52)$$

$$c_i + b \leq c_j - p_j + M(1 - y_{ij}) \quad \forall i, j \in A \quad (4.53)$$

$$My_{ij} + c_i + b > c_j - p_j \quad \forall i, j \in A \quad (4.54)$$

$$\sum_{k=1}^q kx_{ik} - \sum_{l=1}^l lx_{jl} + 1 \leq M(y_{ij} + y_{ji}) \quad \forall i, j \in A \mid h_i < h_j \quad (4.55)$$

$$d \left[\sum_{l=2}^q lx_{jl} - \sum_{k=1}^{q-1} kx_{ik} \right] \leq (h_j - h_i) + M(y_{ij} + y_{ji}) \quad \forall i, j \in A \mid h_i < h_j \quad (4.56)$$

$$y_{ij} + y_{ji} = 1 \quad \forall (i, j) \in R \mid h_i = h_j \quad (4.57)$$

$$c_i \leq c_j - p_j \quad \forall (i, j) \in R' \quad (4.58)$$

$$y_{ij} + y_{ji} = 1 \quad \forall (i, j) \in R' \quad (4.59)$$

$$x_{ik}, y_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4.60)$$

Prilikom transformacije matematičkog modela u programski kod potrebno je definirati vrijeme dovršetka prekrcajnog procesa na brodu, kao vrijeme završetka posljednjeg prekrcajnog zadatka. To će biti uvijek onaj zadatak čije je vrijeme maksimalno u odnosu na vremena dovršetka pojedinih zadataka tj. $T = \max(c_1, \dots, c_a)$. Postavljanje objektne funkcije na način da se minimizira vrijeme zadatka koji se najkasnije dovršava značilo bi gubitak uvjeta linearnosti, što se želi izbjeći. Zbog toga, umjesto da se varijabla odlučivanja T definira kao maksimum vremena dovršetka zadataka, njezina vrijednost određena je ograničenjima (4.45) i (4.46) kao gornja odnosno donja granica u odnosu na C_i .

Međusobni odnos vremena početka, trajanja i završetka prekrcajnog zadatka određuje jednakost (4.47), a vremena rada, praznog hoda i dovršetka svih pojedinačnih zadataka od strane pojedine dizalice određuje jednakost (4.48). Problem raspodjele dizalica bez dijeljenja zadataka pretpostavlja da pojedini zadatak može obavljati samo jedna dizalica. Da bi se to omogućilo i izbjegla mogućnost pridruživanja više od jedne dizalice jednom zadatku, postavljeno je ograničenje (4.49). Vrijednosti varijabli W_k i F_k ovise o rezultatima optimizacije, dakle radi se o nezavisnim varijablama. Pri tom vrijednost W_k ovisi od količini posla koji se dodijeli pojedinoj dizalici, odnosno broju i vremenu trajanja dodijeljenih pojedinačnih zadataka x_{ik} (4.50), pri čemu je trajanje pojedinačnog zadatka određeno izrazom (4.24). U slučaju varijable F_k njezina vrijednost definirana je dovršetkom posljednjeg zadatka dodijeljenog dizalici. Slično kao i kod određivanja vremena dovršetka prekrcajnih operacija T potrebno je odrediti donju granicu vrijednosti F_k u ovisnosti o vrijednosti c_i kako bi model ostao linearan, što je postignuto sa (4.51). Izraz s desne strane nejednakosti $M(1-x_{ik})$ osigurava da ograničenje vrijedi samo ako je $x_{ik}=1$. U suprotnom, kada se radi o zadatku koji nije pridružen dizalici, velika cjelobrojna konstanta M dozvoljava da F_k bude manje od c_i , tj. da vrijeme završetka rada pojedine dizalice ne ovisi o dovršetku zadataka koji su pridruženi ostalim dizalicama.

Ograničenje (4.52) predstavlja modificirani oblik ograničenja prema Kimu i Parku (2004) koji svoj model temelje na trodimenzionalnoj varijabli x i asignaciji vremenskih intervala određenoj aktivnosti. Umjesto vremenske asignacije odabran je algoritam (Lee, Wang & Miao, 2008) koji slijed zadataka, vremena početka i završetka zadataka, određuje usporedbom njihovog položaja u odnosu na vremensku os. Prema njemu zadatak koji slijedi ne može započeti prije nego onaj koji mu prethodi završi ako su oba pridružena istoj dizalici. Uvrštavanjem izraza s desne strane nejednadžbe, kao i kod prethodnog ograničenja, osigurana je linearnost modela i izvedivost rješenja za slučajeve kada je izvršavanje zadataka neovisno o pojedinoj dizalici. Prema tome, ograničenje vrijedi samo ako su $x_{ik}=x_{jk}=y_{ij}=1$. Osim toga, modifikacija je učinjena u odnosu na formulaciju vremena kretanja. Vrijeme kretanja predstavljeno je umnoškom razlike udaljenosti pozicija dvaju sukcesivnih zadataka i brzine kretanja dizalice i

određeno je izrazom¹⁵ $v^{-1}|h_j - h_i|$. Ovo ograničenje ima dvojaku svrhu: prva svrha je postavljanje uvjeta da dizalica može prijeći na sljedeći zadatak tek kad završi sa prethodnim, a druga svrha je određivanje vremena koje je potrebno da dizalica prijeđe put između dviju pozicija za rad. Promatrajući problem s tehnološkog aspekta, s obzirom na tehnička svojstva lučkih kontejnerskih dizalica, ne postoji potreba da se vrijeme kretanja postavlja u model optimizacije s obzirom da je ono u apsolutnom smislu zanemarivo u odnosu na vrijeme aktivnog prekrcajnog procesa. Ipak, ovo vrijeme kretanja uvršteno je zbog potrebe izbjegavanja neracionalnog „šetanja“ dizalice s jednog zadatka na drugi.

Zadatak ograničenja (4.53) i (4.54) je određivanje vrijednosti varijable y_{ij} kojom se utvrđuje da li se aktivnosti i i j preklapaju ($y_{ij} = 0$). Pri tome (4.53) određuje uvjet kada zadatak i prethodi zadatku j . U tom slučaju zadatak j započinje nakon što završi zadatak i prođe dodatno pripremno-završno vrijeme definirano parametrom b . Ukoliko to nije slučaj, zadaci se preklapaju i varijabla y_{ij} ima vrijednost nula. Prema (4.54) znači da zadatak j počinje prije nego što zadatak i završi i prođe dodatno pripremno-završno vrijeme. Konstanta M osigurava da je rješenje moguće jer ukida jedno od ograničenja ovisno o vrijednosti y_{ij} . Ovdje treba objasniti i ulogu dodatnog vremena b . Naime, ukoliko se ono izostavi može se pretpostaviti situacija u kojoj dolazi do preklapanja jer dizalica ne može započeti odmah sljedeći zadatak ili se pomaknuti na sljedeći zadatak zbog ometanja susjedne dizalice kojoj treba vremena da se pomakne s prostora kojeg zauzima. Uvrštavanjem parametra b osigurava se dodatno vrijeme dovoljno da se u takvim slučajevima onemogući preklapanje.

Ograničenje (4.55) postavlja ograničenje pretjecanja dizalica (Lee, Wang & Miao, 2008). Uspoređuju se dizalice k i l kada rade istovremeno na prekrcaju ($y_{ij} + y_{ji} = 0$). Pri tome je pozicija koja se odnosi na prekrcajni zadatak i niža od pozicije gdje se obavlja prekrcajni zadatak j ($h_i < h_j$). Na taj način pozicije dizalica i brodskih odjeljaka postavljeni su prema redoslijedu od nižeg prema višem. Ukoliko je dizalici k pridružen zadatak i , a dizalici l zadatak j , tada vrijedi $k + 1 \leq l$. Drugim riječima, dizalica k ne može „preskočiti“ dizalicu l (l uvijek mora biti barem za jedan veći od k) i obaviti zadatak koji

¹⁵ Brzina kretanja post-panamax dizalica iznosi do 45 metara u minuti.

je na višim pozicijama. Ograničenje je potrebno osloboditi u slučajevima kada se aktivnosti dizalica vremenski ne preklapaju. To se događa kada bilo koja od aktivnosti prethodi jedna drugoj tj. $y_{ij} + y_{ji} > 0$.

Za vrijeme rada na prekrcajnim zadacima dizalice moraju udovoljiti uvjetima sigurnosnog razmaka te minimalne međusobne udaljenosti brodskih pozicija na kojima rade. Sigurnosni razmak d određen je maksimalnom širinom portala dizalice, odnosno udaljenošću između odbojnika kao krajnjih točaka portala.¹⁶ Pored toga, ako se pretpostavi da svaka dizalica ima svoj redni broj ovisno o poziciji na pristanu, onda se prilikom pridruživanja zadataka mora voditi računa da između dviju dizalica kojima je dodijeljena pojedina aktivnost bude dovoljno mjesta za smještaj dizalica koje ne rade, a nalaze se između njih. Primjerice, ako na prekrcaju istovremeno rade dizalice 1 i 3, između njih mora postojati dovoljno mjesta za smještaj dizalice 2.

Uvjeti sigurnosnog razmaka obuhvaćeni su u ograničenju (4.56). Kao i u prethodnom ograničenju, pozicije na kojima se obavljaju prekrcajni zadaci označene su prema redoslijedu od niže prema višoj tj. $h_i < h_j$. Uspoređuju se dva prekrcajna zadatka koji se obavljaju s dvije dizalice istovremeno, dakle mora biti zadovoljeno $y_{ij} + y_{ji} = 0$. U suprotnom konstanta M oslobađa ograničenje čime se osigurava postojanost rješenja.

Izraz $\sum_{l=2}^q l x_{jl} - \sum_{k=1}^{q-1} k x_{ik}$ određuje razliku rednih brojeva dizalica kojima su pridruženi

prekrcajni zadaci. U slučaju da se radi o susjednim dizalicama dopušteni sigurnosni razmak odgovara rasponu portala d pa dvije dizalice mogu istovremeno raditi samo na pozicijama čija je međusobna udaljenost veća ili jednaka širini portala tj. $h_j - h_i \geq d$.¹⁷

Ukoliko se ne radi o susjednim dizalicama, tada se sigurnosni razmak povećava za onoliko puta kolika je razlika rednih brojeva dizalica kojima su pridruženi zadaci. Na taj način osigurava se dovoljno prostora i za dizalice koje se nalaze između, neovisno o tome da li im je u tom trenutku pridružen prekrcajni zadatak ili nije.

Preostala su još ograničenja (4.57) - (4.59) koja vrijede za slučajeve kada se pojedini prekrcajni procesi moraju obavljati prema prethodnom utvrđenom slijedu. Primjerice,

¹⁶ Za post-panamax dizalice razmak između odbojnika iznosi oko 27 metara, ovisno o proizvođaču.

¹⁷ U slučaju $h_j - h_i = d$ dizalice su postavljene jedna uz drugu.

najprije je potrebno obaviti iskrcaj da bi se na iste pozicije mogao ukrcati teret. Ukoliko se prekrcajni procesi odvijaju na istoj poziciji, ali nije uvjetovan redoslijed vrijedi ograničenje (4.57) koje onemogućava njihovo istovremeno obavljanje.¹⁸ Ukoliko je slijed uvjetovan zadanim redoslijedom izvršavanja zadataka, primjenjuju se ograničenja (4.58) i (4.59) koja vrijede za skup parova redoslijedom uvjetovanih zadataka R' . Usporedbom njihovih međusobnih vremena osigurava se odvijanje zadataka prema željenom redoslijedu operacija.

Uvjeti za binarne varijable x_{ik} i y_{ij} postavljeni su ograničenjem (4.60).

4.3.2.1. Postavljanje prekrcajnih klastera

Prekrcajne procese moguće je podijeliti u proizvoljni broj zadataka. Njihov broj može biti velik pogotovo ako ih dijelimo po više ključeva. Teoretski, svaki kontejner može biti prekrcajni zadatak. No, takva podjela u praktičnom je smislu nepotrebna, a pored toga zahtijevala bi izuzetno kompleksnu optimizaciju. Kod podjele prekrcajnih procesa na zadatke treba prvenstveno imati na umu svrhu zbog koje se podjela radi, a to je što bolje korištenje resursa.

Sama podjela uvjetovana je položajem tereta na brodu. Treba istaknuti da se već prilikom izrade planova ukrcaja tereta o raspodjeli zadataka i resursa treba voditi računa. Štoviše, raspodjela tereta na brodu sama po sebi je poseban optimizacijski problem.

Zadatke koji se prostorno nalaze u zoni rada pojedine dizalice opravdano je grupirati u jedan zadatak. Na taj način pojednostavnjuje se problem bez da se utječe na krajnji rezultat. Ako se kontejneri koji su namijenjeni za iskrcaj nalaze na susjednim pozicijama koje su unutar zone rada jedne dizalice, onda se sa sigurnošću mogu grupirati u jedan zadatak bez da to utječe na optimalno rješenje. To je zbog toga što uvjeti sigurnosnog razmaka i minimalne udaljenosti brodskih pozicija na kojima dizalice rade ne dozvoljavaju da se zadaci izvršavaju istovremeno. Grupiranje pojedinačnih zadataka u jedan zajednički, koji je definiran prostornom zonom obuhvata, predstavlja prekrcajni klaster (Kim & Park, 2004). Veličina klastera određena je minimalnom i maksimalnom

¹⁸ Ukoliko postoji potreba da se istovremeno na istoj brodskoj poziciji obavlja iskrcaj i ukrcaj tako da se izmjenjuju ciklusi iskrcaja i ukrcaja onda se definira jedan prekrcajni zadatak.

vrijednošću prostorne komponente tj. udaljenošću prekrcajnih pozicija od referentne točke.

Udaljenost prekrcajne pozicije, prekrcajnog klastera u ovom slučaju, definirana je s tri umjesto s jednim parametrom:

h^{up} – udaljenost gornje krajnje pozicije klastera od referentne točke,

h^{mid} – udaljenost sredine klastera od referentne točke,

h^{lo} – udaljenost donje krajnje pozicije klastera od referentne točke.

Grupiranje prekrcajnih zadataka u klastere zahtjeva da se u (4.52), (4.55) i (4.57) parametar h zamijeni sa h^{mid} , a ograničenje (4.56) zamjenjuje (4.61).

$$d \left[\sum_{l=2}^q l x_{jl} - \sum_{k=1}^{q-1} k x_{ik} \right] \leq (h_j^{lo} - h_i^{up}) + M(y_{ij} + y_{ji}) \quad \forall i, j \in A \mid h_i^{mid} < h_j^{mid} \quad (4.61)$$

Primjer 3:

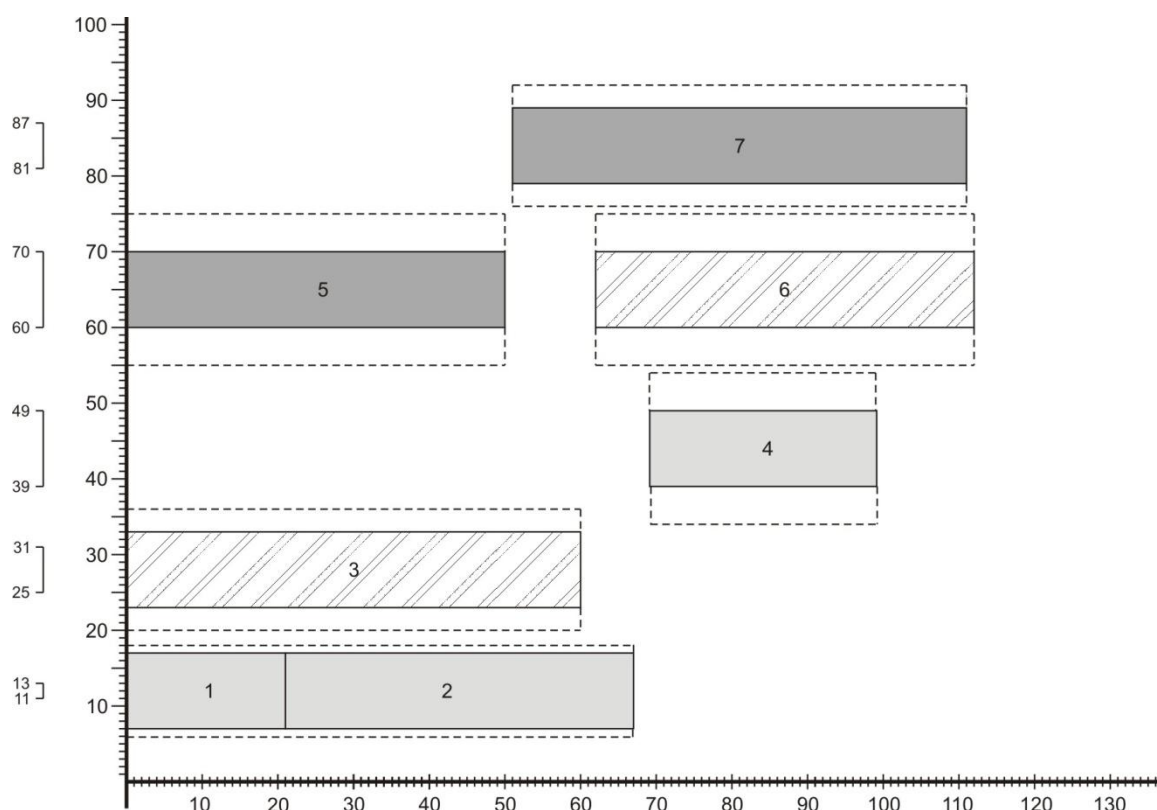
Neka su za određeni brod definirani prekrcajni zadaci raspoređeni u klastere. Ulazni podaci prikazani su u tablici (Tablica 6). Potrebno je pronaći optimalan redoslijed prekrcajnih operacija pri radu s tri dizalice. Optimalnim rješenjem mora se dobiti najraniji mogući dovršetak prekrcajnog procesa uz što kraće vrijeme eksploatacije raspoloživih dizalica na terminalu. Za izračun je korišten programski alat LINGO12 u kojem je izrađen programski kod prema gornjem modelu. Programski kod nalazi se u privitku 1. Konačni rezultat prikazan je tablično i grafički (Slika 17).

Tablica 6: Ulazni podaci i rješenje QCSP problema za Primjer 3

Ulazni podaci							
Broj zadataka: $a = 7$		Broj dizalica: $q = 3$		Uvjetovani zadaci: $R' = \{(1,2), (5,6)\}$			
Raspon portala: $d = 10$		Brzina vožnje: $v = 15$		Težinski koef.: $w_1 = 1$ $w_2 = 0.01$; Buffer: $b = 0$			
i / k	1 / 1	2 / 2	3 / 3	4	5	6	7
p_i	21	46	60	30	50	50	60
h_i^{up}	13	13	31	49	70	70	87
h_i^{mid}	12	12	28	44	65	65	84
h_i^{lo}	11	11	25	39	60	60	81

Rezultat							
$k \mid x_{ik}=1$	1	1	2	1	3	2	3
s_i	0	21	0	69.1	0	62.5	51.3
c_i	21	67	60	99.1	50	112.5	111.3
F_k	99.1	112.5	111.3	-	-	-	-
W_k	97	110	110	-	-	-	-
I_k	2.1	2.5	1.3	-	-	-	-
$T = 112.5$	$\sum (F_k - W_k) = 5.9$		$Z = 112.56$				

Brodске pozicije predstavljene su s 5 prekrcajnih klastera u okviru kojih je definirano 7 prekrcajnih zadataka. Svaka dizalica prikazana je različitom nijansom boje. Prekrcajni proces završava dovršetkom posljednjeg 5. zadatka i ima vrijednost $T = 112.5$. U ovom primjeru zadaci broj 3 i 4 ne mogu se izvršavati istovremeno jer bi se u krajnjim položajima klastera (pozicija 31/3 i 39/4) dizalice međusobno ometale i preklapale.



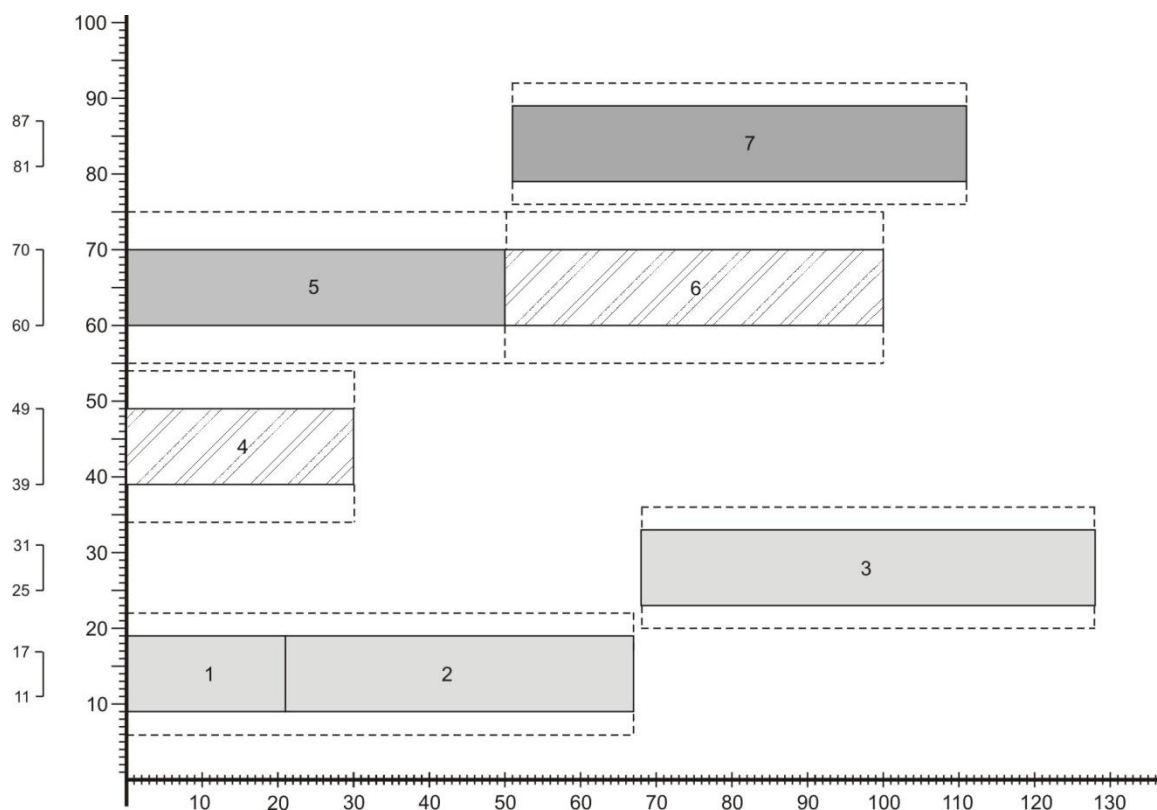
Slika 17: Rješenje QCSP problema s prekrcajnim klasterima i 3 obalne kontejnerske dizalice za Primjer 3.

Kod grupiranja u klastere minimalne međusobne udaljenosti brodskih pozicija ovise o širini klastera. Bez obzira na pozicije dizalica, sigurnosni razmaci moraju biti zadovoljeni u cijeloj zoni klastera. U slučaju da se dizalica s nižim rednim brojem nalazi u krajnjem gornjem položaju u klasteru, mora još uvijek biti dovoljno mjesta da dizalica s višim rednim brojem može nesmetano raditi na krajnjoj donjoj poziciji susjednog klastera.

Ako se u prethodnom primjeru proširi klaster za zadatke 1 i 2 tako da su obuhvaćene pozicije od 11-17 umjesto od 11-13 (Tablica 7), središnja referentna pozicija bit će 14. Zbog toga jer se povećala gornja krajnja pozicija, operativno područje dizalice bit će šire nego u prethodnom slučaju. To ima za posljedicu onemogućavanje istovremenog rada zadatka 3 jer nije zadovoljen uvjet sigurnosnog razmaka između dizalica (Slika 18). U konačnici vrijeme dovršetka prekrcaja povećava se s $T=112.5$ na $T=127.9$.

Tablica 7: Ulazni podaci i rješenje QCSP problema za Primjer 3a

Ulazni podaci							
Broj aktivnosti: $\alpha = 7$		Broj dizalica: $q = 3$		Uvjetovani zadaci: $R' = \{(1,2),(5,6)\}$			
Raspon portala: $d = 10$		Brzina vožnje: $v = 15$		Težinski koef.: $w_1 = 1$ $w_2 = 0.01$; Buffer: $b = 0$			
i, k	1	2	3	4	5	6	7
p_i	21	46	60	30	50	50	60
h_i^{up}	<u>17</u>	<u>17</u>	31	49	70	70	87
h_i^{mid}	<u>14</u>	<u>14</u>	28	44	65	65	84
h_i^{lo}	11	11	25	39	60	60	81
Rezultat							
$k \mid x_{ik}=1$	1	1	1	2	3	2	3
s_i	0	21	67.9	0	0	50	51.3
c_i	21	67	127.9	30	50	100	111.3
F_k	127.9	100	111.3	-	-	-	-
W_k	127	80	110	-	-	-	-
I_k	0.93	20	1.27	-	-	-	-
$T = 127.9$		$\sum (F_k \cdot W_k) = 22.2$		$Z = 128.1$			



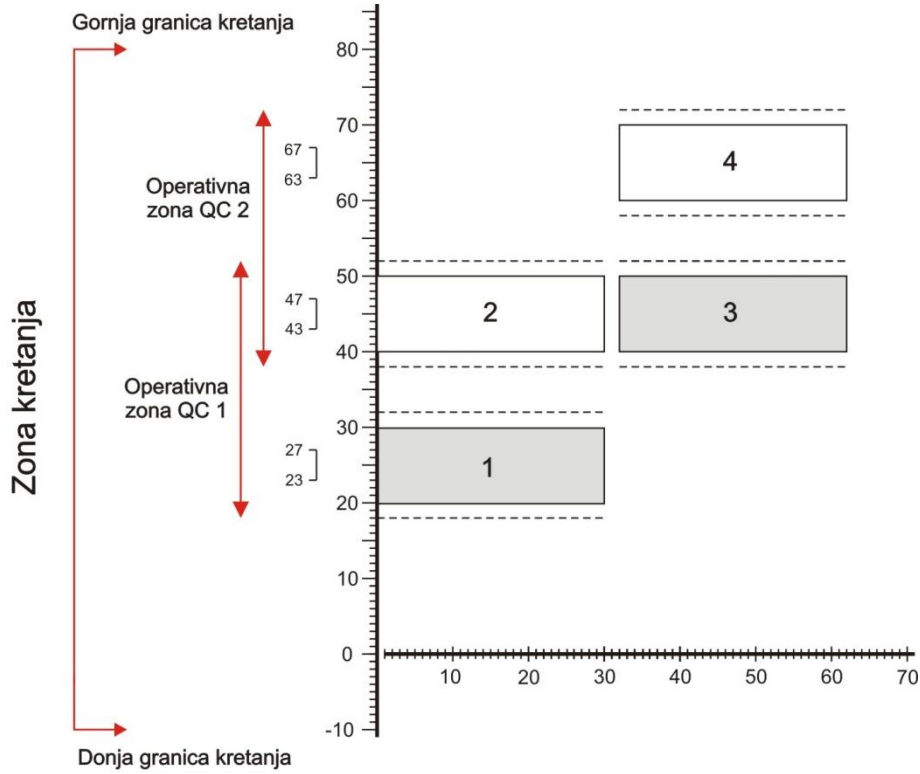
Slika 18: Rješenje za Primjer 3a

4.3.2.2. Određivanje zone kretanja i granica kretanja dizalica

Kretanje kontejnerskih dizalica, koje su dodijeljene pojedinom brodu, može biti ograničeno kako bi se izbjeglo ometanje drugih dizalica koje rade na susjednim brodovima. Isto tako ukoliko se radi o krajnjim pozicijama na pristanu, kretanje je ograničeno samom duljinom kranske staze. Uvrštavanjem ograničenja kretanja utvrđuju se zona kretanja i operativna zona dizalice tj. njihove granične točke. Zona kretanja dizalica određena je dvjema zavisnim varijablama ψ^{up} i ψ^{lo} te s dva parametra B^{up} , B^{lo} pri čemu su:

B^{up}, B^{lo} – gornje i donje granice kretanja, tj. dopuštene pozicije dizalica na pristanu u odnosu na referentnu točku,

ψ_k^{up}, ψ_k^{lo} – granice operativne zone tj. krajnje pozicije pojedine dizalice u ovisnosti o dodijeljenim zadacima.



Slika 19: Operativne zone i dopuštena zona kretanja dizalica

Zona kretanja dizalica može utjecati na konačno rješenje. Ukoliko se ne uvrsti u model, može se dogoditi da rješenje ne bude realno. Takav slučaj nastaje kad se krajnja dizalica mora pomaknuti izvan operativne zone kako bi omogućila drugoj dizalici da zauzme njezino mjesto. U određenim situacijama, međutim, to nije moguće osigurati zbog duljine kranske staze ili ometanja s operativnim zonama dizalica koje rade na drugom brodu.

Utvrđivanjem zone kretanja osigurava se optimalno rješenje koje će onemogućiti dobivanje nerealnog rješenja. Objektna funkcija određena je izrazom:

$$\text{Min } Z = \omega_1 T + \omega_2 \sum_{k \in Q} (F_k - W_k) + \omega_3 \sum_{k \in Q} I_k^{\text{move}} \quad (4.62)$$

gdje su, pored gore opisanih veličina, dodani težinski koeficijent ω_3 i varijabla I_k^{move} koja označava vrijeme kretanja dizalice k . Na postojeća ograničenja (4.45) - (4.61) dodaju se nova:

$$M - Mx_{ik} + \psi_k^{\text{up}} \geq h_i^{\text{up}} x_{ik} \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.63)$$

$$Mx_{ik} - M + \psi_k^{\text{lo}} \leq h_i^{\text{lo}} x_{ik} \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.64)$$

$$\psi_k^{lo} \geq B^{lo} \quad \forall k \in Q \quad (4.65)$$

$$\psi_k^{up} \leq B^{up} \quad \forall k \in Q \quad (4.66)$$

$$\psi_l^{lo} - \psi_k^{lo} \geq d(l-k) \quad \forall k, l \in Q \mid k < l \quad (4.67)$$

$$\psi_l^{up} - \psi_k^{up} \geq d(l-k) \quad \forall k, l \in Q \mid k < l \quad (4.68)$$

$$\psi_k^{up} - \psi_k^{lo} \leq vI_k^{move} \quad \forall k \in Q \quad (4.69)$$

Formulacija u (4.63) i (4.64) predstavlja modificirani oblik ograničenja tzv. „vessel-level“ modela (Liu, Wan & Wang, 2005, p.66). Ako i samo ako je dizalici dodijeljen zadatak, njegova pozicija ne smije biti izvan operativne zone dizalice koju određuju ψ^{up} i ψ^{lo} . Vrijednosti ovih varijabli ne smiju biti izvan ekstrema tj. krajnjih vrijednosti parametara B^{up} i B^{lo} što osiguravaju ograničenja (4.65) i (4.66). Na taj način model uzima u obzir realno moguća tehnička ograničenja poput duljine kranske staze na pristanu. Treba napomenuti, a isto proizlazi iz prethodnih formula, da je operativna zona dizalice definirana krajnjim pozicijama prekrcajnih klastera tj. parametrima h^{up} i h^{lo} čija vrijednost ovisi o dodijeljenim zadacima. Ograničenja (4.67) i (4.68) odnose se na situacije kada je potrebno osigurati sigurnosni razmak između dizalica u donjim i gornjim graničnim pozicijama. Konačno, ograničenje (4.69) uspostavlja odnos između krajnjih pozicija zona kretanja i stvarnog kretanja svake pojedine dizalice prilikom prelazaka s jednog zadatka na drugi. Time se osigurava da je operativna zona „stisnuta“ između rubnih pozicija krajnjih zadataka koji su pridruženi dizalici.

4.3.3. Utjecaj smjera kretanja dizalica na optimalno rješenje

Tehnička obilježja obalnih dizalica na kontejnerskim terminalima dozvoljavaju da se one kreću uzduž pristana po kranskoj stazi. To kretanje uvjetovano je i ograničeno pozicijama ostalih dizalica na pristanu, nemogućnošću pretjecanja te sigurnosnim razmakom. Model koji se koristi za rješavanje problema redosljeda rada obalnih dizalica može se temeljiti na dva osnovna tipa algoritma za dobivanje optimalnog rješenja i to:

- algoritam s jednosmjernim kretanjem dizalica,
- algoritam s dvosmjernim kretanjem dizalica.

Kretanje dizalica (Meisel, 2009 navedeno u Bierwirth & Meisel, 2009) je jednosmjerno kada se ne mijenja njihov smjer kretanja uzduž pristana nakon početne postave u odnosu na brod kojeg poslužuju. Svaka od dizalica koja je raspoređena na prekrcajne zadatke na brodu može se pomicati samo u jednom smjeru u odnosu na referentnu točku. To može biti od niže prema višoj poziciji (od pramca prema krmi broda) ili od više prema nižoj (od krme prema pramcu broda).¹⁹

Za jednosmjerno kretanje prema Limu et. al. (2007) postoji barem jedno optimalno rješenje problema redoslijeda ako se zadatak odnosi na kompletan odjeljak (*bay*).²⁰

Ako je algoritam za rješavanje problema redoslijeda rada obalnih dizalica neovisan o smjeru kretanja dizalica, dobiveno optimalno rješenje može biti zasnovano na jednosmjernom ili dvosmjernom kretanju dizalica uzduž pristana. Kod dvosmjernog kretanja, dizalica se pomiče u različitim smjerovima tijekom prebacivanja s jednog zadatka na drugi.

Primjer 4

Definirano je 6 prekrcajnih zadataka prema pozicijama: bay 25/zadaci 1,2; bay45/zadaci 3,4,5; bay65/zadatak 6. Trajanje pojedinih zadataka je 20 vremenskih jedinica za zadatke 1,2,3 i 5 odnosno 40 vremenskih jedinica za zadatke 4 i 6. Uvjetovani redoslijed izvršavanja zadataka definiran je skupom $R' = \{(1, 2), (3, 4), (4, 5)\}$.

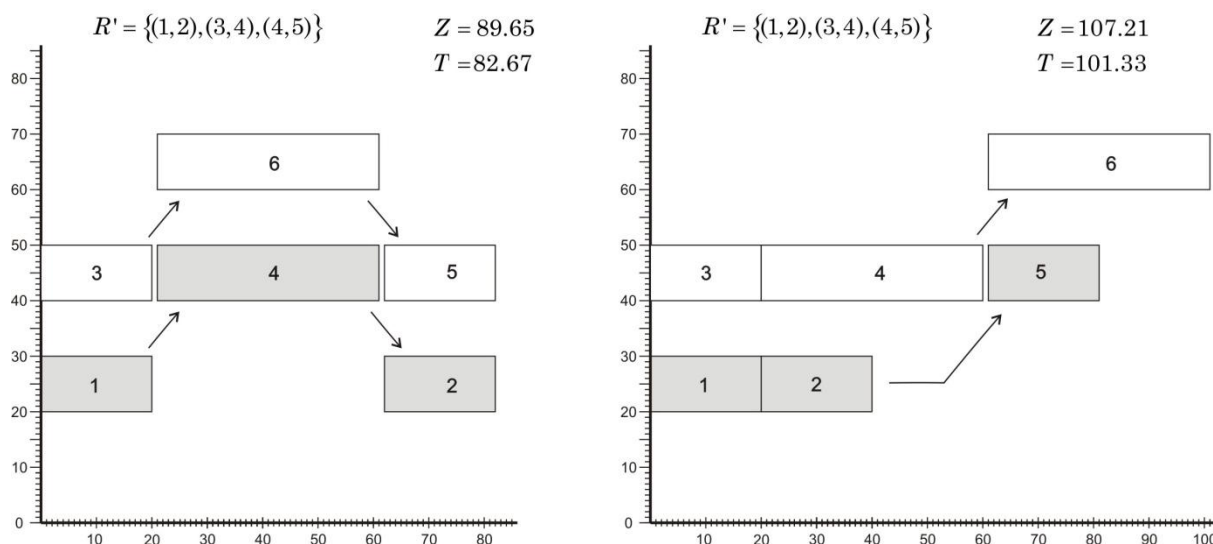
Slika 20 prikazuje dva različita rješenja ovisno o algoritmu koji je primijenjen²¹. Iz slike je razvidno da rješenje s jednosmjernim kretanjem daje lošiji rezultat. Razlog tome su uvjetovani zadaci koji su koncentrirani na istom odjeljku. Na poziciji 25 prekrcajni proces je podijeljen na dva zadatka (1 i 2), a na poziciji 45 na tri zadatka (3, 4 i 5). U ovom slučaju nije moguće dobiti optimalno rješenje primjenom jednosmjernog algoritma bez da se promijeni uvjetovani redoslijed operacija. Kada to ne bi bilo tako i

¹⁹ Kako bi se izbjegle situacije koje mogu dovesti do zabune, brodovi se uz pristan uvijek moraju vezivati istom stranom ili se kao referentne točke uzimaju oznake na pristanu umjesto odjeljaka na brodu.

²⁰ Kompletan odjeljak znači da se podrazumijeva da zadatak nije odvojen u više grupa. Ovakva pretpostavka znači da bi se u slučajevima kada se na istom *bay*-u treba obaviti iskrcaj i ukrcaj kontejnera, ti procesi trebali postaviti kao jedan zadatak umjesto dva zadatka.

²¹ Rješenje dobiveno modelima za rješavanje QCSP problema prikazanim u ovom radu

kad bi ovi procesi bili podijeljeni u dva zadatka (*bay* 25 i *bay* 45) postojalo bi jedinstveno optimalno rješenje bez obzira na algoritam koji se koristi. Drugim riječima postojalo bi optimalno rješenje za problem redoslijeda uz jednosmjerno kretanje dizalica prilikom sekvencijalnog obavljanja dodijeljenih prekrcajnih zadataka.



Slika 20: Dva različita rješenja istog QCSP problema s dvosmjernim kretanjem (lijevo) i jednosmjernim kretanjem (desno) obalnih dizalica

Na ovaj slučaj upozorio je Meisel (2009) te zaključio da nije moguće primijeniti algoritam s jednosmjernim kretanjem dizalica na slučajeve kada su zadaci na istoj poziciji podijeljeni prema grupama kontejnera²². Međutim, ovakav zaključak vrijedi uz važnu pretpostavku da se zadatak ne može dijeliti među dizalicama, nego dizalica koja započne zadatak isti mora završiti do kraja. Ukoliko se oslobodi ovakvo ograničenje i dopusti se dijeljenje pojedinog zadatka među dizalicama moguće je dobiti optimalno rješenje primjenom algoritma s jednosmjernim kretanjem dizalica.

Matematički model koji je izrađen i prikazan u prethodnom poglavlju ovog rada te predstavljen formulama (4.44)-(4.69), temelji se na algoritmu s dvosmjernim kretanjem dizalica i uvjetovanim zadacima. Optimalno rješenje prethodnog primjera s dvosmjernim kretanjem daje rezultat objektne funkcije $Z=89.65$, dok je vrijeme završetka rada na brodu $T=82.67$. Optimalno rješenje s jednosmjernim kretanjem

²² Podjela u grupe može se odnositi i na vrstu tereta/kontejnera pri čemu ona u realnom okruženju ima određenog smisla. Različite grupe kontejnera mogu utjecati na povećanje ili smanjenje normiranog vremena trajanja ciklusa pa je u tom slučaju opravdano procese koji se odvijaju na istoj poziciji, a odnose se na različite grupe kontejnera podijeliti na dva ili više zadataka.

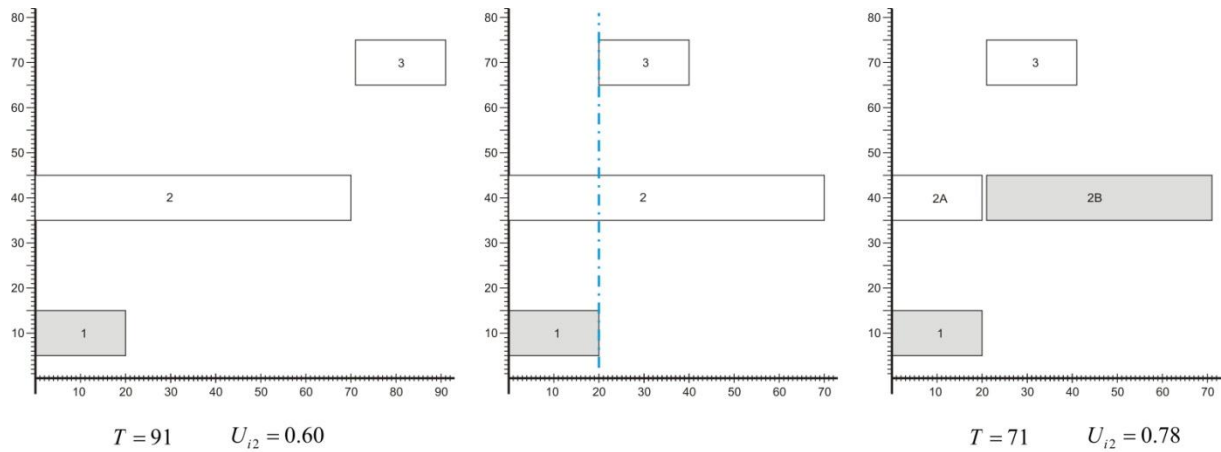
dizalica daje rezultat objektne funkcije $Z=107.21$ uz vrijeme završetka rada $T=101.33$. Model koji se temelji na algoritmu s jednosmjernim kretanjem dizalica prikazan je u nastavku.

4.3.4. Iskorištenje kapaciteta dizalica kod određivanja redoslijeda rada

Prilikom rješavanja QCSP problema, raspored dizalica u odnosu na zadatke i redoslijed izvršavanja zadataka ovise o načinu na koji je teret složen na brodu. Ovaj podatak lučki planeri dobivaju od brodara i isti predstavlja ulazni parametar za QCSP model. Proces slaganja tereta i raspoređivanja tereta u brodska skladišta i kontejnerske pozicije predstavlja sam za sebe poseban problem optimizacije koji se rješava odvojeno i na kojeg utječu mnogi drugi parametri izvan dosega samog lučkog operatera (stabilitet broda, redoslijed putovanja, tip tereta, itd.). Međutim, ako su ovi parametri zadovoljeni, potrebno je prilikom slaganja tereta na brod uzeti u obzir različite varijante smještaja tereta na brodu za pojedinu luku ukrcaja/iskrcaja koje utječu, ili bi mogle utjecati, na iskorištenje kapaciteta obalnih dizalica. Ako se na taj način postavi problem, do rješenja se može doći koordinacijom optimizacijskih procesa između luke, lučkog operatera i brodara.

Kako bi se ilustrirao ovaj slučaj, kao primjer može poslužiti slika 21. Prikazan je jednostavan problem koji se sastoji od tri prekrcajna zadatka na tri različita dijela broda. Pri tom je teret tako složen da je većina kontejnera grupirana na poziciji 40 u sredini (na slici predstavljeno kao zadatak 2), dok je manja količina kontejnera za iskrcaj/ukrcaj smještena na krajevima (predstavljeno kao zadaci 1 i 3).

Optimalno rješenje prikazano je na krajnjem lijevom dijagramu s krajnjim vremenom dovršetka prekrcajnih operacija $T=91$. Do istoga je jednostavno doći i bez matematičke kalkulacije. Vidljivo je da je dizalica broj 1 (siva boja na slici), nakon što dovrši zadatak 1, blokirana i da ne može doprinijeti bržem dovršetku prekrcajnog procesa zbog blokiranja od strane dizalice broj 2 (bijela boja na slici) koja mora dovršiti znatno dulji zadatak 2. Kako se dizalice ne mogu pretjecati, početak zadatka 3 uvjetovan je dovršetkom zadatka 2 od strane dizalice broj 2.



Slika 21: Utjecaj razdvajanje zadatka na iskorištenje kapaciteta dizalica

Ovakav raspored zadataka ima za posljedicu neravnomjerno iskorištenje kapaciteta dizalica. Iz gornje slike se može očitati trajanje pojedinog prekrcajnog zadatka koje iznosi: $p_1 = 20$, $p_2 = 70$, $p_3 = 20$. Dizalica 1 sudjeluje samo 20 vremenskih jedinica u radu ili 22% , dok dizalica 2 sudjeluje s 90 vremenskih jedinica u radu ili 77%.

Za utvrđivanje ravnomjernosti iskorištenja kapaciteta obalnih dizalica definira se veličina koja se naziva prosječno iskorištenje kapaciteta kod QCSP raspodjele (Meisel, 2009, p.123) :

$$U_{iq} = \frac{m_i}{C_{iq}} = \frac{m_i \cdot 60}{q \cdot QCSP_{iq}} \quad (4.70)$$

gdje je:

U_{iq} – prosječno iskorištenje kapaciteta q dizalica raspoređenih na brodu i ,

m_i – prekrcajna potražnja iskazana u broju dizalica-sati (QCh),

C_{iq} – dodijeljeni prekrcajni kapacitet kada je na brodu i raspoređeno q dizalica (QCh),

q – broj dizalica koji se raspoređuje po brodu,

$QCSP_{iq}$ – rješenje problema sa q dizalica za brod i u minutama, odgovara krajnjem vremenu dovršenja prekrcajnog procesa T na brodu i sa q dizalica.

Ako se u gornji primjer uvrste vrijednosti za brod A kada su na njemu raspoređene 2 dizalice, dobije se $U_{A2} = m_A / C_{A2} = 110 / (2 \cdot 91) = 0.604$. Zaključak je da, uz optimalno rješenje QCSP problema, prosječno iskorištenje dizalica u sustavu iznosi 60%. Kad bi se povećao broj dizalica i uvela treća dizalica, smanjilo bi se krajnje vrijeme dovršetka na $T=70$ i to je ujedno najranije moguće vrijeme završetka, budući da je donja granica dovršetka određena trajanjem najduljeg pojedinačnog zadatka. Međutim, u tom slučaju prosječno iskorištenje dizalica bilo bi $U_{A3} = m_A / C_{A3} = 110 / (3 \cdot 70) = 0.523$, dakle smanjilo bi se na 52%.

Dosadašnja razmatranja u ovom poglavlju vrijede uz jedno bitno svojstvo koje se uzima u rješavanju QCSP problema, a to je da je zadatak nedjeljiv. To znači da dizalica mora u cijelosti dovršiti započeti zadatak prije prelaska na sljedeći zadatak. Pri tom, isti zadatak može biti pridružen samo jednoj dizalici. Međutim, zanimljivo je razmotriti što se događa kada se dopusti međusobno „pomaganje“ dizalica u izvršenju pojedinog zadatka, tj. kada se jedan zadatak može obavljati s dvije ili više dizalica, naravno u različitim vremenima.

Da bi se to moglo ostvariti potrebno je podijeliti zadatak na podzadatke. Na srednjem dijagramu (Slika 21) prikazan je heuristički postupak podjele zadatka na dva podzadatka. Simetrala koja dijeli zadatak 2 dijeli ga u vremenskom segmentu kada dizalica 1 dovrši zadatak 1. Na taj način dizalica 2 može osloboditi prostor za dizalicu 1 pomaknuvši se na zadatak 3. Na njezino mjesto na poziciju 40 dolazi dizalica 1 i nastavlja izvršavati zadatak 2. Ovim načinom zadatak 2 podijeljen je na podzadatke 2A s trajanjem $p_{2A}=20$ i 2B s trajanjem $p_{2B}=50$. Optimalno rješenje prikazano je na desnom dijagramu (Slika 21).

Uspoređujući rezultat dobiven heurističkim postupkom podjele zadatka 2, s prethodnim rezultatom kada su zadaci nedjeljivi, vidljivo je da je dobiveno rješenje bolje tj. krajnje vrijeme dovršetka prekrcajnog procesa iznosi $T=71$. Još je zanimljivija usporedba prosječnog iskorištenja kapaciteta dizalica kada rade 2 dizalice u sustavu: $U_{A2} = m_A / C_{A2} = 110 / (2 \cdot 71) = 0.775$. Dakle prosječno iskorištenja kapaciteta je 78% što je puno bolje nego u prvom slučaju kada je iznosilo 60%.

Navedeni rezultat upućuje na zaključak da bi se moglo dobiti bolje rješenje, kako u odnosu na krajnje vrijeme dovršetka prekrcajnog procesa, tako i u odnosu na iskorištenje kapaciteta dizalica, ako se formulira model koji dopušta dijeljenje prekrcajnih zadataka među dizalicama. Kako je krajnje vrijeme dovršetka rada dizalica (T) već sadržano u prethodnom modelu (4.44), ostaje problem otpuštanja ograničenja (4.49) i prilagodba ostalih veličina. Uvrštavanje prosječnog iskorištenja dizalice u objektnu funkciju ne dolazi u obzir jer bi se time izgubila linearnost modela i znatno otežala mogućnost dobivanja optimalnog rješenja. No, to nije ni potrebno učiniti jer postojeća objektna funkcija uz prilagođena ograničenja daje optimalan rezultat koji ujedno znači i najpovoljniji odnos iskorištenja kapaciteta. Model koji to omogućuje temelji se na algoritmu s jednosmjernim kretanjem dizalica, a prikazan je u sljedećem poglavlju.

4.3.5. Model s jednosmjernim kretanjem dizalica uz dijeljenje zadatka

Dijeljenje prekrcajnog zadataka znači da se dozvoljava prekid procesa ukrcaja/iskrcaja prije nego je isti dovršen. To uključuje izmjenu dizalice, pri čemu dizalica koja je radila na tom zadatku odlazi na novi, a na njezino mjesto dolazi druga dizalica i dovršava započeti zadatak do kraja. Linija prekida aktivnosti tj. vrijeme rada pojedine dizalice određuje se optimizacijskim modelom, a predstavljeno je dvodimenzionalnim varijablama odlučivanja s_{ik} , c_{ik} i p_{ik} gdje je:

s_{ik} – početak aktivnosti²³ i sa dizalicom k ,

c_{ik} – završetak aktivnosti i sa dizalicom k ,

p_{ik} – trajanje aktivnosti i sa dizalicom k .

Kako bi se dobilo izvedivo rješenje, potrebno je primijeniti algoritam s jednosmjernim kretanjem dizalica. Primjena ovog algoritma pretpostavlja razumijevanje okolnosti u kojima je njegova primjena učinkovita tj. u kojima se dobiva optimalno rješenje:

- 1) Mora se poštovati konvencija označavanja zadataka na način da se isti sukcesivno označavaju, od manjeg prema većem, ovisno o odjeljcima gdje je smješten teret, krećući se od niže prema višoj (od pramca prema krmi broda).

²³ Aktivnost – zadatak ili podzadatak tj. dio zadatka

- 2) Uvjetovani zadaci koji nisu na istoj poziciji ili u istom klasteru mogu kreirati podoptimalna rješenja i to u slučaju kada „viši“ zadatak prethodi „nižem“. To će se desiti kada je zadovoljeno $i > j \wedge h_i^{mid} < h_j^{mid}$.
- 3) Algoritam je neprimjenljiv kada je u sustavu samo 1 dizalica jer u tom slučaju nema rješenja u uvjetima opisanim u točki 2. Ova činjenica ne predstavlja problem jer njegova primjena u takvim okolnostima ionako ne bi imala smisla u odnosu na algoritam s dvosmjernim kretanjem obalnih dizalica.
- 4) Optimalno rješenje može rezultirati prekomjernim segmentiranjem zadataka, tj. stvaranjem prekratkih podzadataka koji u praksi stvaraju nepotrebnu agregaciju resursa u drugim podsustavima lučkog terminala. Ovaj problem može se riješiti uvođenjem konstante koja određuje minimalno dozvoljeno trajanje zadatka – p^{min} .

Prikaz modela daje se u nastavku. Objektna funkcija definirana je izrazom.

$$Min Z = \omega_1 T + \omega_2 \sum_{\substack{i \in A \\ k \in Q}} (c_{ik} - p_{ik}) + \omega_3 \sum_{k \in Q} I_k^{move} \quad (4.71)$$

Objektna funkcija neznatno je prerađena u odnosu na (4.44) s obzirom da zadaci u odnosu na dizalice nisu jednoznačno pridruženi. Glavni kriteriji optimizacije su isti: vrijeme završetka rada na brodu i eksploatacijski učinak dizalica. S obzirom na obilježje modela koji se zasniva na podjeli zadatka na podzadatke, varijabla c_{ik} je dvodimenzionalna varijabla odlučivanja kojom se utvrđuje vrijeme dovršetka zadatka i s dizalicom k . Ovo vrijeme, za razliku od modela bez podjele zadatka, ne mora odgovarati vremenu završetku zadatka c_i jer je moguće da zadatak nije dovršen s tom dizalicom. Podjela na podzadatke može generirati prekomjernu separaciju zadatka uz dodatno kretanje. To je moguće regulirati preko težinskog koeficijenta ω_3 i varijable I_k^{move} u objektnoj funkciji koja predstavlja vrijeme praznog hoda koje je utrošeno na kretanje dizalice. S obzirom da drugi pribrojnik u (4.71) predstavlja sumu razlike vremena završetka pojedine aktivnosti i trajanja aktivnosti s pojedinom dizalicom, podjelom na više podzadataka povećava se njegova vrijednost pa je zato potrebno prilagoditi vrijednosti težinskih koeficijenata, tako da je $\omega_1 \gg \omega_2$, dok je $\omega_1 \approx \omega_3$.

Ograničenja korištena u modelu zasnivaju se na primjeni prekrcajnih klastera uvažavajući zonu kretanja, operativne zone i granice kretanja dizalica na način kako je prethodno objašnjeno.

Ograničenja funkcije:²⁴

$$c_{ik} \leq T \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.72)$$

$$s_{ik} + p_{ik} = c_{ik} \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.73)$$

$$\sum_{k=1}^q p_{ik} = p_i \quad \forall i \in A \quad (4.74)$$

$$p_{ik} \leq p_i x_{ik} \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.75)$$

$$x_{ik} \leq M p_{ik} \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.76)$$

$$p_{ik} \geq p^{\min} x_{ik} \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.77)$$

$$M - M x_{ik} + \psi_k^{up} \geq h_i^{up} x_{ik} \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.78)$$

$$M x_{ik} - M + \psi_k^{lo} \leq h_i^{lo} x_{ik} \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.79)$$

$$\begin{aligned} c_{jk} - p_{jk} &\geq c_{il} + b + v^{-1}(h_j^{mid} - h_i^{mid}) - M[2 - (x_{jk} + x_{il})] \\ \forall i, j \in A \mid h_i^{mid} &\leq h_j^{mid}, \forall k, l \in Q \mid k < l \end{aligned} \quad (4.80)$$

$$\begin{aligned} c_{ik} - p_{ik} &\geq c_{jl} + b - M[2 - (x_{ik} + x_{jl})] \\ \forall i, j \in A \mid h_i^{mid} < h_j^{mid}, \forall k, l \in Q \mid k < l \wedge (h_j^{lo} - h_i^{up}) &< d(l - k) \end{aligned} \quad (4.81)$$

$$\begin{aligned} c_{jk} - p_{jk} &\geq c_{ik} + b + v^{-1}(h_j^{mid} - h_i^{mid}) - M[2 - (x_{ik} + x_{jk})] \\ \forall k \in Q, \forall i, j \in A \mid h_i^{mid} &\leq h_j^{mid} \wedge i < j \end{aligned} \quad (4.82)$$

$$\psi_k^{up} - \psi_k^{lo} \leq v I_k^{move} \quad \forall k \in Q \quad (4.83)$$

²⁴ Radi preglednosti prikazan je cjelovit model što uključuje i uvrštavanje nekih ograničenja koja su objašnjena u prethodnom poglavlju.

$$\psi_l^{lo} - \psi_k^{lo} \geq d(l-k) \quad \forall k, l \in Q \mid k < l \quad (4.84)$$

$$\psi_l^{up} - \psi_k^{up} \geq d(l-k) \quad \forall k, l \in Q \mid k < l \quad (4.85)$$

$$\psi_k^{lo} \geq B^{lo} \quad \forall k \in Q \quad (4.86)$$

$$\psi_k^{up} \leq B^{up} \quad \forall k \in Q \quad (4.87)$$

$$c_{jk} - p_{jk} \geq c_{il} + b + v^{-1} |h_j^{mid} - h_i^{mid}| - M[2 - (x_{jk} + x_{il})] \quad \forall i, j \in R', \forall k, l \in Q \quad (4.88)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, c_{ik} \geq 0, p_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in A, \forall k \in Q \quad (4.89)$$

Vrijeme dovršetka prekrcajnih operacija T određeno je donjom granicom dovršetka prekrcajnih zadataka pojedine dizalice (4.72). Onaj zadatak koji je najkasnije dovršen ujedno je i donja granice vremena T . Ono ne može biti manje od vremena dovršetka posljednjeg zadatka ili njegovog podzadatka. Vrijeme završetka rada dizalice na pojedinom zadatku ili njegovom dijelu (4.73) jednako je zbroju vremena početka i trajanju procesa p_{ik} . Kako trajanje procesa ovisi o rezultatu optimizacije i načinu na koji se zadatak izvršava, ono nije unaprijed poznato. Zadatak se može izvršavati kao aktivnost bez prekida ili se može podijeliti na podzadatke, pri čemu su uvjeti podjele zadataka utvrđeni ograničenjima (4.74) - (4.77).

Ako se zadatak dijeli na podzadatke, suma njihovog trajanja mora biti jednaka predviđenom trajanju osnovnog zadatka (4.74). Gornja granica trajanja podzadatka određena je trajanjem osnovnog zadatka (4.75), a donja granica određena je parametrom p^{min} (4.77). Potreba za određivanjem donje granice objašnjena je u točki 4. kod opisivanja obilježja algoritma. Konzistentnost dodjeljivanja zadataka i podzadataka osigurava binarna varijabla x_{ik} u (4.75) i (4.76). Kada je zadatak pridružen dizalici tj. $x_{ik} = 1$, tada je zbog (4.76) $p_{ik} \neq 0$, u suprotnom ako zadatak nije pridružen dizalici tj. $x_{ik} = 0$, tada je zbog (4.75) i $p_{ik} = 0$.

Ograničenjima (4.80), (4.81) i (4.82) kontrolira se jednosmjerno kretanje dizalica u izvršavanju zadataka na način da se onemogućiti pretjecanje dizalica, osigura sigurnosni razmak te izbjegne istovremeni dvostruki rad dizalica. Kod sva tri je zajedničko da se

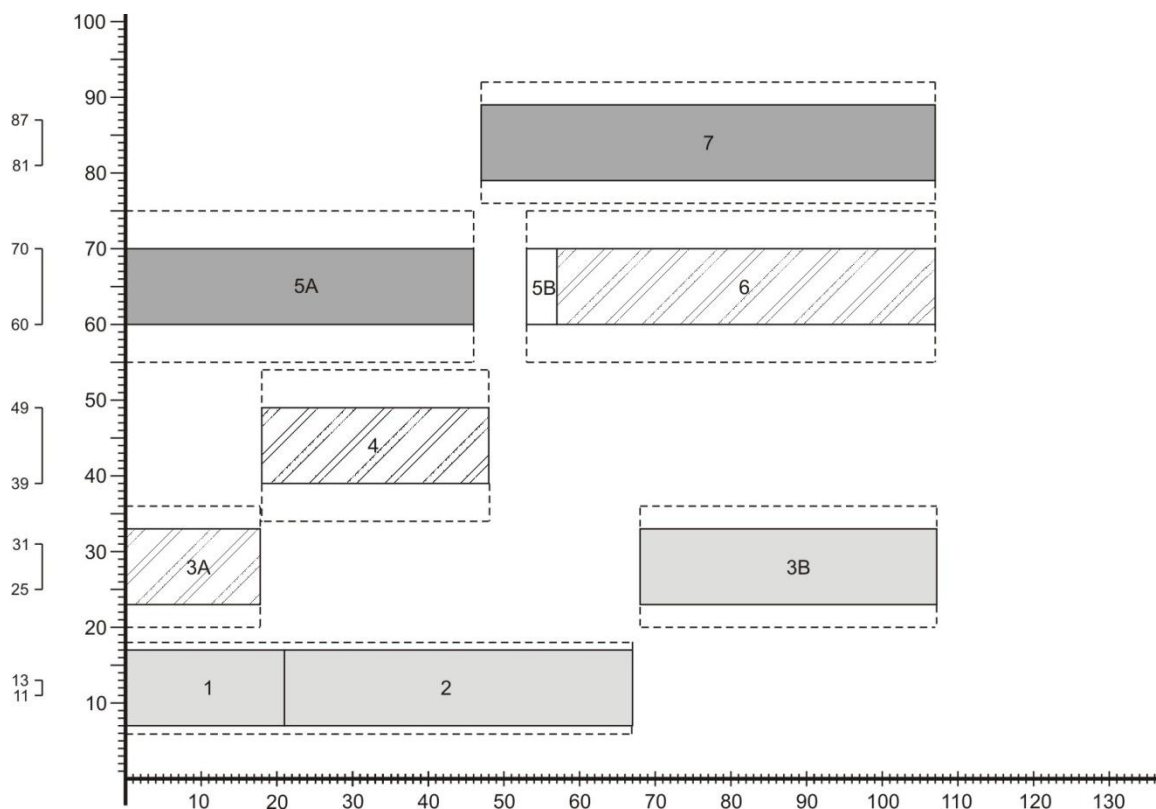
uspoređuju početna i završna vremena kombinacije dvaju zadataka (i,j) i dviju dizalica (k,l) . Pri tom se uzimaju kombinacije zadataka s pozicijama od niže ka višoj $h_i^{mid} \leq h_j^{mid}$ i kombinacijom dizalica koja je niže pozicionirana na pristanu ka onoj koja je pozicionirana više $k < l$. Ukoliko je zadatak na višoj poziciji dodijeljen dizalici s nižim brojem, ona taj zadatak zbog (4.80) može započeti tek nakon što dizalica iznad nje dovrši svoj zadatak i pomakne se oslobađajući joj tako prostor za rad. Kad ovog ograničenja ne bi bilo, model bi omogućio pretjecanje dizalica što, naravno, nije realna situacija.

Na sličan način osigurava se sigurnosni razmak u (4.81). Ovdje se uspoređuju dizalice i pridruženi zadaci kod kojih je sigurnosni razmak manji od dopuštenoga $h_j^{lo} - h_i^{up} < d(l-k)$. Ukoliko je to slučaj, a zadaci su ipak pridruženi dizalicama, tj. $x_{ik} + x_{jl} = 2$, tada se oni ne mogu obavljati istovremeno. Budući se radi o jednosmjernom kretanju, to u ovom slučaju znači da se zadatak na višoj poziciji mora obaviti prije onog na nižoj poziciji (jer se dizalice kreću prema gore). Drugim riječima niže pozicionirana dizalica mora biti u operativnoj zoni na dovoljnom razmaku, ukoliko radi na nekom drugom zadatku, ili u dopuštenoj zoni kretanja na sigurnom razmaku, ukoliko ne radi ni na jednom zadatku. Kada gornja dizalica završi svoj zadatak, pomakne se sa pozicije i oslobodi prostor tako da je sigurnosni razmak dovoljan, donja dizalica može započeti svoj zadatak.

Kako bi se osigurala postojanost modela potrebno je usporediti vremena obavljanja dvaju zadataka koji su dodijeljeni istoj dizalici, a da bi se izbjegla mogućnost da se ona preklapaju. Takva mogućnost otklonjena je zbog (4.82) jer se u slučaju kada su dvije aktivnosti dodijeljene istoj dizalici, tj. $x_{ik} + x_{jk} = 2$, pomiče početak sljedećeg zadatka dok se prethodni ne završi.

Ograničenja (4.78) i (4.79) te ograničenja (4.83)-(4.87) određuju zone kretanja obalnih dizalica i istovjetna su kao i kod modela s dvosmjernim kretanjem bez dijeljenja zadataka (4.63) i (4.64) te (4.65)-(4.69). Međutim, njihova značenja se donekle razlikuju. Kod modela s jednosmjernim kretanjem obalnih dizalica donja granica operativne zone pojedine dizalice znači ujedno i početnu poziciju dizalice, a gornja granica operativne zone znači njezinu završnu poziciju kad su svi prekrcajni procesi na brodu završeni.

Redoslijed izvođenja uvjetovanih zadataka određen je sa (4.88). Kod određivanja uvjetovanih zadataka treba voditi računa o svojstvima jednosmjernog kretanja koja su istaknuta na početku poglavlja. Na kraju, ograničenjem (4.89) definiraju se domene varijabli odlučivanja x_{ik} , c_{ik} te p_{ik} .



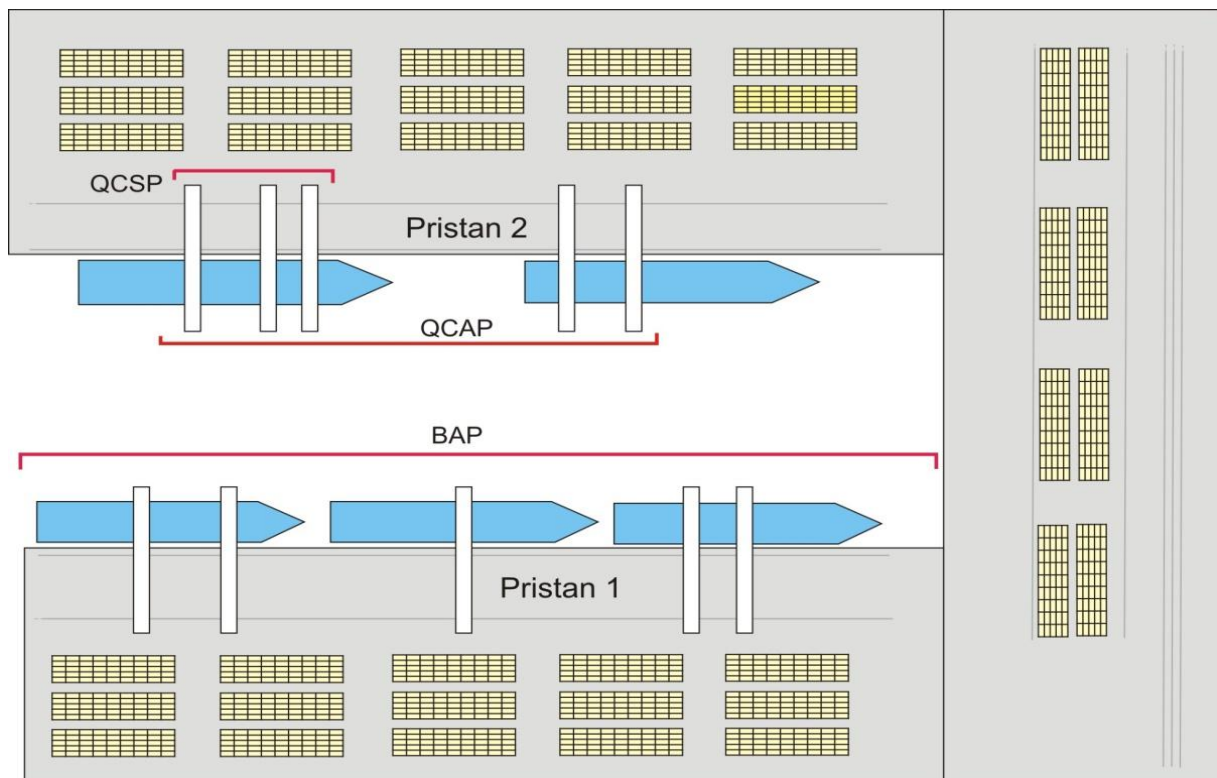
Slika 22: Rješenje QCSP problema s jednosmjernim kretanjem dizalica uz dijeljenje zadataka

Uspoređujući rezultate modela s dvosmjernim kretanjem bez dijeljenja zadataka i modela s jednosmjernim kretanjem dizalica uz podjelu zadataka, razvidno je da su se s drugim modelom dobili bolji rezultati. Krajnje vrijeme dovršetka prekrcajnih procesa na brodu skraćeno je s $T=112.5$ na $T=107.3$. No, još važnije je dobiveni rezultat iskorištenja kapaciteta obalnih dizalica: za slučaj bez podjele na podzadatke dobije se $U_{A3} = m_A / C_{A3} = 317 / (3 \cdot 112.47) = 0.94$, a za slučaj s podjelom na podzadatke dobije se $U_{A3} = m_A / C_{A3} = 317 / (3 \cdot 107.27) = 0.99$. Ovo saznanje posebno je važno za modeliranje cjelovitog rješenja optimizacije raspodjele vezova i obalnih dizalica na lučkim kontejnerskim terminalima.

5. INTEGRALNI MODEL OPTIMIZACIJE ZA NEZAVISNE PRISTANE

5.1. Pojam nezavisnih pristana i konfiguracija terminala

Na velikim kontejnerskim terminalima lučki pristani obično su smješteni u liniji kako bi se osigurala dobra komunikacija sa slagalištem. No, pristani mogu biti postavljeni tako da formiraju oblik slova „L“ ili slova „U“, odnosno mogu se sastojati od diskontinuiranih obala ili obala čije linije pružanja su izlomljene. Takav je slučaj kod lučkih bazena, gdje se koriste obje obale bazena za privez brodova i prekrcajne operacije (Slika 23). Pristani za prihvat i privez brodova u tom su slučaju nezavisni s obzirom na tehnološke procese koji se na njima odvijaju. Svaki od pristana ima vlastite resurse koji ne koreliraju s onima na drugoj strani. S obzirom na tu činjenicu optimizaciji treba pristupiti na drugačiji način, pri čemu i dalje glavni cilj ostaje minimalno vrijeme zadržavanja broda u luci uz ravnomjerno iskorištenje kapaciteta obalnih dizalica.



Slika 23: Prostorna dispozicija kontejnerskog terminala s nezavisnim pristanima

Ovakva konfiguracija kontejnerskog terminala primjerenija je terminalima manje i srednje veličine gdje dolaze brodovi različitog kapaciteta. Bazenska koncepcija luke manje je pogodna za manevriranje velikih kontejnerskih brodova, pa se u lukama s velikim godišnjim prometom kontejnera, gdje takvi brodovi dominiraju, preferira izgradnja pristana u liniji. U tom slučaju duljina obala može biti preko 2 kilometra. S druge strane oblik terminala kako je prikazan na gornjoj slici, pretpostavlja da se na suprotnim stranama lučkog bazena nalaze vezovi na pristanima čija duljina obično ne prelazi 700 metara što je dovoljno za smještaj dva post-panamax kontejnerska broda.

U odnosu na veličinu terminala Beškovnik i Twrđy (2009) navode četiri grupe kontejnerskih terminala: male terminale do 500.000 TEU-a, srednje velike terminale od 500.000 – 1.000.000 TEU-a, velike terminale od 1-3 milijuna TEU-a te najveće od preko 3 milijuna TEU-a. Kod evaluacije proizvodnosti terminala srednje veličine autori navode prosječne vrijednosti od 99.762 TEU-a godišnje po dizalici te 699 TEU-a po duljini pristana. To bi odgovaralo konfiguraciji s ukupnom duljinom pristana oko 1430 metara s 10 dizalica u sustavu.

U literaturi koja obrađuje problematiku optimizacije na kontejnerskim terminalima, problem s nezavisnim pristanima nije adekvatno zastupljen. Znanstveni radovi u ovom području ograničeni su na rješavanje problema optimizacije na terminalima s jednim pristanom uzduž obalne linije. Jedini pronađeni relevantni rad koji je blizak s problematikom nezavisnih pristana jest autora Hendriks et al. (2011) u kojem autori razmatraju raspodjelu cikličkih dolazaka brodova na različite terminale istog lučkog operatera. Pri tome je cilj uravnoteženo opterećenje terminala i resursa na terminalu kao i smanjenje količine unutrašnjeg transporta na terminalima. Međutim, autori nisu dublje ulazili u problematiku raspodjele dizalica na temelju realno raspoloživog kapaciteta, nego su aproksimirali prosječne vrijednosti neovisno o rasporedu tereta po brodovima i zanemarili varijacije u prekrcajnoj potražnji po brodu.

S tehnološkog gledišta postoji opravdana potreba da se problem s nezavisnim pristanima promatra cjelovito u odnosu na lučke procese kod manjih i srednjih kontejnerskih terminala gdje je moguće očekivati i veće varijacije prekrcajne potražnje po brodu. Pod određenim uvjetima ovaj problem može se primijeniti i u slučaju dislociranih pristana ili terminala.

5.2. Metodologija optimizacije

Prije objašnjenja metodologije potrebno je ukratko podsjetiti na vrstu, značajke i obilježja modela koji su utvrđeni u prethodnom poglavlju.

Optimizacija obalnog podsustava lučkog kontejnerskog terminala u operativnom planiranju tehnoloških procesa, objedinjava tri zasebna problema optimizacije i to: problem dodjele veza, problem raspoređivanja obalnih dizalica i problem redoslijeda prekrcajnih operacija.

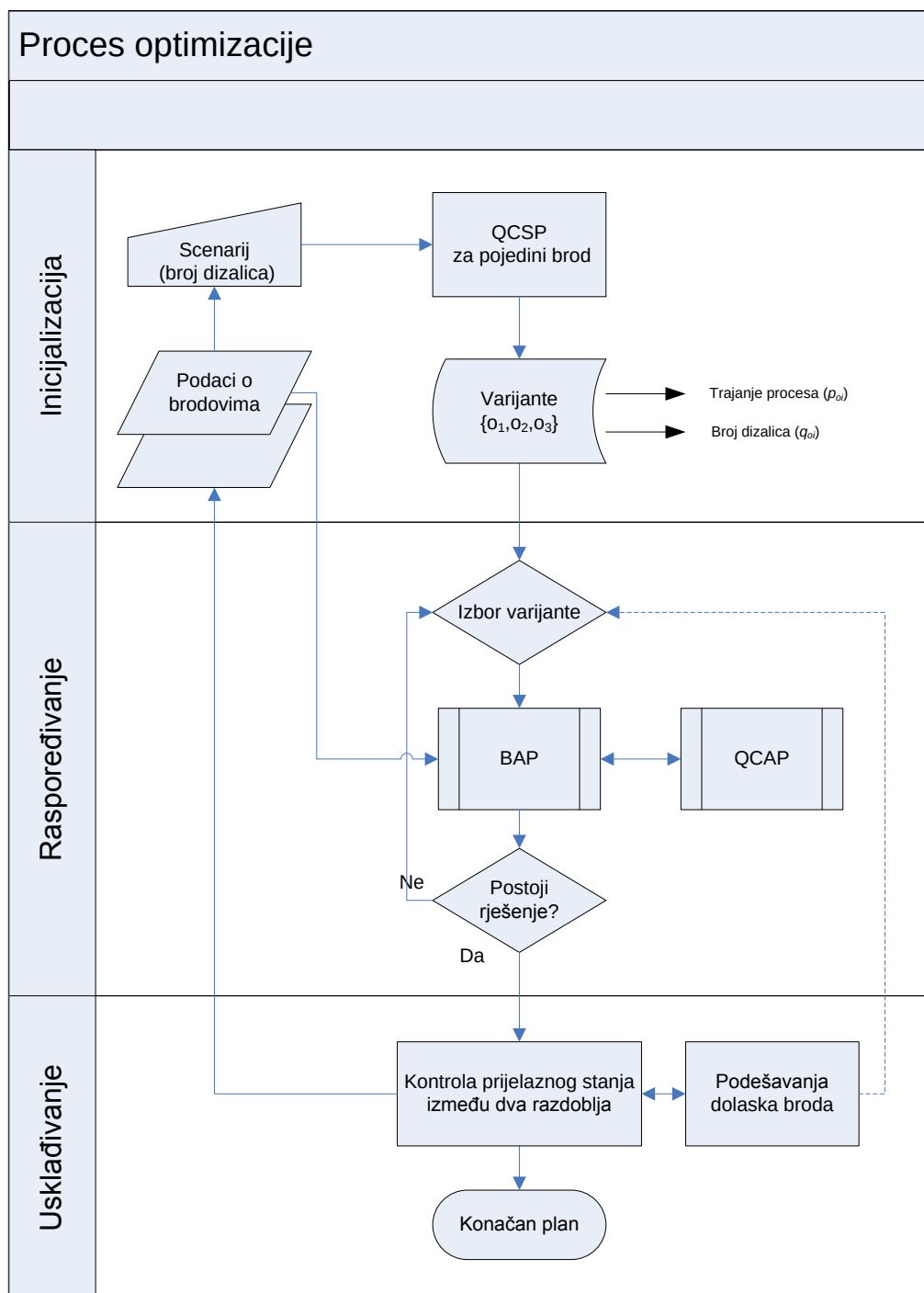
Problem raspodjele vezova određuje poziciju i vrijeme priveza broda. Prethodno razrađeni modeli u poglavlju 4.1.2, mogu se klasificirati kao modeli s kontinuiranim vezovima i dinamičkim svojstvom s obzirom na dolaske brodova u sustav. Njihovo bitno svojstvo je fiksno trajanje prekrcajnog procesa, unaprijed zadano kao parametar. To je ujedno i njihov glavni nedostatak jer se pretpostavlja da uvijek postoji dovoljan broj resursa na raspolaganju. Međutim, raspored brodova po pristanu može biti takav da nije moguće osigurati svakom brodu dovoljni broj obalnih dizalica pa prekrcajni proces neće trajati onoliko koliko je bilo predviđeno. U tom slučaju rezultat optimizacijske funkcije nije primjenljiv i potrebno je napraviti reinženjering heurističkim metodama ili promijeniti parametre modela.

Problem raspoređivanja obalnih dizalica po pristanu i po brodovima mora zato uzeti u obzir raspoloživost dizalica u smislu broja i vremena pridruživanja brodu, no ovaj problem, ako se rješava samostalno, ne daje gotovo rješenje jer implicira promjenu ulaznih parametara za problem dodjele veza. Kako bi se izbjegle iteracije predložen je u poglavlju 4.2.2 integrirani model koji odjednom rješava raspodjelu vezova i raspored obalnih dizalica po brodu. Vrijeme prekrcajnog procesa je u ovom slučaju varijabla čija vrijednost ovisi o broju dizalica koje model pridruži brodu, ovisno o njihovoj trenutnoj raspoloživosti. Iako na izgled ovaj model cjelovito i dobro rješava optimizacijski problem, on pretpostavlja da je kapacitet dodijeljenih resursa u potpunosti iskorišten. To međutim, ne mora biti realno ostvarivo jer iskorištenje kapaciteta dizalica ovisi o rasporedu tereta na brodu, broju dizalica koje su pridružene brodu, redoslijedu obavljanja prekrcajnih zadataka te načinima kretanja i odvijanja prekrcajnih zadataka.

Određivanjem redoslijeda rada obalnih dizalica dobiva se realno moguće vrijeme trajanja prekrcajnog procesa jer se za svaki brod redoslijed utvrđuje na temelju plana ukrcaja ili plana iskrcaja tereta. Prikazana su dva modela s varijacijama u odnosu na grupiranje istovrsnih zadataka u prekrcajne klastere. Prvi je predstavljen model s dvosmjernim kretanjem dizalica bez dijeljenja zadataka. Drugi izrađeni model temeljen je na jednosmjernom kretanju dizalica i dijeljenju zadataka među dizalicama. Ovaj drugi model ima važno svojstvo ujednačavanja iskorištenja kapaciteta pridruženih dizalica, a uz to smanjuje ukupno trajanje prekrcajnog procesa.

S obzirom na navedena svojstva pojedinačnih modela potrebno je utvrditi metodologiju po kojoj bi bilo moguće osigurati cjelovito rješenje koje će biti rezultat optimizacijskog procesa, a ne pojedinačnih modela. Niti jedan predloženi model ne može samostalno ponuditi optimalno rješenje, a da ono odgovara realnom stanju sustava. Uslijed međuzavisnosti rezultata, varijabli odlučivanja i ulaznih parametara, pojedinačni modeli imaju visoku međusobnu korelaciju. Istovremeno različitost tehnoloških postupaka, obilježja funkcija cilja te postavljena ograničenja na osnovu kojih su kreirani modeli, isključuje mogućnost izrade jedinstvenog modela optimizacije.

Umjesto toga kreiran je optimizacijski proces koji se zasniva na integraciji i međuzavisnosti pojedinačnih optimizacijskih problema. U tom procesu bilo je potrebno izvršiti i odgovarajuće prilagodbe i modifikacije ranije postavljenih modela. Pri tom je moguće da je u nekim slučajevima otežano njihovo svojstvo da egzistiraju kao samostalni modeli jer ih je bilo potrebno prilagoditi kriterijima optimizacije procesa. Osobina kompletnog procesa je operativna funkcionalnost u uvjetima rada manjih i srednjih kontejnerskih terminala s nezavisnim pristanima. Tijek procesa optimizacije prikazuje slika 24.



Slika 24: Proces optimizacije tehnoloških procesa obalnog prekrcajnog podsustava kontejnerskog terminala

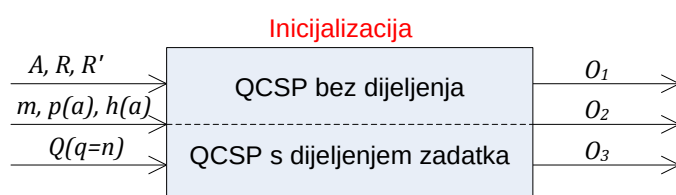
Proces se sastoji od tri glavne faze: inicijalizacije, raspoređivanja i usklađivanja. U fazi inicijalizacije modeliraju se taktičko-operativni problemi obalnog prekrcajnog podsustava na temelju podataka o brodovima i teretu te se izrađuje početni ili inicijalni plan na temelju rezultata optimizacije. U drugoj fazi proširuje se problem i kreira

dinamičko okruženje koje odgovara realnoj situaciji na terminalu, provjerava se inicijalni plan i prema potrebi vrši preraspodjela resursa. U ovoj fazi rezultat je verifikacija inicijalnog plana ili revizija plana. Posljednja faza predstavlja fazu usklađivanja obalnog prekrcajnog podsustava s ciljem da se postigne krajnji cilj optimizacije. Cjelovit proces optimizacije prikazuje slika 24.

Konačno rješenje problema predstavljeno je taktičko-operativnim dinamičkim planom koji objedinjava plan priveza brodova, plan raspodjele obalnih dizalica po pristanu i redoslijed obavljanja prekrcajnih aktivnosti. Navedene komponente jesu po svom obilježju promjenljive pa je za ispunjavanje svrhe istraživanja potrebno uzeti u obzir dinamičnost kompletnog podsustava operativne obale.

5.3. Inicijalizacija – definiranje scenarija prekrcaja

Proces optimizacije započinje fazom inicijalizacije. Na temelju podataka o brodovima, količini i smještaju tereta na brodu, za svaki brod se kreiraju operativni scenariji kojima se određuje trajanje prekrcajnog procesa i rezervacija potrebnog broja dizalica za zadovoljavanje prekrcajne potražnje. Inicijalizacija se sastoji od rješavanja problema redoslijeda rada obalnih dizalica. Na temelju rasporeda tereta na brodu i prekrcajne potražnje potrebno je definirati operativne scenarije. Svaki operativni scenarij definiran je s dva parametra $O(q,p)$ gdje su q i p parametri koji određuju broj dizalica i trajanje prekrcajnog procesa. Slika 25 prikazuje ulazne i izlazne veličine u procesu inicijalizacije.



Slika 25: Dobivanje operativnih scenarija rješavanjem QCSP problema

Kako bi se utvrdili operativni scenariji, potrebno je unaprijed definirati q za koji se rješava problem redoslijeda. Najmanji broj dizalica $q_i^{\min}$ obično je definiran ugovorom između luke i brodara dok najveći broj $q_i^{\max}$ ovisi o rasporedu tereta na brodu. Kod slučajeva kad je $q=1$, rješava se samo QCSP bez dijeljenja zadatka, dok se za ostale slučajeve rješava QCSP po oba modela. Usporedbom rezultata i iskorištenja dizalica

odabire se bolja varijanta. Izlazni parametri iz procesa jesu varijante rješenja kojima se određuju trajanje prekrcajnog procesa p_i te potreban broj dizalica q_i za svaki brod. Za brod i operativni scenarij određen je izrazom:

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} q_1 & p_1 \\ q_2 & p_2 \\ q_3 & p_3 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Na ovaj način dobiju se različita vremena trajanja prekrcajnog procesa ovisno o broju pridruženih dizalica. Koja će se opcija odabrati, ovisi o sljedećem koraku tj. fazi kontrole i preraspodjele. Za fazu inicijalizacije važno je provesti postupak rješavanja modela za svaki q na intervalu $[q^{\min}, q^{\max}]$.

Modeli za rješavanje QCSP problema elaborirani su u poglavlju 4.3. Ovisno o odabranom tipu problema redoslijeda izračunava se optimalni redoslijed prema objektnim funkcijama (4.44), (4.62) i (4.71) te pripadajućim ograničenjima. Nakon što se dobiju rješenja potrebno je provjeriti iskoristivost kapaciteta dizalica prema (4.70) te konačno definirati varijante operativnih scenarija s pripadajućim parametrima.

Važno je napomenuti da je broj dizalica koji se dodjeljuje ovisno o odabranom operativnom scenariju nepromjenljiv tijekom čitavog trajanja prekrcajnog procesa. Na taj način osigurana je postojanost QCSP rješenja²⁵, ali je potrebno osigurati visoku iskoristivost kapaciteta pridruženih dizalica. To se postiže primjenom QCSP modela s dijeljenjem zadatka.

5.4. Raspoređivanje - izbor pristana, mjesta i vremena priveza

Ova faza procesa optimizacije sastoji se od rješavanja integriranog problema dodjele veza i raspodjele obalnih dizalica na nezavisnim pristanima. Model za rješavanje integriranog BAP i QCAP problema za ulazne podatke koristi rješenja QCSP problema prema (5.1). Pored toga, kao ulazni podaci koriste se duljina broda i vrijeme dolaska, jednako kao i kod slučaja s jednim pristanom. Međutim, kad postoji mogućnost izbora

²⁵ Sama postojanost QCSP rješenja za određeni brod ne bi bila ugrožena ukoliko se neka od dizalica ranije oslobodi s broda jer je obavila sve pridružene prekrcajne aktivnosti. Međutim njeno uključivanje u rad na drugom brodu, zahtijeva kompletni reinženjering procesa na tom brodu što uključuje preraspodjelu aktivnosti i QCSP rasporeda.

više od jednog pristana, potrebno je odrediti dodatne parametre koji utječu na njegov izbor. Svaki pristan iz skupa $W = \{W_1, W_2, \dots, W_K\}$ s indeksom $k \leq K$, određen je duljinom obale QL i brojem dizalica QC .

Kod nezavisnih pristana na izbor pojedinog pristana mogu utjecati troškovi unutarnjeg transporta između obale i slagališta. Kod ukrcaja tereta na brod, kontejnere je potrebno prije dolaska broda u luku objediniti na odgovarajućem mjestu na slagalištu odakle se obavlja manipulacija i prijevoz do pristana. Ukoliko dođe do promjene mjesta priveza broda, pri čemu ta promjena znači promjenu pristana na terminalu oblika kao na slici 23, utoliko će to vrlo vjerojatno imati za posljedicu upošljavanje dodatnih resursa za repozicioniranje kontejnera. Preferencija pristana od strane broda tj. brodara može biti uvjetovana i drugim razlozima tehničke ili organizacijske prirode.

Kako bi se zadovoljio uvjet preferencije ili uvjetovanog izbora pristana, potrebno je prilagoditi objektu funkciju u (4.29). Prilagodba je učinjena na način da se penalizira vez broda na pristanu koji je nepovoljniji za brodara ili bi doveo do povećanja potrebnih resursa u odnosu na poželjni pristan. Pored toga, izbor pristana potrebno je promatrati u dinamičkom okruženju te ga postaviti u odnos s vremenom čekanja broda na vez.

Ako se troškovi preraspodjele tereta i resursa za određeni brod na određeni pristan označe sa cp , a jedinični troškovi čekanja broda na slobodno mjesto na pristanu po jedinici vremena sa cw , tada odnos cp/cw predstavlja „težinski faktor pristana“ i u modelu je označen s ω_{ik} . Njegova vrijednost utvrđuje se ovisno o preferenciji pojedinog pristana za svaki brod koji uzlazi u sustav, na osnovu unaprijed poznatih troškova cp i cw , prema sljedećem izrazu:

$$\omega_{ik} = \frac{cp_{ik}}{cw_i} \quad za \quad \forall i \in V, \forall k \in W \quad (5.2)$$

Težinski faktor pristana relativna je veličina koja pokazuje odnos troškova repozicioniranja broda u odnosu na jedinične troškove čekanja broda na slobodni vez. Uvrštavanje apsolutnih troškova u model značilo bi privilegirani položaj pojedinih brodova što također može biti opcija ukoliko luka tj. lučki operater ima takvu poslovnu politiku. U tom slučaju u objektu funkciju se dodaju težinski koeficijenti. Težinski faktor pristana može imati vrijednost nula. To znači da ne postoji preferencija u izboru

pristana. Takav slučaj pretpostavlja dulji vremenski horizont planiranja kako bi se na vrijeme pripremio teret na slagalištu i organizirale operacije na terminalu, bez dodatnih troškova.

Za integrirani problem dodjele veza i raspoređivanja dizalica po vezu za nezavisne pristane potrebno je definirati novi model prema konceptu iz 4.2.2. Cjeloviti model za nezavisne pristane prikazan je u nastavku.

Definiraju se sljedeći skupovi podataka:

$V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$ predstavlja skup brodova s indeksom $i \in \mathbb{N} : i \leq N$, gdje je N ukupni broj brodova u sustavu.

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_H\}$ predstavlja skup vremenskih segmenata odgovarajućeg trajanja s indeksom $t \in \mathbb{N} : t \leq H$, gdje je H vremenski horizont planiranja.

$W = \{W_1, W_2, \dots, W_K\}$ predstavlja skup pristana s indeksom $k \in \mathbb{N} : k \leq K$, gdje je K broj nezavisnih pristana na terminalu.

$O = \{O_1, O_2, O_3\}$ predstavlja skup operativnih scenarija (varijanti) s indeksom v .

Oznake u modelu su sljedeće:

b_i – vez tj. pozicija broda na pristanu (pozicija na kojoj je vezan početni dio broda),

l_i – duljina broda,

a_i – vrijeme dolaska broda,

w_i – trajanje čekanja broda na slobodan vez,

s_i – vrijeme priveza broda tj. vrijeme početka prekrcaja,

d_i – vrijeme odlaska broda tj. vrijeme završetka prekrcaja,

p_{iv} – trajanje prekrcajnog procesa na brodu i prema scenariju v ,

q_{iv} – broj dizalica dodijeljen brodu i prema scenariju v ,

WL_k – duljina pristana,

QC_k – ukupni broj dizalica na pristanu,

ω_{ik} – težinski faktor pristana za pojedini brod,

H – vremenski horizont planiranja,

M – velika cjelobrojna vrijednost.

Binarne varijable korištene u modelu definirane su sljedećim izrazima:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{ako je brod } i \text{ smješten na pristan } k \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & b_j \geq b_i + l_i \\ 0, & b_j < b_i + l_i \end{cases} \quad (5.4)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & s_j \geq d_i \\ 0, & s_j < d_i \end{cases} \quad (5.5)$$

$$o_{iv} = \begin{cases} 1, & \text{ako je za brod } i \text{ odabran scenarij } v \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (5.6)$$

$$r_{it} = \begin{cases} 1, & \text{ako se u segmentu } t \text{ obavlja prekrcaj na brodu } i \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (5.7)$$

$$r_{it}^{kv} = \begin{cases} 1, & \text{ako se na brodu } i \text{ na pristanu } k \text{ obavlja prekrcaj} \\ & \text{prema scenariju } v \text{ u vremenskom segmentu } t \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (5.8)$$

Objektna funkcija minimizira boravak brodova na lučkim kontejnerskim terminalima s nezavisnim pristanima u ovisnosti o raspoloživim resursima i preferenciji pristana te glasi:

$$MinZ = \sum_{i \in V} w_i + \sum_{i \in V} \sum_{v \in O} p_{iv} o_{iv} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in W} x_{ik} \omega_{ik} \quad (5.9)$$

uz ograničenja:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{v=1}^3 q_{iv} r_{it}^{kv} \leq QC_k \quad \forall t \in T, \forall k \in W \quad (5.10)$$

$$\sum_{v=1}^3 o_{iv} = 1 \quad \forall i \in V \quad (5.11)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \quad \forall i \in V \quad (5.12)$$

$$b_i + l_i - 1 - WL_k \leq M(1 - x_{ik}) \quad \forall i \in V, \forall k \in W \quad (5.13)$$

$$r_{it}^{kv} > r_{it} + o_{iv} + x_{ik} - 3 \quad \forall i \in V, \forall k \in W, \forall t \in T, \forall v \in O \quad (5.14)$$

$$3r_{it}^{kv} \leq r_{it} + o_{iv} + x_{ik} \quad \forall i \in V, \forall k \in W, \forall t \in T, \forall v \in O \quad (5.15)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^3 r_{it}^{kv} = r_{it} \quad \forall i \in V, \forall t \in T \quad (5.16)$$

$$\sum_{v=1}^3 p_{iv} o_{iv} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^H \sum_{v=1}^3 r_{it}^{kv} \quad \forall i \in V \quad (5.17)$$

$$(t+1)r_{it} \leq d_i \quad \forall i \in V, \forall t \in T \quad (5.18)$$

$$tr_{it} + H(1 - r_{it}) \geq s_i \quad \forall i \in V, \forall t \in T \quad (5.19)$$

$$d_i - s_i - \sum_{v=1}^3 p_{iv} o_{iv} = 0 \quad \forall i \in V \quad (5.20)$$

$$b_j + M(1 - y_{ij}) \geq b_i + l_i \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (5.21)$$

$$s_j + M(1 - z_{ij}) \geq d_i \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (5.22)$$

$$y_{ij} + y_{ji} + z_{ij} + z_{ji} \geq x_{ik} + x_{jk} - 1 \quad \forall i, j \in V, i \neq j, \forall k \in W \quad (5.23)$$

$$a_i + w_i = s_i \quad \forall i \in V \quad (5.24)$$

$$s_i \geq \alpha_i \quad \forall i \in V \quad (5.25)$$

$$w_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (5.26)$$

$$x_{ik}, y_{ij}, z_{ij}, o_{iv}, r_{it}, r_{it}^{kv} \in \{0,1\} \quad (5.27)$$

Funkcija cilja (5.9) ostvaruje optimum po tri kriterija: vremenu čekanja broda na slobodan vez $\sum_{i \in V} w_i$, trajanju prekrcajnog procesa ovisno o odabranoj varijanti i broju dizalica $\sum_{i \in V} \sum_{v \in O} p_{iv} o_{iv}$ te preferenciji pristana $\sum_{i \in V} \sum_{k \in W} x_{ik} w_{ik}$.

Konceptualno, model s nezavisnim pristanima obilježavaju ograničenja funkcije (5.10)-(5.13). Prema (5.10) uzimaju se tri varijante rješenja QCSP problema za svaki brod ili tri operativna scenarija pri čemu u svakom vremenskom segmentu zbroj dizalica pridruženih brodovima, koji su raspoređeni na određeni pristan, ne smije biti veći od ukupnog broja dizalica na tom pristanu. Za svaki brod treba se u konačnici odabrati samo jedan operativni scenarij (5.11) te vez na samo jednom od pristana (5.12). Iako se ova potonja formulacija sama po sebi podrazumijeva jer je brod u fizičkom smislu nedjeljiv, nedjeljivost broda je potrebno matematički i programski definirati. Pristani mogu biti različite duljine pa prilikom raspoređivanja brodova treba onemogućiti da brodu bude dodijeljen vez tako da duljina broda prekorači broj slobodnih pozicija na pristanu (5.13). Ukoliko je brodu dodijeljen vez na određenom pristanu, $x_{ik} = 1$ pa je $M(1 - x_{ik}) = 0$, krajnja pozicija broda $b_i + l_i - 1$ mora biti unutar granice pristana WL_k .

Preostala ograničenja predstavljaju matematičku prilagodbu integriranog BAP i QCAP problema modelu s nezavisnim pristanima. Najprije, potrebno je odrediti uvjete pod kojima binarna varijabla odlučivanja r_{it}^{kv} poprima vrijednosti 0 ili 1. Ovi uvjeti definirani su u (5.14) za vrijednost $r_{it}^{kv} = 1$ odnosno u (5.15) za vrijednost $r_{it}^{kv} = 0$. Prema (5.14) mora biti $r_{it}^{kv} = 1$ kada svaka od varijabli r_{it}, o_{iv}, x_{ik} ima vrijednost 1. Istovremeno prema (5.15) mora biti $r_{it}^{kv} = 0$, ako je vrijednost barem jedne od varijabli r_{it}, o_{iv}, x_{ik} jednaka nuli. Kombinacijom ovih dvaju ograničenja definirana je jednoznačno vrijednost binarne varijable r_{it}^{kv} za sve slučajeve. Izrazi u (5.16) i (5.17) ostvaruju međusobni odnos varijabli r_{it}^{kv} i r_{it} te osiguravaju vezu s trajanjem prekrcajnog procesa p_{iv} za odabrani

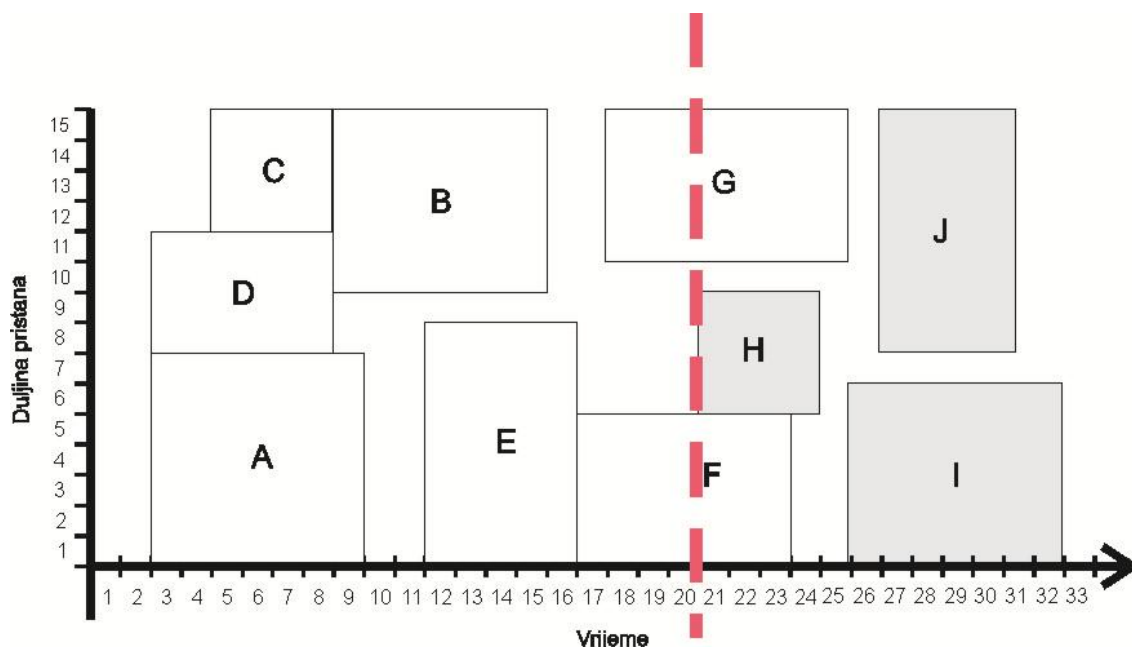
operativni scenarij o_{iv} . Vrijeme priveza i početka prekrcaja, završetak prekrcaja te odnos između ovih dviju veličina određeni su izrazima (5.18)-(5.20), na sličan način kao što je to i kod modela s jednim pristanom. Uvjeti za preklapanje brodova (5.21)-(5.23) su, također, napravljeni prema uzoru na model s jednim pristanom. Jedina promjena odnosi se na ograničenje (5.23) gdje je, zbog nezavisnosti pristana, potrebno preklapanje definirati samo u slučaju kada su parovima brodova pridruženi isti pristani tj. kada je $x_{ik} = 1$ i $x_{jk} = 1$. Tada i samo tada mora izraz na lijevoj strani nejednadžbe biti veći od nule tj. $y_{ij} + y_{ji} + z_{ij} + z_{ji} > 0$ što znači da ne smije biti preklapanja niti u prostoru, niti u vremenu. Preostala ograničenja definiraju vrijeme čekanja broda w_i i međusobni odnos vremena dolaska, vremena čekanja i vremena priveza (5.24), (5.25) i (5.26). Područje definicije binarnih varijabli određeno je izrazom (5.27).

Raspoređivanje resursa ostvaruje se izborom varijante tj. operativnog scenarija kojim se dobiva minimum objektne funkcije. Raspored brodova po pristanu uključuje optimalno mjesto i vrijeme priveza, jednako kao i kod BAP modela. Boravak broda na vezu, za razliku od BAP problema, nije predefiniran nego ovisi o odabranoj varijanti o_1, o_2, o_3 . Model je tako koncipiran da uvijek uzima najbolju varijantu za brod, a to je ona s najvećim brojem pridruženih dizalica i najkraćim vremenom prekrcaja. Na ovaj način se QCAP problem alokacije kontejnerskih dizalica također svodi na odabir varijante umjesto na pojedinačno pridruživanje dizalica ovisno o prekrcajnoj potražnji. Kako je temelj za određivanje broja dizalica rješenje QCSP problema redoslijeda, ne može se dogoditi da pridružene dizalice ne mogu ostvariti prekrcajni učinak zbog nehomogenosti rasporeda tereta. Odabir najboljeg operativnog scenarija za svaki brod može dovesti (i u pravilu dovodi) do nepostojanja realnog rješenja ako su resursi (obalne dizalice) ograničeni. U tom slučaju model obavlja preraspodjelu varijanti, odabire drugi operativni scenarij za pojedini brod kako bi se u konačnici dobilo optimalno i realno integrirano rješenje.

5.5. Usklađivanje

Faza usklađivanja sastoji se od provjere zavisnih parametara dvaju susjednih vremenskih razdoblja planiranja. Osim usklađivanja parametara na granici između dvaju razdoblja planiranja, u ovoj se fazi može izvršiti usklađivanje temeljem posebnih

zahtjeva broдача ili ugovora s lučkim operaterom. Prvenstveno se pri tom misli na usklađivanje vremena dolaska broda tj. na mogućnost ranijeg dolaska od najavljenog. Ukoliko se u ovoj fazi utvrdi da postoji potreba za usklađivanjem, potrebno je ponoviti prethodnu fazu procesa optimizacije.



Slika 26: Prijelaz između dva razdoblja planiranja

Operativni plan raspodjele vezova izrađuje se za određeno vremensko razdoblje u odnosu na horizont planiranja. U slučaju kontejnerskih terminala to može biti svakih 24 sata, svakih 48 sati, jednom tjedno ili neko drugo razdoblje. Početak izrade plana za novo razdoblje pretpostavlja da su svi vremenski segmenti slobodni. Međutim, to ne mora biti slučaj. Slika 26 pokazuje jedan takav primjer. Isprekidana linija dijeli dva susjedna razdoblja planiranja. Do vremenskog segmenta 20 nalazi se prvo razdoblje, a od segmenta 21 drugo. Brodovi od A-G pripadaju skupu brodova iz prvog razdoblja, dok brodovi H-J pripadaju skupu brodova iz sljedećeg razdoblja planiranja. Vidljivo je da se brodovi F i G nalaze na vezu za vrijeme prelaska iz jednog vremenskog razdoblja u drugo. Brod F zauzima pozicije vezova od 1-5 i vremenske segmente od 17-23, pri čemu su segmenti od 21-23 iz sljedećeg planskog razdoblja. Također, brod G zauzima pozicije vezova od 11-15 i vremenske segmente od 18-25, pri čemu segmenti od 18-25 prelaze u drugo vremensko razdoblje.

U slučaju sa slike brod H, koji dolazi u 1. vremenskom segmentu drugog vremenskog razdoblja, može biti vezan po dolasku jedino između pozicija 5 i 11, tj. preciznije rečeno $5 < b_H < 8$ uvažavajući duljinu broda. Da bi to bilo moguće i da bi se izbjegao slučaj da se brodu H dodijeli vez na kojem se još uvijek nalazi brod iz prethodnog razdoblja, treba postaviti zabranu raspoređivanja brodova na vezove na kojima se nalaze brodovi koji nisu dovršili prekrcajni proces.

Zabranu je moguće postaviti na dva načina. Prvi je način da se prepravi model slično kao kod integriranog modela s ograničenjem dubine na pristanu prikazanog u poglavlju 4.2.3. Prepravka bi bila puno složenija jer bi takva zabrana morala biti vremenski uvjetovana. Drugi način je puno jednostavniji, a svodi se na umetanje brodova iz prethodnog razdoblja u postojeći model uz redefiniranje njihovih parametara. Sam model nije potrebno mijenjati, već se samo trebaju prilagoditi vrijednosti ulaznih parametara za brodove iz prethodnog razdoblja te eksplicitno definirati vrijednosti nekoliko binarnih varijabli. Ovisno o dužini horizonta planiranja potrebno je odrediti završni vremenski segment prethodnog razdoblja i početni vremenski segment sljedećeg vremenskog razdoblja.

Ako su V i V' skupovi brodova, a T i T' skupovi vremenskih segmenata iz dva sukcesivna horizonta planiranja H i H' , tada završni vremenski segment $t \in T$ ima indeks $t = H - \Delta t$ gdje je Δt broj vremenskih segmenata koji se prenose u H' . Broj vremenskih segmenata koji se prenose odnose se na preostalo vrijeme trajanja prekrcajnog procesa za one brodove koji su na vezu, što znači da je njihovo ukupno vrijeme prekrcajnog procesa $p_i = d_i - s_i = \sum_{t=1}^{H-\Delta t} r_{it} + \sum_{t=H-\Delta t+1}^{\Delta t} r'_{it}$ gdje su r'_{it} preneseni vremenski segmenti. Pseudoalgoritam za postavljanje zabrane raspoređivanja brodova kod prijelaza iz prvog u drugo razdoblje planiranja je sljedeći:

Početak

Korak 1. Definiraj $t = H - \Delta t$ za T

Korak 2. Ako je $\sum_{t=1}^{\Delta t} r'_{it} = 0$ za $\forall i \in V$ idi na **Kraj**

Korak 3. Ako $\exists i \in V : d_i > H - \Delta t + 1$ umetni brod j , $j \equiv i$ u V' , postavi b_j , $a_j = 1$, $s_j = 1$

Korak 4. Na osnovu rješenja iz H odredi k za koje je $x_{ik} = 1$, postavi $x_{jk} = 1$, $j \equiv i$,

odredi v za koje je $o_{iv} = 1$, postavi $o_{jv} = 1, j \equiv i$, postavi $p_{jv} = \sum_{t=H-\Delta t+1}^{\Delta t} r'_{jt}$

Kraj

Nakon umetanja svih brodova koji su na vezu u sljedeći horizont planiranja, oni ostaju na svojim pozicijama dok ne završe prekrcajni proces. Pozicije vezova i vremenski segmenti koji su zauzeti tim brodovima ne mogu se dodijeliti brodovima iz novog vremenskog ciklusa sve dok brodovi iz prethodnog ciklusa ne napuste luku. Na taj način relativno je jednostavno riješen problem raspoređivanja brodova na granici između dvaju razdoblja planiranja.

Drugi predmet usklađivanja, podešavanje vremena dolaska broda u luku, predstavlja opciju koja se može implementirati ukoliko postoji takav dogovor s brodarima. Pretpostavlja se da u slučajevima kada brodu nije moguće osigurati vez na dolasku, možda postoji bolje rješenje ako je moguće osigurati dolazak broda ranije od najavljenog vremena dolaska. Za brodara to znači da će povećani troškovi zbog povećanja brzine i većeg utroška goriva biti manji od gubitaka uslijed čekanja broda na slobodan vez u uvjetima kada dolazak ne bi bio raniji od najavljenog. Pri tome treba voditi računa da nije uvijek moguće osigurati uštedu u ukupnim troškovima te da postoje tehnička ograničenja koja onemogućavaju raniji dolazak ispod određene granice.

Kako bi se provelo usklađivanje na temelju zajedničkog sporazuma luke i brodara u cilju podešavanja vremena dolaska broda u luku, potrebno je izmijeniti objektu funkciju tako da ona glasi:

$$MinZ = \sum_{i \in V} (w_i \omega_i^{wait} + e_i \omega_i^{arr}) + \sum_{i \in V} \sum_{v \in O} p_{iv} o_{iv} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in W} x_{ik} \omega_{ik} \quad (5.28)$$

odnosno

$$MinZ = \sum_{i \in V} \left[(w_i \omega_i^{wait} + e_i \omega_i^{arr}) + \sum_{v \in O} p_{iv} o_{iv} + \sum_{k \in W} x_{ik} \omega_{ik} \right] \quad (5.29)$$

gdje su:

e_i - vremenska ušteda tj. razlika vremena između najavljenog dolaska i ranijeg dolaska,

w_i^{wait} - težinski koeficijent čekanja broda na slobodni vez,

w_i^{arr} - težinski koeficijent ubrzanja broda radi ranijeg dolaska u luku.

Funkcija (5.29) minimizira vrijeme čekanja i razliku vremena između najavljenog dolaska i ranijeg dolaska jer je cilj da ne bude dodatnih troškova ili gubitaka vremena za brodara. Zbog toga je najbolje rješenje kada je brodu osiguran vez na dolasku u normalnim uvjetima eksploatacije.

Raniji dolazak broda ovisi o tehničkim mogućnostima povećanja brzine broda i preostalom putu do odredišne luke. Zbog toga se definira parametar α' kojim se označava najranije mogući dolazak broda u luku. Za potpunu funkcionalnost modela potrebno je još prilagoditi izraze (5.24) i (5.25) te dodati ograničenja za raniji dolazak prema sljedećim formulama:

$$\alpha_i - e_i + w_i = s_i \quad \forall i \in V \quad (5.30)$$

$$s_i \geq \alpha'_i \quad \forall i \in V \quad (5.31)$$

$$e_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (5.32)$$

Prikazane izmjene omogućavaju da vrijeme priveza broda može biti ranije od prethodno najavljenog dolaska (5.30), ali ne prije najranije mogućeg dolaska sukladno tehničkim mogućnostima (5.31). Mjesto i vrijeme priveza broda ovisit će o optimalnom rješenju modela za sustav brodova za određeni horizont planiranja tako da vrijedi $\alpha'_i \leq s_i < \alpha_i$. Treba uočiti da je raniji dolazak svrhovit samo ako je moguće ostvariti da je $s_i < \alpha_i$. Ukoliko to nije slučaj tj. $s_i \geq \alpha_i$, vez broda određuje se prema prethodnoj najavi dolaska, u uvjetima redovite eksploatacije broda.

Nakon što se provede faza usklađivanja prema dijagramu sa slike 24, proces optimizacije je završen. Konačno rješenje predstavlja optimalni operativni plan priveza brodova i rasporeda rada obalnih dizalica na terminalu kod kojih su pristani nezavisno prostorno raspoređeni.

Primjer 5

U sljedećem primjeru demonstriran je slučaj rješavanja problema optimizacije s 2 nezavisna pristana i sustav od 7 brodova. Svaki od brodova konkurira ravnopravno za vezove na pristanima i to tako da je za sve brodove prihvatljivija opcija vez na pristanu 1, a nepovoljnija opcija vez na pristanu 2 ($\omega_1 = 1$, $\omega_2 = 5$). Za svaki od brodova unaprijed su određeni težinski koeficijenti čekanja broda na slobodni vez i koeficijent ubrzanja radi ranijeg dolaska u luku. U ovom primjeru svi brodovi su ravnopravni s obzirom na vrijednost koeficijenata koji su im određeni.

Tablica 8: Primjer 5 - ulazni podaci

i	V	l_i	α_i	α_i'	ω_i^{wait}	ω_i^{arr}	$p_{i1} / p_{i2} / p_{i3}$	$q_{i1} / q_{i2} / q_{i3}$	$\omega_{i1} / \omega_{i2}$
1	A	6	1	1	1	2	5/6/10	4/3/2	1/5
2	B	6	3	3	1	2	4/5/8	3/2/1	1/5
3	C	4	9	8	1	2	9/13/25	3/2/1	1/5
4	D	4	6	6	1	2	6/10/20	3/2/1	1/5
5	E	7	12	12	1	2	6/7/10	5/4/3	1/5
6	F	4	15	12	1	2	4/8/1000	2/1/1000	1/5
7	G	5	10	8	1	2	5/7/11	4/3/2	1/5
k	WL_k		QC_k						
1	15		5						
2	15		5						

Pristanima je određena jednaka duljina, u ovom slučaju 15 segmenata, što odgovara duljini pristana od 750 metara ako su segmenti dugački 50 metara. Na svakom od pristana na raspolaganju je 5 obalnih dizalica. Ulazni podaci za model prikazani su u tablici 8. Vrijednosti p_{i1}, p_{i2}, p_{i3} te q_{i1}, q_{i2}, q_{i3} za varijante o_1, o_2, o_3 utvrđene su nakon rješavanja problema redoslijeda rada obalnih dizalica i pretvorene u vremenske segmente, pogodne za unos u integralni problem dodjele veza i obalnih dizalica na terminalima s nezavisnim pristanima. Dobiveno rješenje prikazano je u tablici 9 i na slici 27.

Tablica 9: Primjer 5 - izlazni podaci, rješenje modela

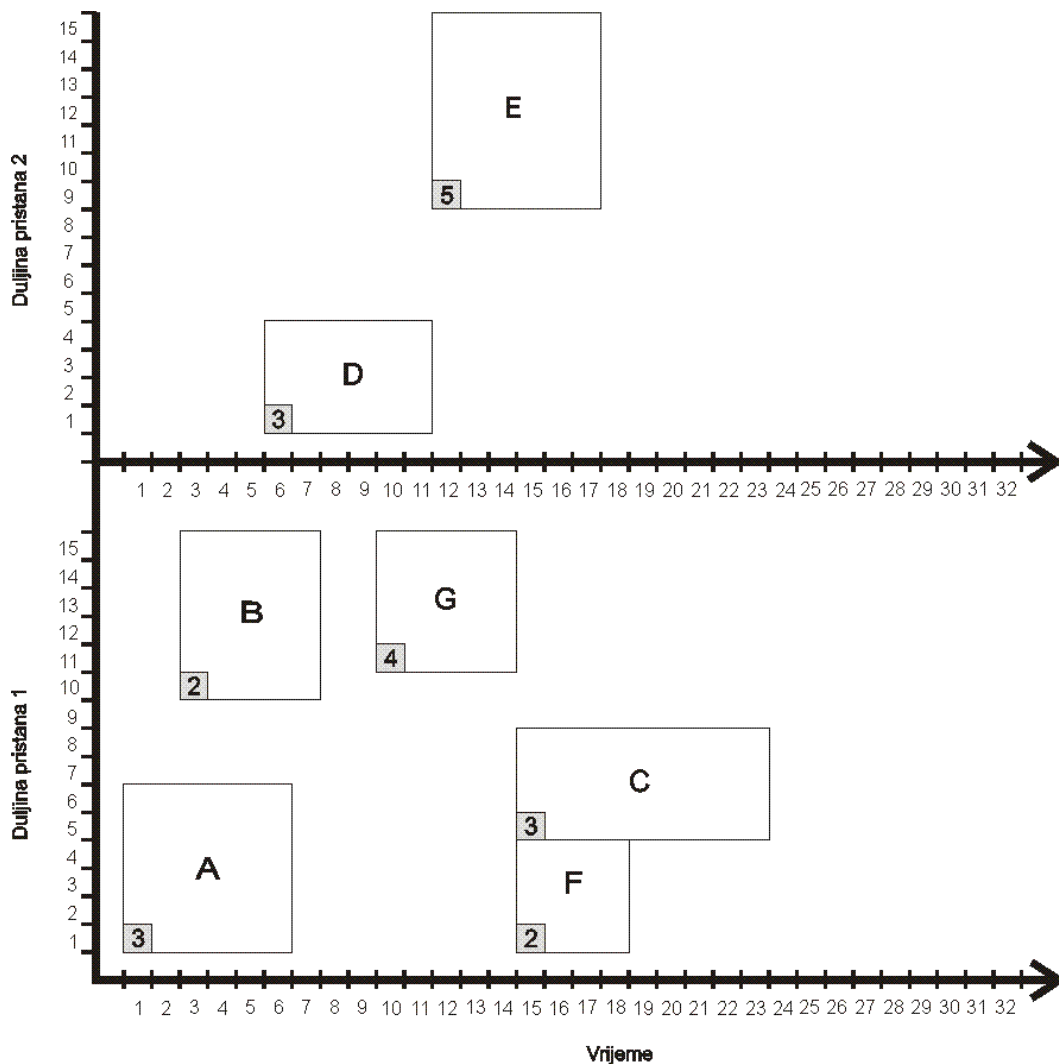
i	V	b_i	s_i	d_i	w_i	e_i	x_{i1} / x_{i2}	$o_{i1} / o_{i2} / o_{i3}$
1	A	1	1	7	-	-	1/0	0/1/0
2	B	10	3	8	-	-	1/0	0/1/0
3	C	5	15	24	6	-	1/0	1/0/0
4	D	1	6	12	-	-	0/1	1/0/0
5	E	9	12	18	-	-	0/1	1/0/0
6	F	1	15	19	-	-	1/0	1/0/0
7	G	11	10	15	-	-	1/0	1/0/0
Objektna funkcija Min Z = 62								

U sustavu iz primjera, svim brodovima određen je pristan 1 kao prioritetni pri čemu je izbor pristana postavljen u odnos s veličinama o kojima ovisi vrijeme priveza pojedinog broda. Odnos težinskih faktora pristana postavljen je 1/5, što znači da je vez na alternativnom pristanu ekvivalentan čekanju na privez od pet vremenskih jedinica.

Optimalno rješenje objektne funkcije iznosi Z=62. Pri tom su brodovi D i E raspoređeni na pristan broj 2, gdje im je pridružen maksimalno mogući broj dizalica prema scenariju 1. Brod C jedini mora čekati 6 vremenskih jedinica na slobodan vez na pristanu 1, također, nakon čekanja dobiva broj dizalica za realizaciju prekrcaja po scenariju 1. Njegov raniji privez na pristanu 1 ne bi rezultirao optimalnim rješenjem jer mu ne bi bilo moguće pridružiti 3 dizalice, nego tek 1 ili 2 što bi prema QCSP rješenju značilo produljenje prekrcajnog procesa s 9 na 13 ili 25 vremenskih jedinica.

Iz grafikona sa slike 27 vidljivo je da je brodovima u svakom vremenskom segmentu pridružen onoliki broj dizalica koji odgovara odabranim scenarijima prekrcaja i trajanju prekrcajnog procesa dobivenim rješenjem problema redoslijeda rada obalnih dizalica. Niti u jednom vremenskom segmentu ukupni broj dizalica pridružen brodovima ne prelazi maksimalno raspoloživi broj dizalica na pojedinom pristanu. Broj dizalica pridružen brodovima stalan je i nepromjenjiv tijekom prekrcajnog procesa. Time je izbjegnut utjecaj procesa koji se odvijaju na drugim brodovima na dostupnost dizalica te međusobni utjecaji na konzistentnost raspodjele prekrcajnih zadataka koji se javljaju u

slučaju kada bi broj dizalica pridružen brodu bio promjenjiv tijekom prekrcajnog procesa.



Slika 27: Primjer 5 - grafičko rješenje

Primjer 5a

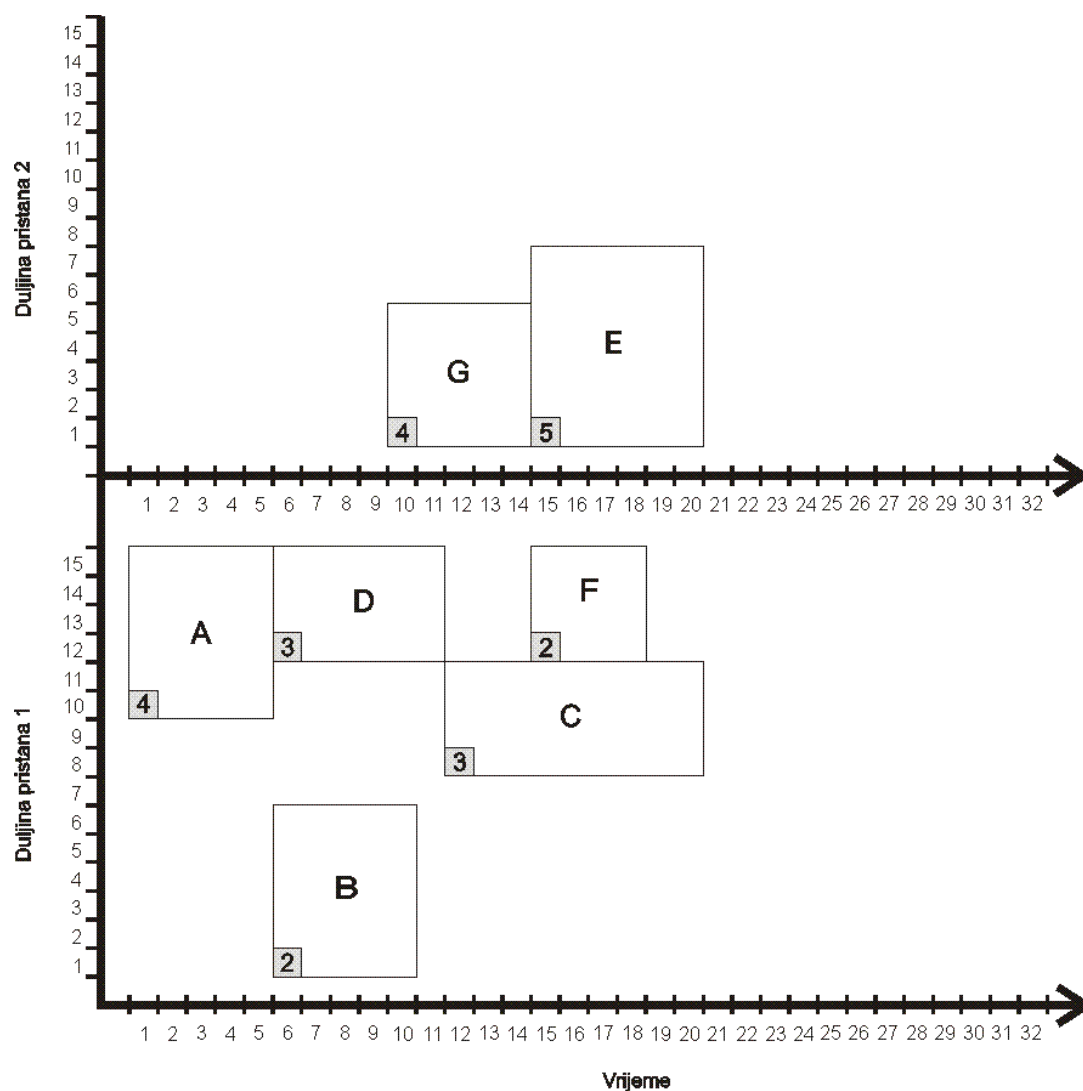
Ako se promijene parametri za izbor pristaništa tako da se za brod G odredi pristan 2 kao prioritetni, tako da je $\omega_{t1} = 5$, $w_{t2} = 1$, dobiva se drugačije optimalno rješenje. Tada je očito da brod G treba smjestiti na pristan 2 jer je jedino njemu taj pristan bolja opcija. Dobiveno rješenje prikazano je u tablici 10 i na slici 28.

Tablica 10: Primjer 5a - izlazni podaci, rješenje modela

i	V	b_i	s_i	d_i	w_i	e_i	x_{i1} / x_{i2}	$o_{i1} / o_{i2} / o_{i3}$
1	A	10	1	6	-	-	1/0	1/0/0
2	B	1	6	11	3	-	1/0	0/1/0
3	C	8	12	21	3	-	1/0	1/0/0
4	D	12	6	12	-	-	1/0	1/0/0
5	E	1	15	21	3	-	0/1	1/0/0
6	F	12	15	19	-	-	1/0	1/0/0
7	G	1	10	15	-	-	0/1	1/0/0
Objektna funkcija Min Z = 60								

Prema rješenju očekivano je brod G smješten na pristan 2. Ukupnom preraspodjelom dodijeljenih vezova dobivena je bolja vrijednost objektne funkcije, nego u prvom slučaju ($Z=60$). Ukupno vrijeme čekanja raspoređeno je među brodovima B, C i E. Zbog različitog težinskog faktora pristana za brod G, pridruženi scenariji prekrcaja pogodniji su za brodove, nego u prvom slučaju pa je tako za 6 od 7 brodova pridružen scenarij s najkraćim trajanjem prekrcajnog procesa. Drugim riječima pridružen im je maksimalno mogući broj dizalica.

Kao i u prvom slučaju model u svakom momentu vodi računa o ukupnom raspoloživom broju obalnih dizalica na pojedinom pristanu što je vidljivo iz grafičkog prikaza koji predstavlja optimalno rješenje za ovaj primjer.



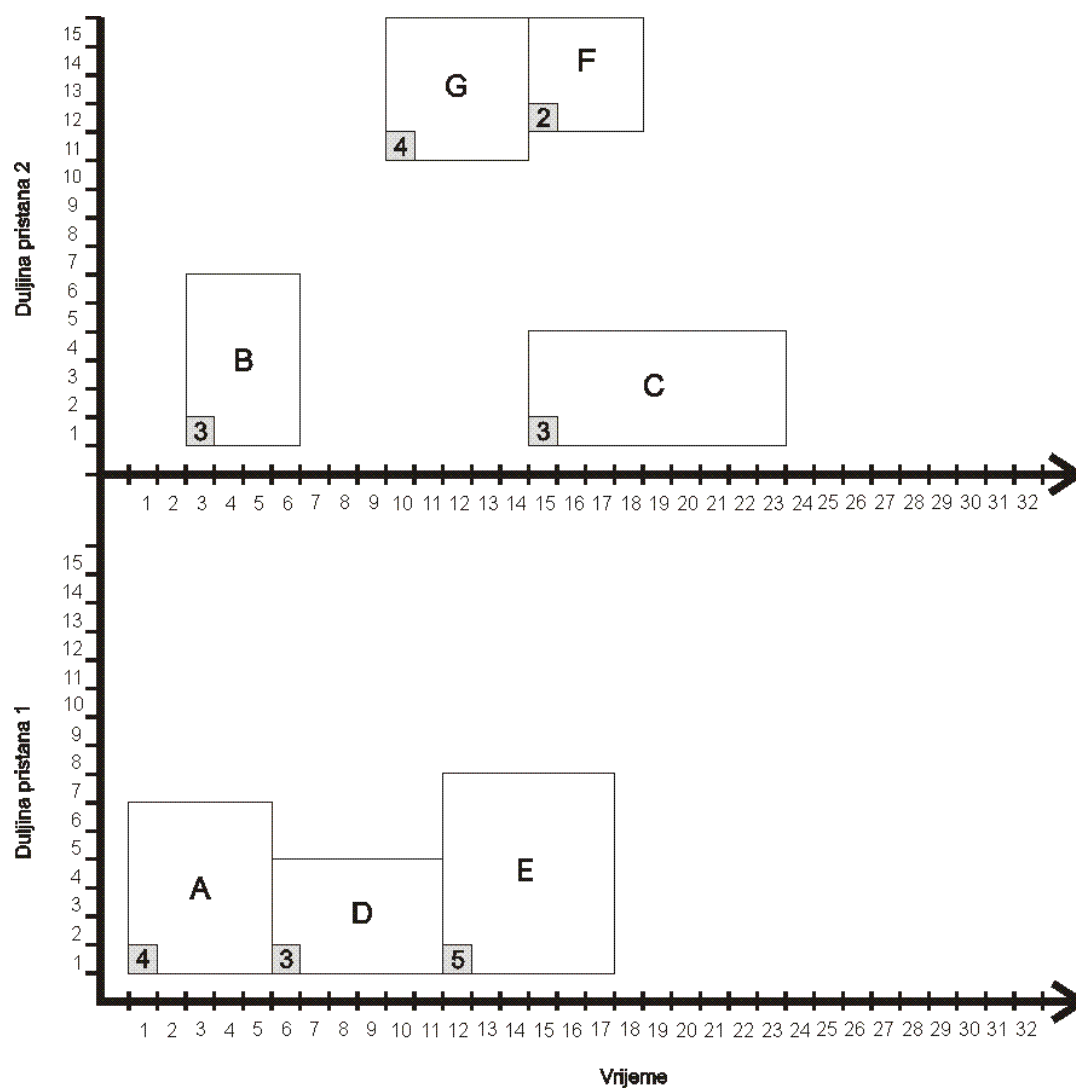
Slika 28: Primjer 5a - grafičko rješenje

Primjer 5b

U sljedećem primjeru za sve brodove od A – G određeni su težinski faktori pristana u istom iznosu $w_{i1} = 1, w_{i2} = 1$, što znači da nema prioritetnog pristana niti za jedan brod. Prema dobivenom optimalnom rješenju (Tablica 11 i Slika 29) brodovi su ravnomjerno raspoređeni po pristanima što odgovara postavljenim uvjetima. Brod C jedini mora čekati na slobodan vez i to zbog nedostupnosti dizalica, no zato je svim brodovima određen maksimalno mogući broj dizalica i minimalno trajanje prekrcajnih operacija odabirom scenarija 1.

Tablica 11: Primjer 5b - izlazni podaci, rješenje modela

i	V	b_i	s_i	d_i	w_i	e_i	x_{i1} / x_{i2}	$o_{i1} / o_{i2} / o_{i3}$
1	A	1	1	6	-	-	1/0	1/0/0
2	B	1	3	7	-	-	0/1	1/0/0
3	C	1	15	24	6	-	0/1	1/0/0
4	D	1	6	12	-	-	1/0	1/0/0
5	E	1	12	18	-	-	1/0	1/0/0
6	F	12	15	19	-	-	0/1	1/0/0
7	G	11	10	15	-	-	0/1	1/0/0
Objektna funkcija Min Z = 52								



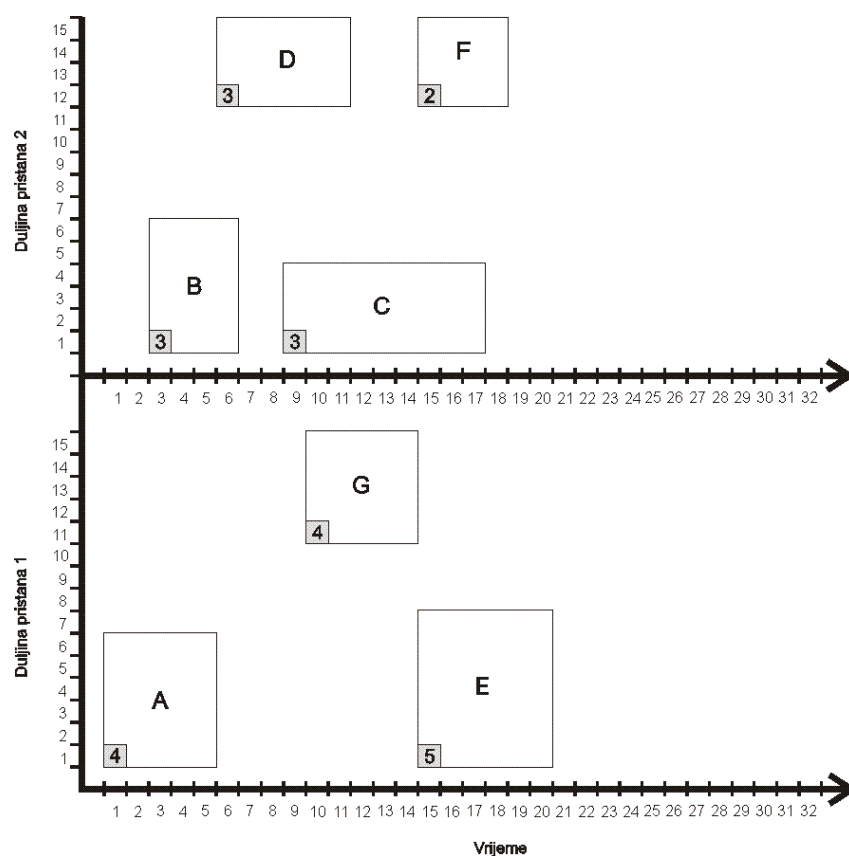
Slika 29: Primjer 5b - grafičko rješenje

Primjer 5c

Ukoliko se poveća broj dizalica po pristanima na 6, dobiva se bolje optimalno rješenje ($Z=49$). Uz uvjete kao u prethodnom slučaju, ukupno čekanje smanjeno je s 6 na 3. Rješenje je prikazano u tablici 12 i grafički na slici 30.

Tablica 12: Primjer 5c - izlazni podaci, rješenje modela

i	V	b_i	s_i	d_i	w_i	e_i	x_{i1} / x_{i2}	$o_{i1} / o_{i2} / o_{i3}$
1	A	1	1	6	-	-	1/0	1/0/0
2	B	1	3	7	-	-	0/1	1/0/0
3	C	1	9	18	-	-	0/1	1/0/0
4	D	12	6	12	-	-	0/1	1/0/0
5	E	1	15	21	3	-	1/0	1/0/0
6	F	12	15	19	-	-	0/1	1/0/0
7	G	11	10	15	-	-	1/0	1/0/0
Objektna funkcija Min $Z = 49$								



Slika 30: Primjer 5c - grafičko rješenje

Primjer 5d - usklađivanje kod prijelaza između dva razdoblja planiranja

Usklađivanje između dva razdoblja planiranja biti će prikazano na osnovnom primjeru sa 7 brodova iz prvog razdoblja i 3 nova broda - P,R i S koji dolaze u drugom razdoblju planiranja. Njihove ulazne podatke prikazuje tablica 13.

Tablica 13: Primjer 5d - ulazni podaci za drugo plansko razdoblje²⁶

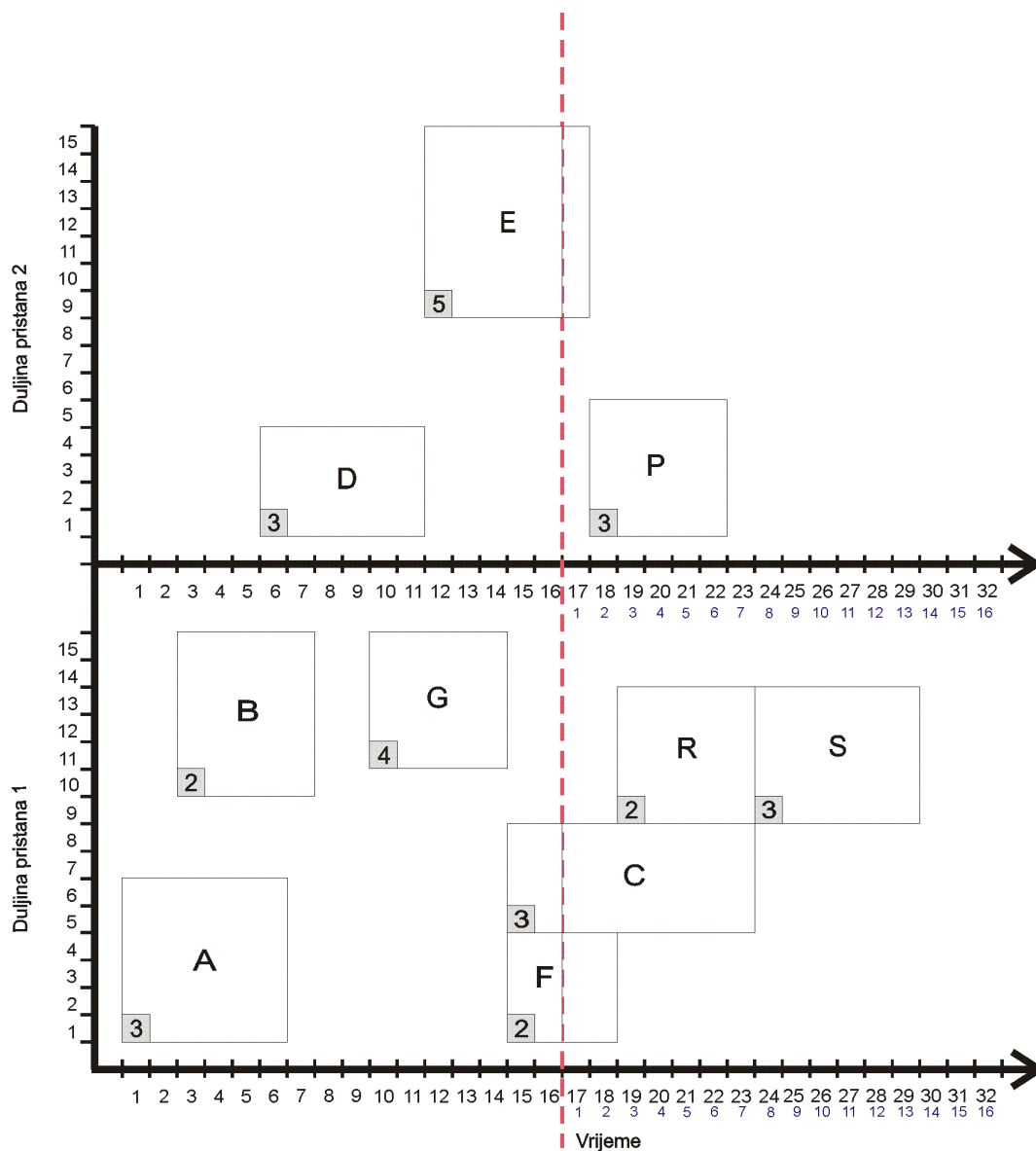
i	V	l_i	α_i	α'_i	ω_i^{wait}	ω_i^{arr}	$p_{i1} / p_{i2} / p_{i3}$	$q_{i1} / q_{i2} / q_{i3}$	$\omega_{i1} / \omega_{i2}$
1	P	7	1	1	1	2	5/6/10	3/2/1	1/5
2	R	6	3	3	1	2	4/5/8	3/2/1	1/5
3	C	4	1	1	1	2	7/13/25	3/2/1	1/5
4	S	5	5	5	1	2	6/8/10	3/2/1	1/5
5	E	7	1	1	1	2	1/7/10	5/4/3	1/5
6	F	4	1	1	1	2	2/8/1000	2/1/1000	1/5
k	WL_k		QC_k						
1	15		5						
2	15		5						

Najprije treba odrediti neki t kod kojega se prelazi na sljedeće razdoblje planiranja. Neka je $t = 16$, tada je za $H = 40$, $\Delta t = 24$. Prema rješenju prethodnog razdoblja planiranja $d_3 = 24$, $d_5 = 18$ i $d_6 = 19$, pa za $i = 3, 5, 6$ tj. brodove C, E i F vrijedi $d_i > H - \Delta t + 1$. Prema $\sum_{t=H-\Delta t+1}^{\Delta t} r'_{it}$ vrijednost r'_{it} za brodove C, E i F glasi: $\sum_{t=17}^{24} r'_{3,t} = 7$, $\sum_{t=17}^{24} r'_{5,t} = 1$, $\sum_{t=17}^{24} r'_{6,t} = 2$. Ove vrijednosti r'_{it} predstavljaju preostalo vrijeme trajanja prekrcajnog procesa koje se prenosi u sljedeće razdoblje planiranja. Adekvatno tome mijenja se vrijednost parametara $p_{3,1}$, $p_{5,1}$ i $p_{6,1}$.

Sljedeći korak je umetanje brodova C, E i F u novo razdoblje planiranja. Postavljaju se vrijednosti $b_3 = 5$, $b_5 = 9$ i $b_6 = 1$, zatim $\alpha_3 = \alpha_5 = \alpha_6 = 1$ te $s_3 = s_5 = s_6 = 1$, budući da se ovi brodovi već otprije nalaze na vezu. Umetanje se završava postavljanjem fiksnih vrijednosti binarnih varijabli odlučivanja $x_{3,1} = 1$, $x_{5,2} = 1$ i $x_{6,1} = 1$ kojima je od ranije

²⁶ Masnim slovima označeni su izmijenjeni parametri za brodove iz prethodnog razdoblja planiranja

određen pristan za brodove C, E i F te postavljanjem $o_{3,1} = o_{5,1} = o_{6,1} = 1$ čime je određen scenarij po kojemu su dodijeljene obalne dizalice i određeno trajanje prekrcajnog procesa.



Slika 31: Primjer 5d - rješenje kod prijelaza na sljedeće plansko razdoblje

Tablica 14: Primjer 5d - izlazni podaci za rješenje modela kod prijelaza planskih razdoblja²⁷

i	V	b_i	s_i	d_i	w_i	e_i	x_{i1} / x_{i2}	$o_{i1} / o_{i2} / o_{i3}$
1	P	1	2	7	1	-	0/1	1/0/0
2	R	9	3	8	-	-	1/0	0/1/0
3	C	5	1	8	-	-	1/0	1/0/0
4	S	9	8	14	3	-	1/0	1/0/0
5	E	9	1	2	-	-	0/1	1/0/0
6	F	1	1	3	-	-	1/0	1/0/0
Objektna funkcija Min Z = 44								

Može se zaključiti da rezultati u potpunosti odgovaraju zadanim uvjetima u pogledu rasporeda brodova koji se nalaze od ranije u luci i rasporedu novih brodova koji ulaze u sustav u novom planskom razdoblju. Tako brod P mora čekati dok završi brod E koji se već nalazi na vezu kako bi se oslobodile dizalice koje su mu dodijeljene. Niti jedan od novih brodova (P, R i S) ne raspoređuje se na vezove koji su već zauzeti brodovima C, E i F iz prethodnog razdoblja niti se narušava pravilo maksimalnog broja dizalica po pristanima. Brod S u ovom primjeru mora čekati 3 vremenska segmenta upravo zato jer ga nije moguće rasporediti niti na jedan od vezova koji su zauzeti brodovima koji nisu dovršili prekrcajne operacije iz prethodnog razdoblja. Ako bi se brod S smjestilo na pristan broj 2, iznad broda P, gdje bi jedino mogao biti vezan odmah po dolasku, zbog težinskog faktora pristana 5 povećala bi se vrijednost objektne funkcije za 1. S druge strane brodu R određen je scenarij 2 prema kojem su mu dodijeljene 2 dizalice uz nešto dulje vrijeme obavljanja prekrcajnog procesa. Scenarij 1, s 3 dizalice, nije optimalan za brod R jer brod C već radi s 3 dizalice, što znači da preostaju samo 2 dizalice za raspoređivanje na brod R, što pak odgovara upravo scenariju 2 kako je i riješeno.

²⁷ Masnim slovima označene su fiksirane vrijednosti varijabli odlučivanja za brodove C, E i F.

6. TESTIRANJE MODELA I ANALIZA REZULTATA

Za testiranje modela potrebno je kreirati reprezentativni skup podataka o brodovima i teretu. Podaci su kreirani na osnovu programske skripte pod nazivom „generator brodova i tereta“ koja je izrađena za potrebe ovog rada. Na temelju podataka iz generatora, heurističkim postupkom definirani su prekrcajni klasteri te utvrđen broj aktivnosti za svaki od brodova u sustavu. Proces optimizacije započinje rješavanjem QCSP modela na osnovu raspoloživih dizalica na terminalu. Po dobivenim rezultatima određuju se 3 scenarija potrebna za nastavak procesa, te se konačno rješava integralni BAP i QCAP model. Kako bi se ovaj korak mogao provesti bilo je potrebno simulirati dolaske brodova u luku, što je također učinjeno programskom skriptom temeljenoj na funkcijama slučajne razdiobe dolazaka brodova na terminal.

Cjelokupni proces zahtijevao je korištenje nekoliko softverskih alata i to:

- „R“ programski jezik – za generiranje podataka o brodovima i teretu te simulaciju dolazaka brodova;
- LINGO 12.0 – programski alat za linearno programiranje;
- AIMMS²⁸ - integrirani programski alat za matematičko modeliranje i optimizaciju, za rješavanje QCSP, BAP i QCAP modela korištenjem solvera CPLEX 12.5 i GUROBI 5.1, te za analizu rezultata;
- Microsoft Excel 2007, za grafički prikaz i analizu rezultata.

Testiranje je obavljeno na prijenosnom računalu s procesorom „Pentium Dual-Core“, CPU 2.20 GHz, s 4GB RAM memorije. U nastavku su detaljno objašnjeni procesi generiranja podataka, pojedinačni metodološki postupci te rezultati optimizacije. Na kraju poglavlja provedena je analiza dobivenih rezultata s obzirom na postavljenu znanstvenu hipotezu.

6.1. Generiranje podataka

Generiranje podataka obuhvaća sljedeće faze:

- pokretanje programske skripte „generator brodova i tereta“,

²⁸ AIMMS – *Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software*

- grupiranje pozicija s teretom u prekrcajne klastere heurističkim postupkom te određivanje konačnog broja prekrcajnih aktivnosti,
- određivanje stohastičkih vremena dolazaka brodova u luku na temelju razdiobe vjerojatnosti.

Generator brodova i tereta

Osnova za kreiranje podataka je „generator brodova i tereta“, programska skripta izrađena u R-programskom jeziku čiji je zadatak stvaranje baze podataka o brodovima s njihovim karakterističnim veličinama. Dobivene vrijednosti koriste se za testiranje modela optimizacije. Isto tako zadatak skripte je da za svaki brod odredi količinu tereta, rasporedi teret po brodskim odjeljcima (pozicijama) i odredi broj pojedinačnih prekrcajnih zadataka. Nakon što se ovi podaci generiraju, heuristikom se zadaci grupiraju u prekrcajne klastere da bi se dobio konačni broj aktivnosti. Na temelju tako generiranih podataka unose se vrijednosti parametara u QCSP model, programira se prekrcajni proces i određuje redoslijed prekrcajnih operacija²⁹.

Tablica 15: Karakteristične veličine generirane prema tipskim brodovima

	<i>Tipski brod</i>	<i>Duljina[m]</i>	<i>Kapacitet [TEU]</i>	<i>Pozicije [Bays]</i>	<i>Raspon duljina</i>	l_i	h^{up}	D_{max}
1.	CMA Agadir	139	966	B01-B26	120 - 165m	3	26	37
2.	CMA Africa IV	228	3600	B01-B52	166 – 230	4	52	69
3.	APL China	276	4832	B01-B62	231 – 276	5	62	77
4.	CMA Bizet	300	6628	B01-B72	277 – 330	6	72	92
5.	CMA Andromeda	363	11400	B01-B86	331 – 365	7	86	132

Karakteristične veličine koje je potrebno odrediti jesu: duljina broda, raspon odjeljaka (*bays*) te njihov kapacitet. Duljina broda predstavljena je numeričkim vrijednostima od 3 do 7, što odgovara broju jediničnih segmenata pristana koje brod zauzima kada je

²⁹ Generirani teret i raspored po brodskim pozicijama odnosi se na jednu luku/terminal za koju se radi optimizacija

vezan³⁰. Ostale veličine su u direktnoj korelaciji s duljinom broda, a određene su na osnovu podataka o tipskim brodovima (Tablica 15).

Algoritam koji je korišten u programskoj skripti temelji se na generiranju pseudorandom brojeva tj. slučajnih brojeva dobivenih preko random funkcije s uniformnom razdiobom vjerojatnosti. Međutim, prilikom generiranja podataka trebalo je voditi računa da se simulacija radi za male i srednje kontejnerske terminale s godišnjim prometom do 1 milijun TEU-a. Postavlja se pitanje koji se brodovi mogu očekivati na terminalu i jesu li, s obzirom na veličinu, jednako zastupljeni manji i veći kontejnerski brodovi. Na temelju empirijskih pokazatelja manja je vjerojatnost da će na ove terminale doći najveći brodovi, oni preko 330 metara. Kod manjih terminala veća je vjerojatnost dolazaka manjih brodova, dok je kod srednjih terminala ipak ta mogućnost manja. Na kraju je razdioba vjerojatnosti postavljena tako da se najvećim dijelom (30%) na terminalu mogu očekivati brodovi duljine 5 segmenata (230-276m). Oni najveći, duljine 7 segmenata, imaju najmanju vjerojatnost (10%), dok su za preostale veličine brodova vjerojatnosti podjednake (20%). Na ovaj način postignuta je određena ravnoteža zastupljenosti različitih veličina brodova, a s druge strane provjerom kapaciteta nakon što je teret generiran po brodovima, potvrđeno je da je postignuta dovoljna prekrcajna potražnja za ovu vrstu terminala.

Kada su određene karakteristične veličine – duljine brodova, raspon pozicija i njihov kapacitet, sljedeća faza je definiranje apsolutnog broja pozicija na kojima će se generirati teret. Apsolutni broj pozicija dobije se *runif* funkcijom koja pridružuje vrijednost slučajnoj varijabli *x.bay* prema uniformnoj razdiobi vjerojatnosti za interval $[a, b]$. Parametri a i b predstavljaju donju i gornju granicu vrijednosti slučajne varijable. Njihove vrijednosti određene su nakon više uzastopnih eksperimenata, gdje su rezultati najbliži stvarnom stanju dobiveni kada su $a = 8$, $b = 16$. Varijabla *x.bay* u stvari je vektorska varijabla koja određuje na koliko različitih pozicija će biti složen teret za odredišnu luku, za svaki brod u nizu. Broj elemenata vektora odgovara broju brodova u skupu.

³⁰ Duljina segmenta može se uzeti proizvoljno ovisno o obilježjima pristana i brodova koji se očekuju na terminalu. U ovom slučaju veličina segmenta odgovara duljini od 55 metara.

Nakon što je određen apsolutni broj pozicija za sve brodove u skupu, u sljedećoj se fazi moraju odrediti *bay* pozicije na kojima će biti smješteni kontejneri. Na osnovu raspona pozicija od 1 do h^{up} određuju se samo one na kojima kontejneri mogu biti fizički smješteni. Budući da se neparne i parne pozicije odnose na smještaj 20', odnosno 40' kontejnera, niz mora realno oslikavati stanje i treba eliminirati mogućnost da se kontejneri postavljaju na nepostojeće pozicije između 40-stopnih sekcija. Osim toga, potrebno je uzeti u obzir da je neke pozicije moguće koristiti dva puta, ukoliko se obavlja u istoj luci iskrcaj i ukrcaj tereta. U tom se slučaju na *bay*, na kojem su se nalazili kontejneri za iskrcaj, smještaju kontejneri za ukrcaj. Pozicije koje se koriste za smještaj tereta definira varijabla *y.bay*. Prije toga dvjema pomoćnim varijablama određene su pozicije s obzirom na mogućnost ponavljanja istih. Za određivanje *bay* pozicija na koje se smještaju kontejneri korištena je *sample* funkcija koja iz definiranog brojevnog niza (u ovom slučaju niza mogućih *bay* pozicija), slučajno odabire onoliko *bay* pozicija koliko je određeno varijablom *x.bay*. U konačnici, vektorska varijabla *y.bay* određuje pozicije na kojima će se smjestiti teret te poprima različite vrijednosti za svaki pojedini brod u skupu. Zbog ranije spomenutog razloga, pozicije se mogu ponavljati, a u kojoj mjeri će to biti omogućeno ovisi o postavljenim parametrima binomne razdiobe vjerojatnosti. U konkretnom slučaju korištena je funkcija *rbinom* s parametrima $n=1$, $size=x.bay(i)$ i $prob=0.1$.³¹

Konačno, ovime su stvoreni uvjeti za generiranje tereta i raspoređivanje po brodskim pozicijama za odredišnu luku. Algoritam simulira krcanje broda na način da ovisno o raspodjeli vjerojatnosti (slučajna varijabla *z*) svaki *bay* krca punim kapacitetom ili koristi dio kapaciteta u ovisnosti o vrijednosti slučajne varijable. Broj kontejnera po *bay* pozicijama određen je vektorskom varijablom *q.bay*, a ukupni teret na brodu skalarnom varijablom *total.brod*. Raspored tereta dobiven simulacijom predstavlja u osnovi plan iskrcaja/ukrcaja i na temelju njega se utvrđuju zadaci i redoslijed operacija³².

Kompletna skripta prikazana je u privitku 1 ovog rada. Generirani podaci prikazani su u privitku 2.

³¹ Detaljnije o tome (Jones, Maillardet & Robinson, 2009)

³² Plan ukrcaja/iskrcaja dobiven generatorom podataka o brodovima i teretu ovdje se razmatra i koristi isključivo u funkciji testiranja integriranog modela optimizacije i temeljen je na slučajnim vrijednostima. Stvarni plan sam za sebe predstavlja optimizacijski problem koji je izvan opsega ovog rada, a isti mora uzeti u obzir ograničenja kojima se osigurava stabilitet broda i maritimna sigurnost.

Određivanje broja zadataka

Zadaci se određuju na temelju raspodjele tereta po brodskim odjeljcima. U načelu svaki odjeljak ili pozicija na kojoj je smješten teret može biti jedan zadatak. Takva selektivnost međutim, nije potrebna jer ne bi doprinijela rješavanju problema budući da je paralelni rad dizalica na brodu determiniran sigurnosnim razmakom među njima. Praktično je stoga grupirati pozicije u prekrcajni klaster. Tako grupirani klaster predstavlja jednu aktivnost. Za grupiranje pozicija korištena je sljedeća heuristika:

- sve parne pozicije (40' odjeljci) i susjedne neparne pozicije na 40' odjeljcima grupiraju se zajedno, a isto vrijedi i za neparne pozicije na 40' odjeljcima;
- pozicije na kojima je broj kontejnera manji od 7 pripajaju se susjednim pozicijama;
- ako je razlika između krajnjih pozicija u grupi manja od raspona portala (d) i razmak između krajnjih pozicija i prve sljedeće pozicije u nizu veći od d , sve pozicije koje se nalaze između krajnjih pozicija predstavljaju jedan klaster;
- ako je razlika između krajnjih pozicija u grupi manja od raspona portala (d), a razmak između krajnjih pozicija i prve sljedeće pozicije u nizu manji od d , tada se otpuštaju pozicije iz grupe, tako da se omogući paralelni rad dizalica.

Primjer na slici 32 najbolje opisuje spomenutu heuristiku. Pozicije 45 i 47 grupirane su zajedno jer se nalaze na 40' odjeljku broj 46. Slično, 50-51 su grupirane zajedno kao i 58-59. Kod ovog potonjeg slučaja imamo situaciju kada se isti *bay* koristi za različite prekrcajne operacije (iskrcaj/ukrcaj). Sljedeći slučaj odnosi se na kreiranje prekrcajnog klastera kojemu je donja granica *bay* 10, a gornja granica bay 19. Očito prvi sljedeći *bay* je onaj pod brojem 39. Ako d iznosi 10 pozicija (vidi tablicu 6), onda je jasno da je razmak od 20 pozicija sasvim dovoljan za paralelni rad dviju dizalica. S druge strane razlika krajnjih pozicija klastera iznosi 9 pozicija, što je manje od sigurnosnog razmaka potrebnog za paralelni rad dviju dizalica, stoga je grupiranje u klaster opravdano.

Vsl	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bay	10	14	14	17	18	19	39	42	45	47	50	51	58	58	59
TEU	77	65	77	77	77	57	10	77	30	19	77	36	77	66	77

Slika 32: Podjela pozicija na klastere

U primjeru na slici 32 za brod pod brojem 43 stvorena su četiri klastera i dvije samostalne pozicije. Oni zajedno predstavljaju 6 pojedinačnih prekrcajnih zadataka kojima je pridružena odgovarajuća količina kontejnera. Na sličan način, koristeći navedenu heuristiku, utvrđene su aktivnosti za sve ostale brodove.

Simulacija dolazaka brodova

Proces dolazaka brodova u luku može se okarakterizirati kao slučajan događaj kod kojega je broj brodova koji dnevno dolaze u luku slučajna varijabla čija vrijednost odgovara Poissonovoj razdiobi vjerojatnosti. Iako se u stranoj literaturi u odnosu na kontejnerske brodove i kontejnerske terminale spominje i Erlangova razdioba (United Nations Conference on Trade and Development, 1985), u domaćoj literaturi prevladavaju radovi u kojima se analitika temelji na Poissonovoj razdiobi vjerojatnosti (Dundović & Zenzerović, 2000; Kos, Hess & Hess, 2006; Zenzerović, 2005; Zenzerović & Vilke, 2011). Razlika se očituje u određenoj pravilnosti dolazaka kontejnerskih brodova koji obavljaju linijski prijevoz po plovidbenom redu.

Autor se u ovom radu priklonio teoriji iz domaće literature, pa su dolasci brodova na kontejnerski terminal simulirani po Poissonovoj razdiobi čija je gustoća određena izrazom:

$$P_n = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, \quad n = 1, 2, \dots \quad (6.1)$$

Za proces optimizacije, međutim, potreban je podatak o vremenima dolazaka brodova. To znači da treba utvrditi razdiobu vremenskih intervala između dva uzastopna dolaska. Iz teorije vjerojatnosti poznato je da ako je broj nastupa promatranog događaja u intervalu $(0, t)$ slučajna varijabla distribuirana po Poissonovoj razdiobi $P(\lambda t)$, onda je vrijeme koje protekne između dva nastupa promatranog događaja slučajna varijabla distribuirana po eksponencijalnoj razdiobi $Exp(\lambda)$. Ova međuovisnost omogućava da se iz prosječnog broja dnevnih dolazaka brodova u luku λ , odrede intervali dolazaka, odnosno vrijeme dolaska pojedinog broda. Razdiobu vremenskih intervala opisuje eksponencijalna gustoća razdiobe prema izrazu:

$$Exp(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad t \geq 0 \quad (6.2)$$

gdje je λ prosječna frekvencija dolazaka (broj brodova koji dnevno dolazi u luku), a t prosječno vrijeme između dva uzastopna dolaska pri čemu vrijedi $t = 1 / \lambda$.

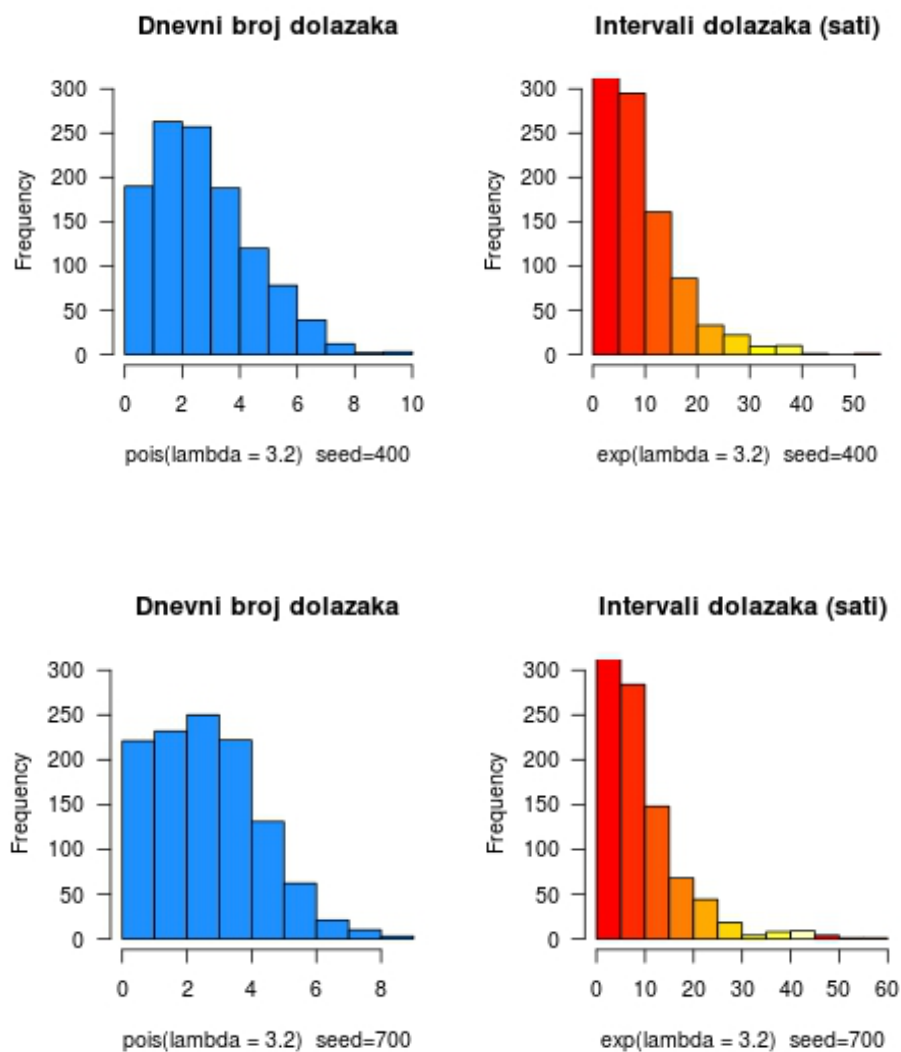
Tablica 16: Odnos frekvencije dolazaka brodova i godišnjeg prometa terminala

λ	2	3	3.2	3.3	3.5	4
n	720	1080	1152	1188	1260	1440
Q[000TEU/god]	580	875.2	930.1	966.9	1027	1179.2

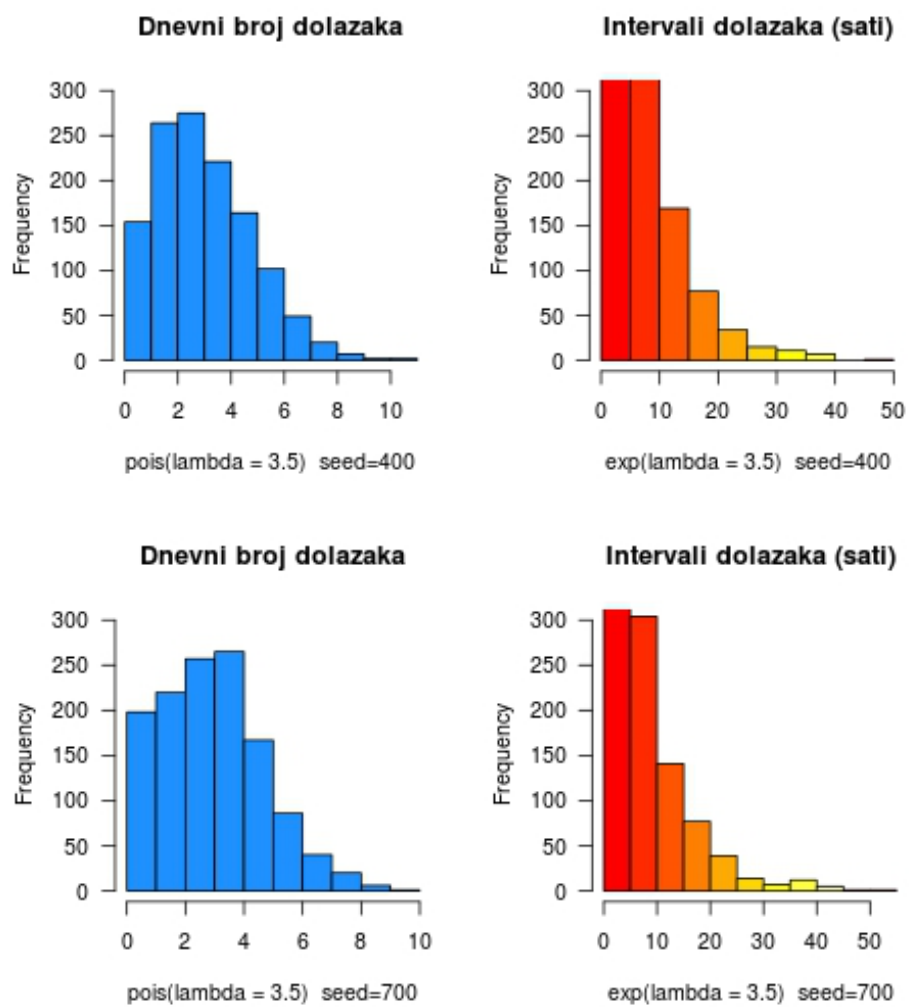
Podaci o brodovima koji su generirani programskom skriptom – generatorom brodova i tereta, uključuju i ukupnu količinu tereta za odabrani skup brodova. Ovaj podatak se koristi za postavljanje prosječne frekvencije dolazaka – λ . Naime, potrebno je dokazati da je model prihvatljiv za male i srednje kontejnerske terminale, što znači da se na terminalu ostvari promet do 1 milijun TEU-a godišnje (Tablica 16).

Prema podacima dobivenim simulacijom, za dostizanje granice od 1 milijun TEU-a potrebno je oko 1200 ticanja brodova ($n=1200$) pri čemu je frekvencija dolazaka λ između 3.2 i 3.5.

Navedene vrijednosti parametra λ korištene su za dobivanje distribucije intervala dolazaka, odnosno za dobivanje vremena dolaska za svaki brod iz skupa brodova V . Skripta za simulaciju dolazaka brodova i raspodjelu vremena dolazaka na terminal prikazana je u privitku 1. Skripta generira pseudorandom brojeve pozivom funkcije *rpois*(n, λ) i *rexp*($n, rate$) . Grafički prikaz funkcije razdiobe vremena dolazaka brodova prikazuju slike 33 i 34, za različite vrijednosti parametra λ i sjemena (*seed*=400 i *seed*=700). Analitički prikaz rezultata nalazi se u privitku 2.



Slika 33: Frekvencija dolazaka brodova dobivena simulacijom za $\lambda=3.2$



Slika 34: Frekvencija dolazaka brodova dobivena simulacijom za $\lambda=3.5$

6.2. Rezultati dobiveni rješavanjem QCSP modela

Programiranje modela zahtijevalo je korištenje alata za linearno programiranje i eksperimentiranje s nekoliko algoritama – solvera, posebno prilagođenih za cjelobrojni tip problema. Prvi alat koji je korišten, LINGO 12.0 programski jezik, pokazao se inferiornijim u smislu vremena rješavanja QCSP modela od AIMMS sustava. Integrirani solveri s kojima su se izvršavali modeli uključuju: CPLEX 12.5, GUROBI 5.1 te MOSEK 6.0. Od spomenutih, kao najprikladniji za QCSP problem izabran je CPLEX. Dobiveni rezultati sa scenarijima trajanja prekrcajnog procesa, u ovisnosti o broju pridruženih dizalica za oba QCSP modela, nalaze se u privitku 2. Parcijalni rezultati kojima se utvrđuje redoslijed rada dizalica po pojedinom brodu za svaki od scenarija zbog opsežnosti nisu prikazani u tekstu, već su dostupni na elektroničkom mediju. Neka od parcijalnih rješenja prikazana su u nastavku.

Problem redoslijeda rada obalnih dizalica rješavan je tako da su se za svaki brod koristila oba modela: model s dvosmjernim kretanjem dizalica bez dijeljenja zadatka i model s jednosmjernim kretanjem i dijeljenjem zadatka. Kako je konačan cilj optimizacija raspodjele vezova i obalnih dizalica na kontejnerskim terminalima s nezavisnim pristanima, potrebno je prethodno odrediti broj dizalica kojima pojedini pristan raspolaže. Testiranje je provedeno s dva pristana, sa po 5 dizalica na svakom pristanu. To je realna aproksimacija za zadanu veličinu terminala s podjednakim tehničko-tehnološkim uvjetima za prihvrat brodova na oba pristana. Treba napomenuti da model nema ograničenja po tom pitanju i da je broj dizalica parametarska veličina koja je promjenljiva.

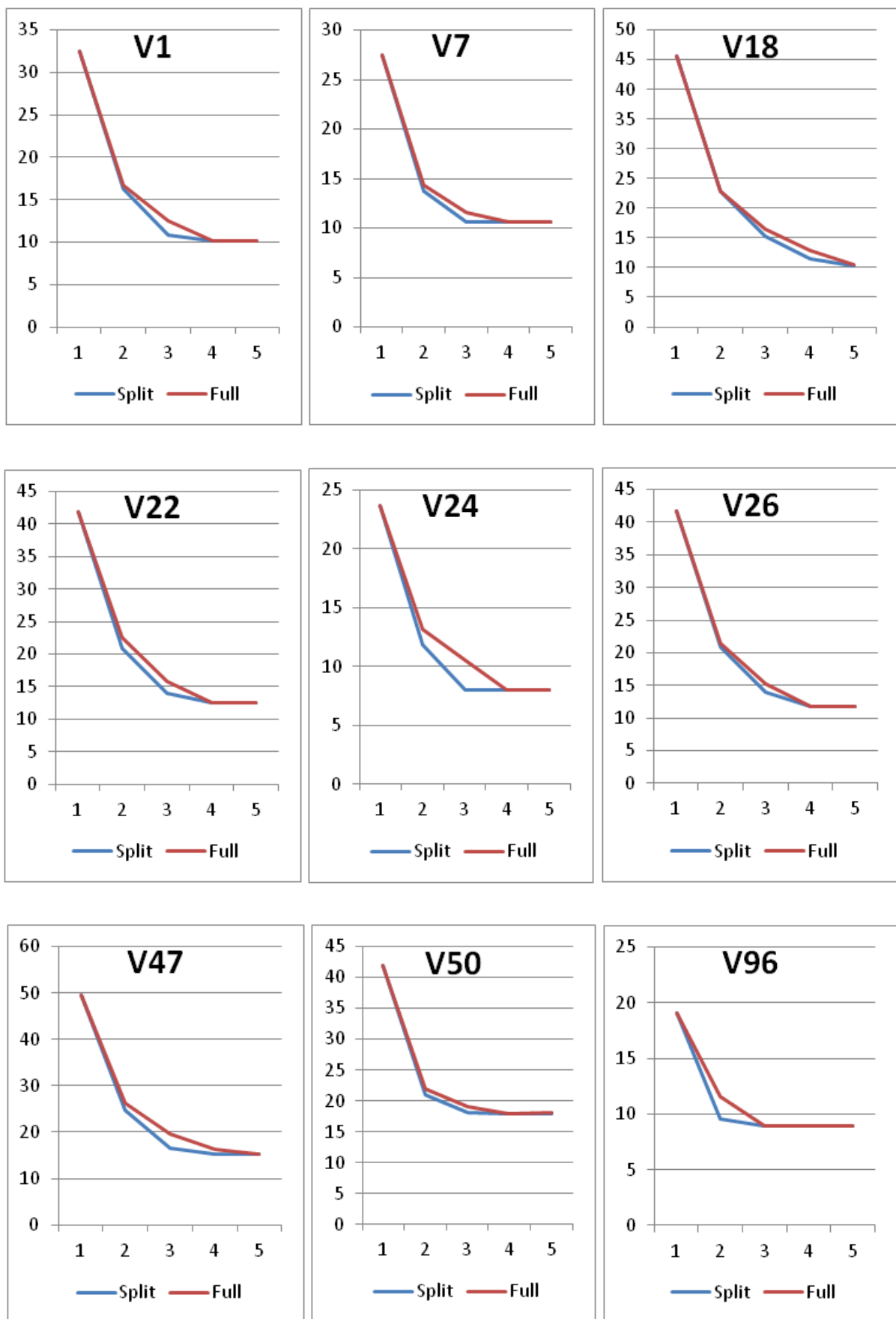
U model se moraju ubaciti podaci o pozicijama i broju kontejnera po pojedinačnim zadacima, tj. prekrcajna potražnja D_i te prosječno trajanje radnog ciklusa N_c , da bi se dobio potrebni broj dizalica sati m_i , a prema izrazu (4.23). Za broj ciklusa empirijski je postavljena vrijednost 27 TEU/h. Ova veličina je ulazni parametar i ne utječe na funkcionalnost optimizacijskog procesa.

Za svaki brod iz uzorka od 100 brodova treba izračunati trajanje prekrcajnog procesa u ovisnosti o broju dizalica koje mu se pridružuju. U konkretnom slučaju to znači maksimalno 5 scenarija, odnosno 10 ako se uzme u obzir da se koriste oba modela. Od toga broja uzimaju se 3 najbolja scenarija ili manje, ukoliko se povećanjem broja scenarija (broja dizalica) ne postiže poboljšanje rješenja. Dobiveni rezultati za prvih 30 brodova prikazani su u tablici 17. Tamo gdje pojedina opcija ne donosi poboljšanje, stavljena je oznaka M, kako bi se eliminirala mogućnost da se ta opcija uzima u obzir u sljedećem koraku optimizacije.

Tablica 17: Scenariji dobiveni rješenjem QCSP problema za 30 brodova u sustavu

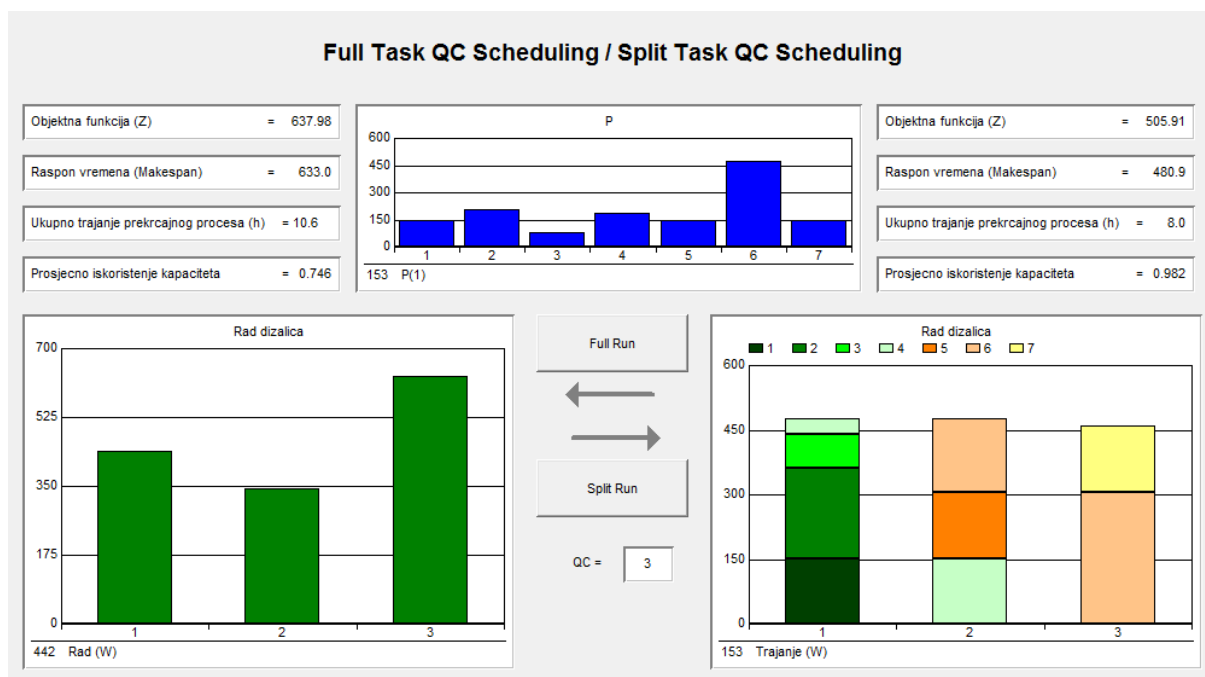
n	<i>Broj dizalica</i>			<i>Trajanje prekrcaja</i>		
	<i>opt1</i>	<i>opt2</i>	<i>opt3</i>	<i>opt1</i>	<i>opt2</i>	<i>opt3</i>
1	2	3	4	16	11	10
2	1	2	3	43	22	16
3	2	3	4	24	16	14
4	1	2	M	9	7	M
5	1	2	M	24	13	M
6	1	2	3	22	11	9
7	1	2	3	28	14	11
8	1	2	3	22	11	10
9	2	3	4	15	10	9
10	1	2	3	46	23	19
11	1	2	M	20	12	M
12	1	M	M	8	M	M
13	1	2	3	27	14	10
14	1	2	M	13	10	M
15	2	3	4	32	21	19
16	2	3	4	28	19	17
17	1	2	3	19	10	7
18	2	3	4	23	15	12
19	1	2	3	29	15	14
20	3	4	5	25	19	17
21	2	3	4	23	15	14
22	2	3	4	21	14	13
23	2	3	4	12	8	7
24	1	2	3	24	12	8
25	1	2	3	33	17	13
26	2	3	4	21	14	12
27	2	3	M	26	20	M
28	2	3	M	22	16	M
29	1	2	3	19	10	8
30	1	2	3	25	13	10

Raspored tereta po brodskim pozicijama i odabir pozicija utječu na mogućnost paralelnog rada više dizalica. Zato nije opravdano koristiti ili rezervirati više dizalica jer se time ne utječe na ukupno trajanje procesa. Slika 35 prikazuje trajanje procesa u ovisnosti o broju pridruženih dizalica kod oba modela za odabrane brodove. Tako, primjerice, brodu V96 nema smisla dodijeliti više od 3 dizalice ni u jednoj varijanti jer krivulja trajanja prekrcajnog procesa ostaje konstantna za vrijednosti veće od 3. Isto tako u svim slučajevima sa slike pridruživanje druge dizalice uvelike smanjuje trajanje procesa.



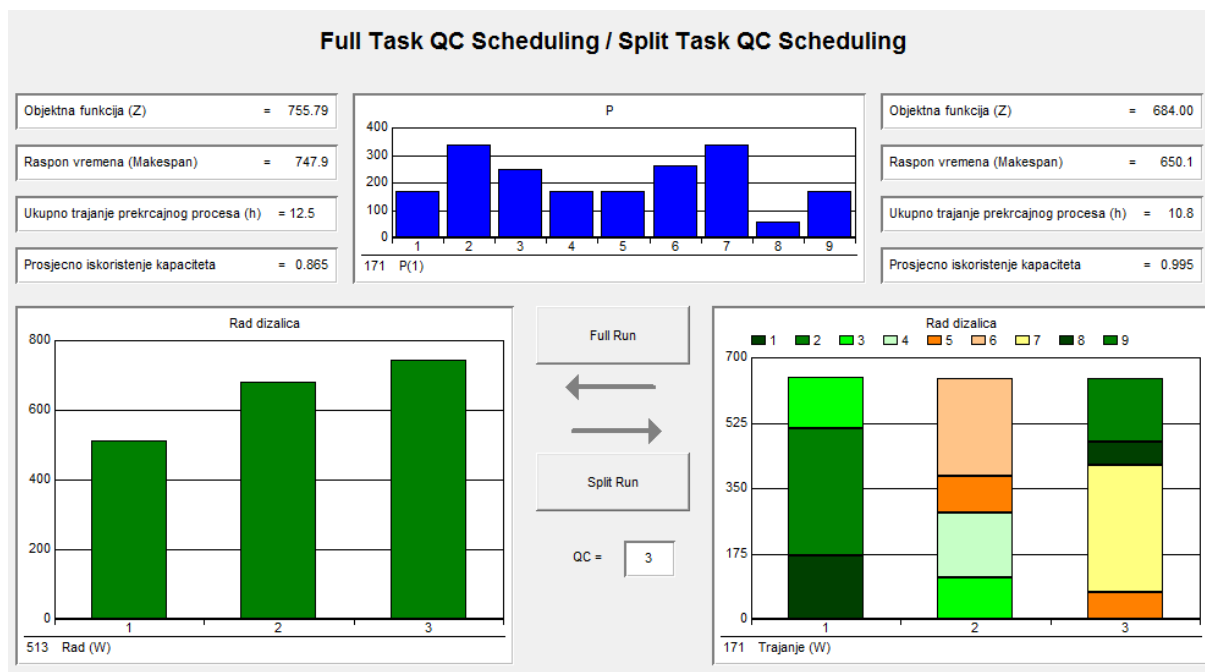
Slika 35: Učinak dijeljenja zadatka i broja dizalica na trajanje procesa

Zanimljiva je međusobna usporedba dviju vrsta modela. U većini slučajeva ne postoji značajnija razlika u rasporedu vremena i konačnom rezultatu između modela s dijeljenjem zadatka (*split*) i modela bez dijeljenja zadatka (*full*). Na slikama 36, 37 i 38 izdvojeni su slučajevi kada je ta razlika u većoj mjeri izražena. Osobito je uočljiva razlika kod brodova V24 i V47. U oba slučaja značajno bolji rezultat se dobije kod dijeljenja aktivnosti.

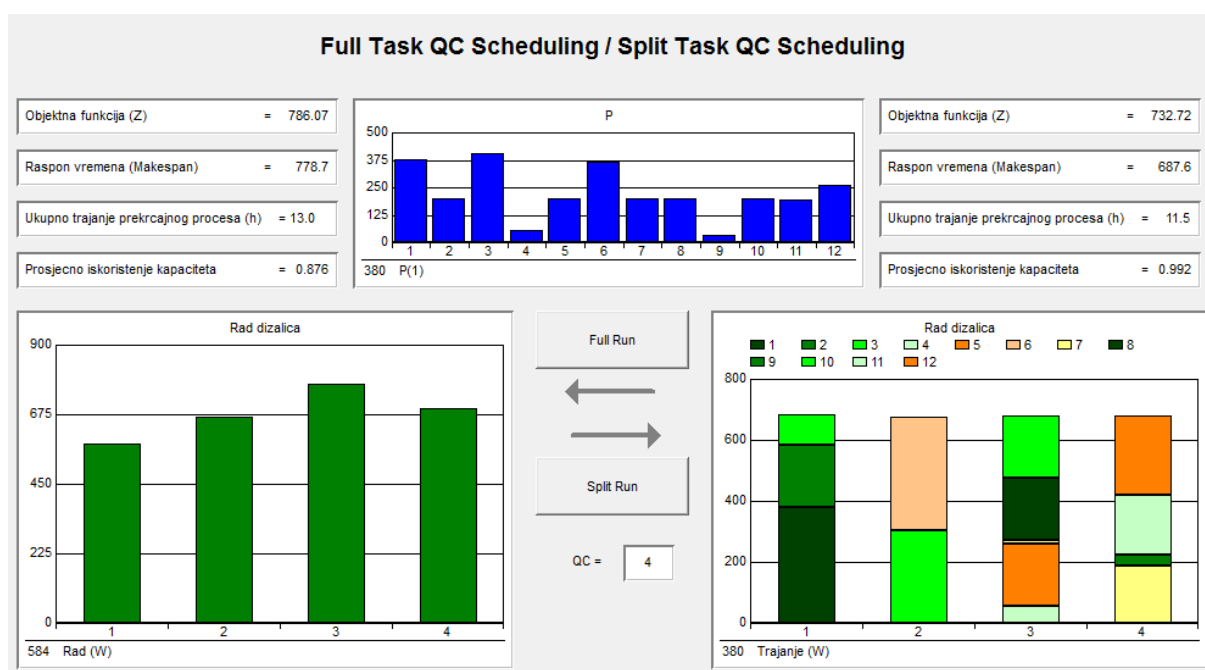


Slika 36: Rješenje QCSP modela za brod V24 s 3 dizalice

Na slikama je uočljivo još jedno obilježje modela s dijeljenim zadacima, a to je izrazito bolje iskorištenje kapaciteta dizalica U_{iq} . Grafikoni na slikama prikazuju vrijeme rada dizalica na prekrcajnom procesu, u donjem lijevom kutu za model bez dijeljenja zadataka, a u donjem desnom kutu za model s dijeljenim zadacima. Uočava se da su na grafikonima koji prikazuju proces s dijeljenim zadacima opterećenja dizalica ravnomjerno raspoređena. Vrijednosti iskorištenja kapaciteta iznose za brod V24 u prvom slučaju $U_{24,3} = 0.746$, a u drugom slučaju $U_{24,3} = 0.982$. Na odabranim brodovima V1 i V18, također, izrazito je bolji rezultat prosječnog iskorištenja kapaciteta postignut kod modela s dijeljenim zadacima. Na preostalim brodovima ovaj rezultat je bolji u većoj ili manjoj mjeri.



Slika 37: Rješenje QCSP modela za brod V1 s 3 dizalice



Slika 38: Rješenje QCSP modela za brod V18 s 4 dizalice

Iz grafikona je moguće vidjeti na koji način su raspoređene operacije u odnosu na raspoložive dizalice. Na slici 36 na grafikonu s dijeljenim zadacima može se zapaziti da dizalica 1 radi na četiri zadatka, od kojih jednog dijeli (krajnji gornji segment) s dizalicom broj 2 (krajnji donji segment). Isto tako dizalice broj 2 i 3 dijele jedan zadatak, onaj najdulji.



Redoslijed prekrcajnih operacija

	Teu	P	1				2				3			
			Pocetak (S)	Trajanje (W)	Kraj (C)	X	Pocetak (S)	Trajanje (W)	Kraj (C)	X	Pocetak (S)	Trajanje (W)	Kraj (C)	X
1	69	153		153	153	x								
2	94	209	154	209	363	x								
3	36	80	363	80	443	x								
4	86	191	444	37	481	x								
5	69	153					155	153	308	x				
6	215	478					310	171	481	x				
7	69	153									309	307 153	307 462	x x

Slika 39: Rezultat modela s dijeljenim zadacima za brod V24 u varijanti s 3 dizalice.

Uvidom u analitički dio to se može potvrditi (Slika 39). Varijabla X_{ik} pokazuje koji zadaci su pridruženi određenoj dizalici. Prva 3 zadatka rade se s dizalicom broj 1, četvrti zadatak dijele dizalice 1 i 2, peti zadatak radi dizalica broj 2 samostalno, šesti zadatak, koji je ujedno najdulji, dijele dizalice 2 i 3, dok sedmi zadatak obavlja samostalno dizalica broj 3. Za svaku dizalicu određeno je vrijeme početka i završetka prekrcaja po pridruženim aktivnostima. Na ovaj način dobiven je kompletan redoslijed prekrcajnih operacija i to za svaki od mogućih scenarija s obzirom na raspoloživost resursa.

Po dobivanju kompletnog seta rezultata, za svaki od 100 brodova napravljena je selekcija triju najboljih varijanti. Kod nekih brodova postavljena su ograničenja za treću varijantu, ako raspored tereta nije opravdavao izbor više od dviju, dok je u jednom slučaju postavljena samo jedna varijanta. Odabrane varijante prikazane su osjenčano u tablici u pravitku 2.

6.3. Rješavanje integralnog BAP i QCAP modela za nezavisne pristane

Nakon što su generirani podaci o brodovima, simulirani njihovi dolasci te dobiveni scenariji trajanja prekrcajnog procesa rješavanjem QCSP modela, stvoreni su uvjeti za testiranje integralnog modela za raspoređivanje brodova i dizalica na terminalima s nezavisnim pristanima. Dobivena baza podataka sa 100 brodova sadrži: podatke o duljini brodova, teretu, očekivanom trajanju prekrcajnog procesa ovisno o broju pridruženih dizalica za tri scenarija te podatke o vremenima dolaska brodova na terminal za četiri varijante razdiobe slučajne varijable.

Ukratko o ostalim parametrima koji su postavljeni u model i aproksimacijama koje su učinjene:

- testiranje je rađeno s dva nezavisna pristana u sustavu kontejnerskog terminala,
- duljine pristana postavljene su jednako za oba pristana na vrijednost 15 segmenata, što odgovara duljini od 825 metara po pristanu (1 segment = 55 m),
- broj raspoloživih dizalica po pristanu postavljen je na 5, tehničko-tehnološka svojstva dizalica su jednaka,
- vrijeme prilaženja i pripremno vrijeme za operacije sadržani su u vremenu dolaska/priveza, a završno vrijeme i manevar odlaska u vremenu odlaska i nisu pojedinačno razmatrani,
- svi vezovi su dostupni svim brodovima, ne postoje fizička ograničenja u smislu dubine mora niti druga tehnička ograničenja,
- sigurnosne udaljenosti između brodova na vezu sadržane su u duljini pristana i nisu pojedinačno razmatrane,
- težinski faktor pristana postavljen je na 1 za sve brodove, što znači da nema preferencije pristana od strane broda/brodara,
- težinski koeficijenti čekanja broda na slobodni vez i težinski koeficijent ubrzanja broda radi ranijeg dolaska postavljeni su na jednaku vrijednost i bez preferencije u odnosu na brod/brodara,

- prekrcajni proces se odvija kontinuirano, bez prekida, *buffer* vremenske zone nisu postavljene,
- vremenski segmenti mogu se promatrati kao intervali od jednog sata.

Postavlja se pitanje: koji vremenski horizont planiranja odabrati? Kako su vremena dolaska brodova slučajno raspoređena, kada bi se uzeo fiksni interval, tada bi broj brodova u sustavu bio promjenljiv. Alternativni pristup je da se horizont planiranja ne fiksira tj. da bude promjenljiv, a da se uzme uvijek isti broj brodova u sustavu. S obzirom na svrhu testiranja, odabrana je potonja varijanta. Potrebno je dokazati da su rješenja moguća i da je optimalno rješenje moguće dobiti u razumnom vremenu. Fiksiranjem broja brodova težina problema manje ovisi o distribuciji dolazaka brodova i problemi su ujednačeniji s obzirom na zahtjevnost optimizacijske funkcije. Na taj način moguće je provesti analizu rezultata i očekivane funkcionalnosti optimizacijske funkcije s obzirom na moguće horizonte planiranja, uvažavajući specifičnosti malih i srednjih kontejnerskih terminala.

Model je testiran na grupama od po 10, 15 i 20 brodova. Kreirano je 10 grupa po 10 brodova, 6 grupa po 15 brodova i 5 grupa sa po 20 brodova. Za svaku od četiriju ranije utvrđenih varijanti slučajne razdiobe vremena dolazaka brodova izvršen je zasebni proračun optimizacijske funkcije. To znači da su po dva eksperimenta napravljena za $\lambda=3.2$ i $\lambda=3.5$, u ovisnosti o vrijednosti sjemena pseudorandom funkcije (*seed*=400 i *seed*=700). Treba naglasiti da je, iako su dolasci slučajno raspoređeni, redoslijed dolazaka sukcesivan i prati redoslijed generiranih brodova.

Prilikom grupiranja brodova u posebnim stupcima označeni su intervali dolazaka prema apsolutnim vrijednostima intervala i u odnosu na početno vremensko razdoblje. Početno razdoblje računa se tako da se od apsolutnog vremena oduzmu puni dani iz prethodnih razdoblja. Na taj način dobiva se uvid u promjene horizonta planiranja.

Programerski dio odrađen je u AIMMS programskom okruženju, a za testiranje su korištena dva solvera: CPLEX 12.5 i GUROBI 5.1. S obzirom na kompleksnost problema postavljeno je ograničenje vremena rješavanja na 150 minuta. Dobiveni rezultati optimizacijske funkcije Z u odnosu na vrijeme rješavanje problema, prikazani su u tablicama 18-21. Ovaj prikaz važan je zbog potvrde sposobnosti modela da odabranim metodama linearnog i cjelobrojnog programiranja rješava postavljene probleme.

Tablica 18: Rezultati integriranog modela optimizacije za $\lambda=3.2$, seed=400

Broj brodova N=10, seed = 400, $\lambda = 3.2$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	N	a	a(T)	min(a)	max(a)	Teret	Z	Vrijeme (min)	Gap	Z	Vrijeme (min)	Gap
1.	1-10	12-71	12-71	12	71	8185	133	1.20	-	133	0.22	-
2.	11-20	76-118	4-46	4	46	9597	150	11.11	-	150	10.42	-
3.	21-30	140-218	20-98	20	98	9403	146	4.68	-	146	1.34	-
4.	31-40	222-277	6-61	6	61	8746	127	0.05	-	127	0.04	-
5.	41-50	284-341	20-77	20	77	6710	123	0.11	-	123	0.15	-
6.	51-60	342-414	6-78	6	78	7227	112	0.02	-	112	0.02	-
7.	61-70	417-536	9-128	9	128	6698	122	0.03	-	122	0.02	-
8.	71-80	544-627	16-99	16	99	9490	141	0.08	-	141	0.05	-
9.	81-90	632-731	8-107	8	107	8527	144	0.58	-	144	0.14	-
10.	91-100	743-825	23-105	23	105	7679	129	0.48	-	129	0.13	-
Broj brodova N=15, seed = 400, $\lambda = 3.2$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	N	a	a(T)	min(a)	max(a)	Teret	Z	Vrijeme (min)	Gap	Z	Vrijeme (min)	Gap
1.	1-15	12-96	12-96	12	96	11732	197	1.78	-	197	0.37	-
2.	16-30	98-218	2-122	2	122	15453	224	150.00	2.7%	224	30.79	-
3.	31-45	222-314	6-98	6	98	11367	185	0.14	-	185	0.06	-
4.	46-60	316-414	4-102	4	102	11316	178	0.22	-	178	0.22	-
5.	61-75	417-589	9-181	9	181	11631	199	0.07	-	199	0.03	-
6.	76-90	603-731	3-131	3	131	13084	211	5.51	-	211	3.37	-
Broj brodova N=20, seed = 400, $\lambda = 3.2$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	N	a	a(T)	min(a)	max(a)	Teret	Z	Vrijeme (min)	Gap	Z	Vrijeme (min)	Gap
1.	1-20	12-118	12-118	12	118	17782	283	150.00	2.8%	283	68.12	-
2.	21-40	140-277	20-157	20	157	18149	273	128.97	-	273	11.61	-
3.	41-60	284-414	20-150	20	150	13937	237	0.70	-	237	0.24	-
4.	61-80	417-627	9-219	9	219	16188	263	0.21	-	263	0.25	-
5.	81-100	632-825	8-201	8	201	16206	270	0.52	-	270	0.65	-

Tablica 19: Rezultati integriranog modela optimizacije za $\lambda=3.5$, seed=400

Broj brodova N=10, seed = 400, $\lambda = 3.5$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	N	a	a(T)	min(a)	max(a)	Teret	Z	Vrijeme (min)	Gap	Z	Vrijeme (min)	Gap
1.	1-10	11-65	11-65	11	65	8185	135	1,60	-	135	0,94	-
2.	11-20	69-107	21-59	21	59	9597	154	21,20	-	154	36,49	-
3.	21-30	127-199	7-79	7	79	9403	146	16,69	-	146	21,53	-
4.	31-40	202-250	10-58	10	58	8746	134	1,94	-	134	0,62	-
5.	41-50	256-307	16-67	16	67	6710	125	1,01	-	125	0,16	-
6.	51-60	308-372	20-84	20	84	7227	112	0,02	-	112	0,02	-
7.	61-70	375-482	15-122	15	122	6698	122	0,02	-	122	0,01	-
8.	71-80	489-566	9-86	9	86	9490	142	0,09	-	142	0,10	-
9.	81-90	570-662	18-110	18	110	8527	144	0,36	-	144	0,13	-
10.	91-100	673-750	1-78	1	78	7679	126	0,09	-	126	0,03	-
Broj brodova N=15, seed = 400, $\lambda = 3.5$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	N	a	a(T)	min(a)	max(a)	Teret	Z	Vrijeme (min)	Gap	Z	Vrijeme (min)	Gap
1.	1-15	11-88	11-88	11	88	11732	199	9,26	-	199	0,79	-
2.	16-30	89-199	17-127	17	127	15453	227	150,00	4,3%	227	150,00	4,4%
3.	31-45	202-282	10-90	10	90	11367	192	6,62	-	192	1,78	-
4.	46-60	284-372	20-108	20	108	11316	179	0,58	-	179	0,16	-
5.	61-75	375-531	15-171	15	171	11631	199	7,60	-	199	0,03	-
6.	76-90	544-662	16-134	16	134	13084	212	4,10	-	212	2,75	-
Broj brodova N=20, seed = 400, $\lambda = 3.5$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	N	a	a(T)	min(a)	max(a)	Teret	Z	Vrijeme (min)	Gap	Z	Vrijeme (min)	Gap
1.	1-20	11-107	11-107	11	107	17782	290	150,00	4,0%	290	150,00	4,8%
2.	21-40	127-250	7-130	7	130	18149	280	150,00	3,5%	280	130,71	-
3.	41-60	256-372	16-132	16	132	13937	240	8,81	-	240	4,04	-
4.	61-80	375-566	15-206	15	206	16188	264	0,23	-	264	0,25	-
5.	81-100	570-750	18-198	18	198	16206	270	1,90	-	270	0,51	-

Tablica 20: Rezultati integriranog modela optimizacije za $\lambda=3.2$, seed=700

Broj brodova N=10, seed = 700, $\lambda = 3.2$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	<i>N</i>	<i>a</i>	<i>a(T)</i>	<i>min(a)</i>	<i>max(a)</i>	<i>Teret</i>	<i>Z</i>	<i>Vrijeme (min)</i>	<i>Gap</i>	<i>Z</i>	<i>Vrijeme (min)</i>	<i>Gap</i>
1.	1-10	6-66	6-66	6	66	8185	129	0,06	-	129	0,04	-
2.	11-20	77-151	5-79	5	79	9597	138	0,10	-	138	0,07	-
3.	21-30	157-207	13-63	13	63	9403	147	4,71	-	147	5,39	-
4.	31-40	209-271	17-79	17	79	8746	129	0,17	-	129	0,11	-
5.	41-50	272-327	8-63	8	63	6710	122	0,03	-	122	0,03	-
6.	51-60	328-398	16-86	16	86	7227	114	0,06	-	114	0,05	-
7.	61-70	419-488	11-80	11	80	6698	122	0,02	-	122	0,02	-
8.	71-80	488-638	8-158	8	158	9490	145	0,52	-	145	0,19	-
9.	81-90	639-706	15-82	15	82	8527	144	0,10	-	144	0,08	-
10.	91-100	713-771	17-75	17	75	7679	126	0,07	-	126	0,06	-
Broj brodova N=15, seed = 700, $\lambda = 3.2$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	<i>N</i>	<i>a</i>	<i>a(T)</i>	<i>min(a)</i>	<i>max(a)</i>	<i>Teret</i>	<i>Z</i>	<i>Vrijeme (min)</i>	<i>Gap</i>	<i>Z</i>	<i>Vrijeme (min)</i>	<i>Gap</i>
1.	1-15	6-99	6-99	6	99	11732	193	0,20	-	193	0,09	-
2.	16-30	101-207	5-111	5	111	15453	221	20,03	-	221	8,35	-
3.	31-45	209-311	17-119	17	119	11367	189	1,67	-	189	0,39	-
4.	46-60	311-398	23-110	23	110	11316	178	0,27	-	178	0,40	-
5.	61-75	419-603	11-195	11	195	11631	199	0,11	-	199	0,10	-
6.	76-90	604-706	4-106	4	106	13084	210	0,83	-	210	0,32	-
Broj brodova N=20, seed = 700, $\lambda = 3.2$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	<i>N</i>	<i>a</i>	<i>a(T)</i>	<i>min(a)</i>	<i>max(a)</i>	<i>Teret</i>	<i>Z</i>	<i>Vrijeme (min)</i>	<i>Gap</i>	<i>Z</i>	<i>Vrijeme (min)</i>	<i>Gap</i>
1.	1-20	6-151	6-151	6	151	17782	267	1,86	-	267	0,44	-
2.	21-40	157-271	13-127	13	127	18149	348	150,00	22,4%	383	150,00	28,5%
3.	41-60	272-398	8-134	8	134	13937	236	0,50	-	236	0,62	-
4.	61-80	419-638	11-230	11	230	16188	267	1,45	-	267	0,93	-
5.	81-100	639-771	15-147	15	147	16206	281	49,48	-	281	11,90	-

Tablica 21: Rezultati integriranog modela optimizacije za $\lambda=3.5$, seed=700

Broj brodova N=10, seed = 700, $\lambda = 3.5$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	N	a	a(T)	min(a)	max(a)	Teret	Z	Vrijeme (min)	Gap	Z	Vrijeme (min)	Gap
1.	1-10	6-62	6-62	6	62	8185	129	0,07	-	129	0,04	-
2.	11-20	72-137	24-89	24	89	9597	141	0,22	-	141	0,28	-
3.	21-30	142-188	22-68	22	68	9403	147	3,14	-	147	8,33	-
4.	31-40	190-248	22-80	22	80	8746	129	0,49	-	129	0,09	-
5.	41-50	249-300	9-60	9	60	6710	123	0,09	-	123	0,11	-
6.	51-60	304-364	13-76	13	76	7227	114	0,05	-	114	0,05	-
7.	61-70	384-448	24-88	24	88	6698	122	0,03	-	122	0,02	-
8.	71-80	448-585	16-153	16	153	9490	145	0,22	-	145	0,32	-
9.	81-90	586-645	10-69	10	69	8527	145	0,06	-	145	0,11	-
10.	91-100	651-704	3-56	3	56	7679	128	0,32	-	128	0,15	-
Broj brodova N=15, seed = 700, $\lambda = 3.5$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	N	a	a(T)	min(a)	max(a)	Teret	Z	Vrijeme (min)	Gap	Z	Vrijeme (min)	Gap
1.	1-15	6-91	6-91	6	91	11732	193	0,14	-	193	0,11	-
2.	16-30	93-188	21-116	21	116	15453	224	150,00	2,4%	224	27,81	-
3.	31-45	190-285	22-117	22	117	11367	189	1,32	-	189	0,62	-
4.	46-60	285-364	21-100	21	100	11316	180	1,86	-	180	0,72	-
5.	61-75	384-553	24-193	24	193	11631	199	0,08	-	199	0,09	-
6.	76-90	554-645	2-93	2	93	13084	211	4,45	-	211	0,74	-
Broj brodova N=20, seed = 700, $\lambda = 3.5$												
							CPLEX 12.5			GUROBI 5.1		
	N	a	a(T)	min(a)	max(a)	Teret	Z	Vrijeme (min)	Gap	Z	Vrijeme (min)	Gap
1.	1-20	6-137	6-137	6	137	17782	270	3,46	-	270	1,83	-
2.	21-40	142-248	22-128	22	128	18149	340	150,00	19,2%	371	150,00	26,2%
3.	41-60	249-364	9-124	9	124	13937	238	3,69	-	238	0,68	-
4.	61-80	384-585	24-225	24	225	16188	267	0,49	-	267	0,50	-
5.	81-100	586-704	10-128	10	128	16206	300	150,00	7,8%	292	150,00	3,8%

Korišteni matematički solveri podjednako su uspješno rješavali pojedinačne optimizacijske funkcije uz manja odstupanja. Kod prosječnih vremena dolazaka od 3.2 broda dnevno samo u jednom slučaju nije pronađeno optimalno rješenje i to kod grupe od 20 brodova u sustavu, dok s prosječnim dolascima od 3.5 broda dnevno rješenja nisu pronađena za po dvije grupe u različitim varijantama distribucije dolazaka brodova. Tamo gdje nije pronađeno optimalno rješenje, prikazano je najbolje dobiveno rješenje uz oznaku maksimalnog relativnog odstupanja od optimalnog rješenja (*Gap*).

Osim što je važno saznanje da su modeli rješivi u razumnom vremenu, zanimljivo je promotriti vremenski horizont tj. razdoblje za koje se optimizacija provodi. Podatak o tome vidljiv je u stupcu označenim s $\max(a)$ čija vrijednost označava dolazak posljednjeg broda u grupi. Najniža vrijednost u stupcu ujedno označava grupu gdje su brodovi najgušće raspoređeni, što znači da je plansko razdoblje najkraće. Ako se ta vrijednost podijeli s 24, dobije se plansko razdoblje u danima.

Kod 10 brodova u grupi problem je u pravilu puno jednostavniji, vrijeme potrebno za dobivanje optimalne vrijednosti je kraće, a horizont planiranja iznosi 2 dana. Kod grupa s 15 brodova, problem postaje kompleksniji, pa je vrijeme rješavanje dulje, a horizont planiranja je oko 4 dana. Najkompleksniji slučaj su grupe s 20 brodova, kada je vrijeme rješavanja najdulje, u nekim slučajevima ne dobiva se optimalno rješenje u zadanom vremenu, ali je i horizont planiranja najdulji i iznosi oko 5 dana. Treba još jednom naglasiti da se spomenute vrijednosti planskog razdoblja odnose na grupe koje imaju najgušći raspored dolazaka. To znači da je kod ostalih grupa to razdoblje dulje i može iznositi do 8 dana.

S obzirom na obilježje malih i srednjih terminala, opravdano je smatrati objektivnim rezultate za grupe od po 15 brodova pri čemu model vjerodostojno rješava integrirani BAP i QCAP problem u prihvatljivom vremenu. Pri tom je moguće planirati dolaske brodova i garantirati optimizaciju procesa do 4 dana unaprijed. Detaljnija analiza rezultata modela s obzirom na njegovu kompleksnost prikazana je u sljedećem poglavlju.

Vrijednost objektne funkcije i vrijednosti varijabli kojima se određuje mjesto i vrijeme priveza broda te resursi i trajanje prekrcajnog procesa objedinjeni čine optimizirani operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu kakav je prikazan na slikama 40 i 41. Operativni plan dobiven je za 84 grupe brodova. Rezultati za 21 grupu sa $\lambda=3.2$ i $seed=400$ prikazani su u privitku 2, dok je cjelokupna analitika dostupna u elektroničkom obliku.



Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 197

	Duljina	Dolazak	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
								Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	5	12		12	22	1		16	2		11	3	1	10	4	x	
2	6	26		26	42	10		43	1		22	2	1	16	3	x	
3	6	29		29	45	10		24	2	1	16	3		14	4	x	
4	3	38		38	45	1		9	1	1	7	2		1000	100	x	
5	4	39		39	52	6		24	1	1	13	2		1000	100	x	
6	4	39	3	42	51	9		22	1		11	2	1	9	3	x	
7	4	45		45	56	12		28	1		14	2	1	11	3	x	
8	4	51		51	61	5		22	1		11	2	1	10	3	x	
9	5	70		70	79	1		15	2		10	3	1	9	4	x	
10	6	71		71	90	10		46	1		23	2	1	19	3	x	
11	4	76		76	88	1		20	1	1	12	2		1000	100	x	
12	3	78		78	86	13	1	8	1		1000	100		1000	100	x	
13	5	82		82	92	1		27	1		14	2	1	10	3	x	
14	3	90		90	100	13		13	1	1	10	2		1000	100	x	
15	7	96		96	115	9		32	2		21	3	1	19	4	x	

Slika 40: Optimalno rješenje BAP i QCAP modela za grupu N15-1 ($\lambda=3.2$, $seed=400$)



Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 224

	Duljina	Dolazak	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
								Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	6	2		2	19	1		28	2		19	3	1	17	4	x	
2	4	16		16	23	12		19	1		10	2	1	7	3	x	
3	6	18	1	19	34	10		23	2	1	15	3		12	4	x	
4	5	19		19	34	1		29	1	1	15	2		14	3	x	
5	7	22	1	23	40	1		25	3		19	4	1	17	5	x	
6	6	44		44	59	10		23	2	1	15	3		14	4	x	
7	6	44		44	57	6		21	2		14	3	1	13	4	x	
8	5	49		49	61	5	1	12	2		8	3		7	4	x	
9	4	54	3	57	65	1		24	1		12	2	1	8	3	x	
10	6	61		61	78	10		33	1	1	17	2		13	3	x	
11	6	64		64	76	8		21	2		14	3	1	12	4	x	
12	7	67		67	87	1		26	2	1	20	3		1000	100	x	
13	6	79		79	95	1		22	2	1	16	3		1000	100	x	
14	4	82		82	92	12		19	1	1	10	2		8	3	x	
15	4	122		122	132	1		25	1		13	2	1	10	3	x	

Slika 41: Optimalno rješenje BAP i QCAP modela za grupu N15-2 ($\lambda=3.2$, $seed=400$)

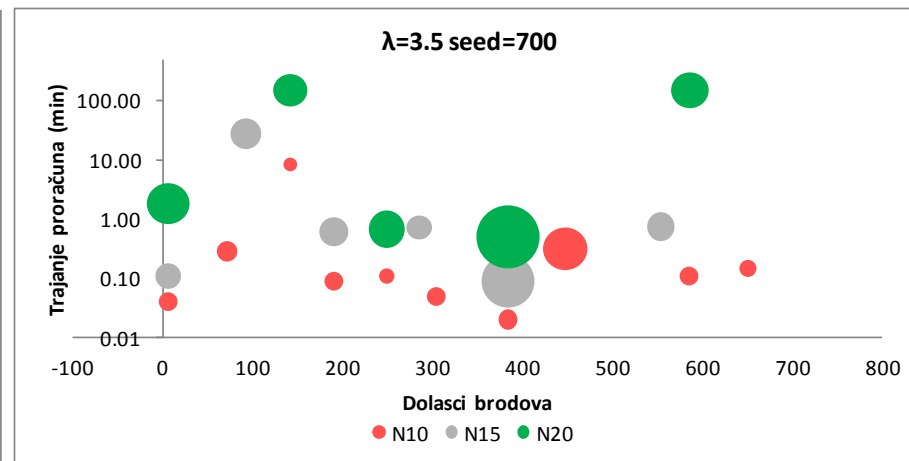
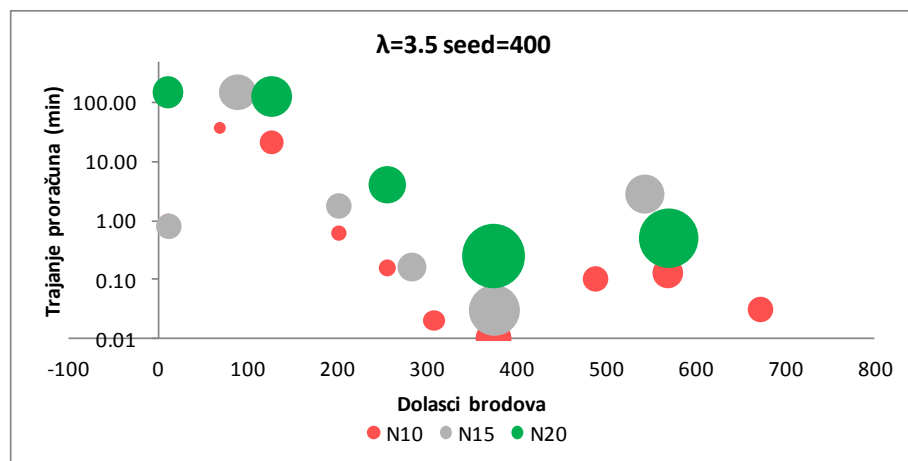
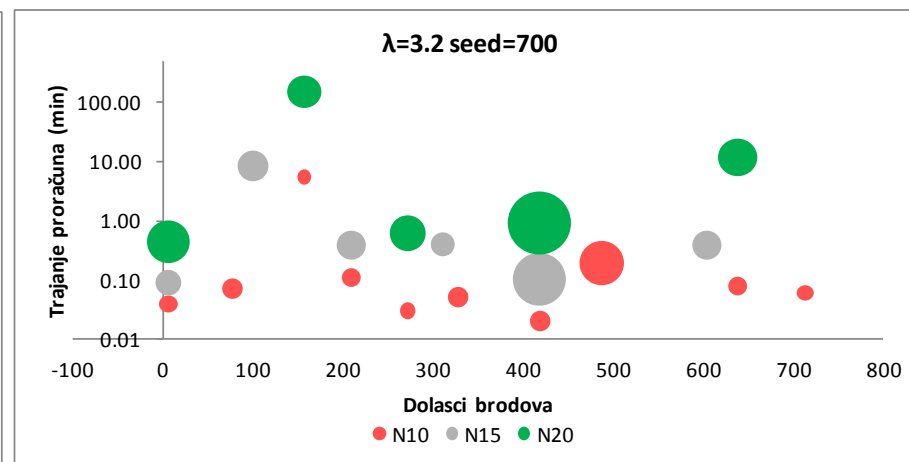
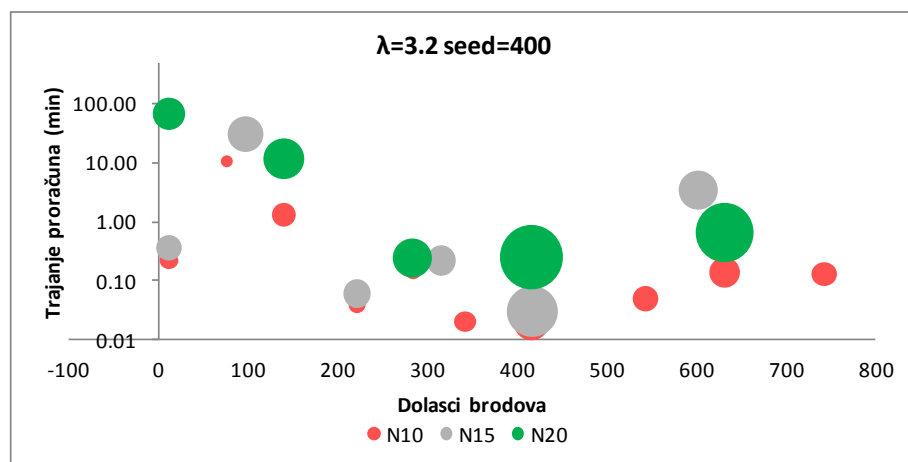
Na temelju vrijednosti varijabli odlučivanja može se zaključiti da je model konzistentan, ne postoje situacije u kojima bi dolazilo do preklapanja brodova, bilo po prostornoj ili po vremenskoj komponenti. Svakom brodu se pridružuje samo jedan pristan i točno određeni broj dizalica odabirom jednog od scenarija. Pozicije veza odgovaraju duljini broda i ne dolazi do prekoračenja ukupne duljine pristana. Raspored dizalica po brodovima u svakom vremenskom segmentu odgovara ukupnoj raspoloživosti dizalica na oba pristana u svim testiranim slučajevima.

6.4. Postoptimalna analiza rezultata

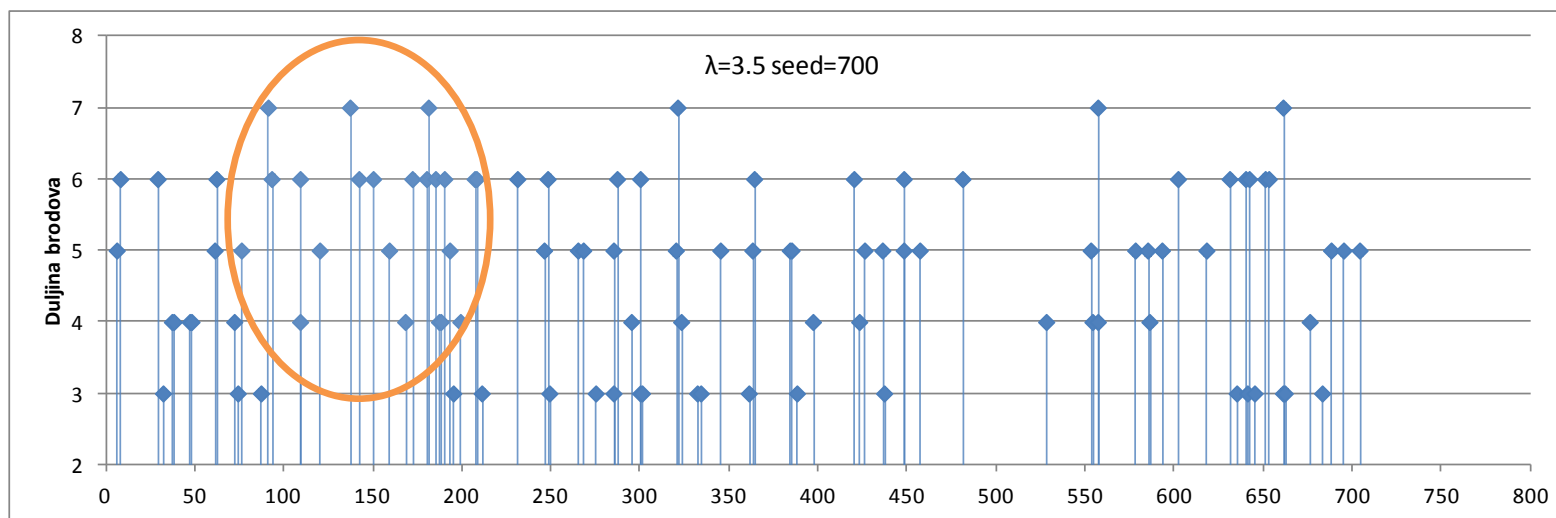
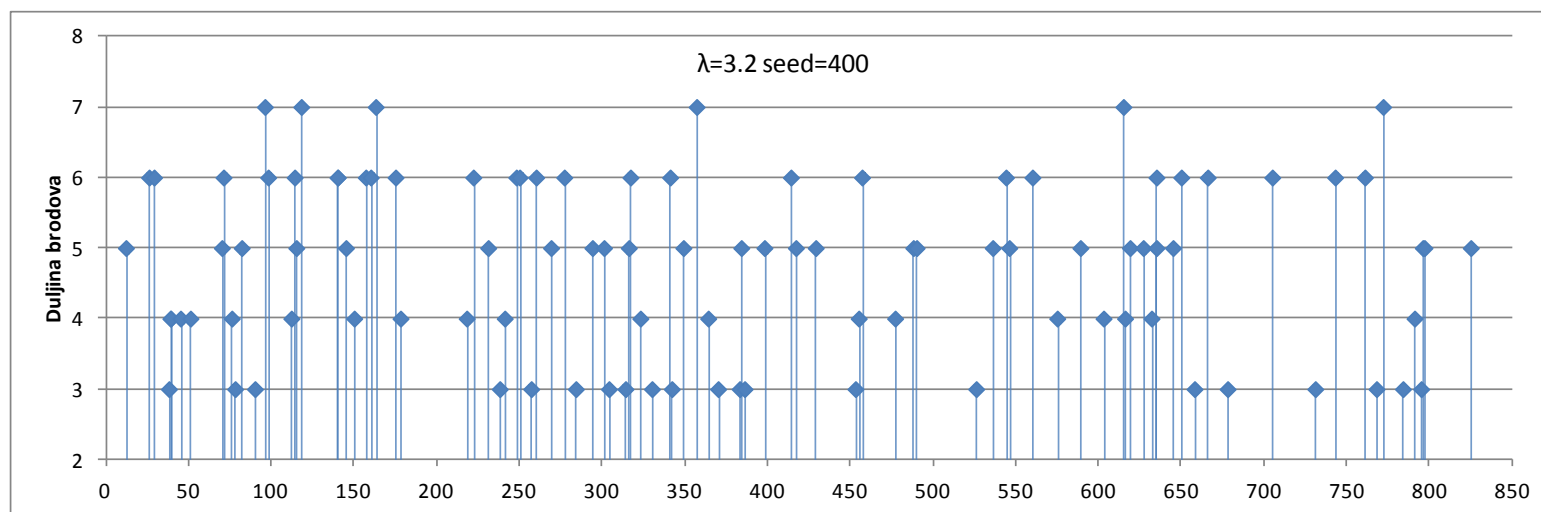
Iz dobivenih rezultata vidljivo je da uspješnost dobivanja optimalnog rješenja u zadanom vremenu ovisi o broju brodova u sustavu, ali i o razdiobi dolazaka brodova u luku. Osim toga korisno je analizirati koliko je obalni prekrcajni podsustav opterećen te u kojoj mjeri na optimalnu funkciju utječu pojedine varijable i ograničenja.

Ako se usporede dobivena rješenja i razdiobe dolazaka brodova na slikama 42 i 43, može se izvesti zaključak zbog čega su slučajevi u pojedinim grupama (npr. 15-2 i 20-2) teže rješivi. Slika 42 prikazuje kako veličina grupe i razdioba dolazaka po grupama korelira s vremenom rješavanja modela. Očekivano, slučajevi s više brodova u grupi zahtijevaju dulje vrijeme za dobivanje optimalnog rješenja, međutim na vrijeme utječe i gustoća brodova u sustavu u zadanom planskom horizontu. Ova gustoća prikazana je na slici površinom krugova pojedinih grupa brodova. Što su brodovi zbijeniji u vremenskom intervalu, to je površina kruga manja. Veće površine pojedinih grupa, znače i više vremenskog prostora između dolazaka, brodovi su rjeđe raspoređeni u vremenskom horizontu i samim tim do rješenja se brže dolazi. Naravno, korelacija je veća kada je i grupa veća. Kod najmanjih grupa, onih od 10 brodova u grupi, također je vidljiv ovaj utjecaj, ali se do rješenja lakše dolazi zbog manjeg broja brodova u sustavu.

Na rješenje osim razdiobe dolazaka utječe i veličina brodova (Slika 43). Osim što je u vremenskom intervalu kojeg pokrivaju grupe 15-2 i 20-2 frekvencija dolazaka brodova najveća (posebno za $\lambda=3.5$ i $seed=700$), u tom dijelu (označeno na slici) koncentrirani su dolasci najvećih brodova.



Slika 42: Korelacija vremena izvršenja modela i razdiobe dolazaka brodova



Slika 43: Distribucija dolazaka i veličina brodova

Težinu problema dobro opisuje broj varijabli, preciznije broj elemenata višedimenzionalnih varijabli i njihove moguće vrijednosti. Kardinalnost označava ukupni broj elemenata određenog identifikatora čije vrijednosti su određene modelom, dok maksimalna kardinalnost označava maksimalno moguć broj elemenata u skupu. Kod višedimenzionalnih varijabli odlučivanja, s velikim brojem mogućih vrijednosti, visoka gustoća može biti pokazatelj zagušenja prostora mogućih rješenja. U tablici 22 poredani su identifikatori prema složenosti tj. broju elemenata u skupu. Očekivano, najveći problem je određivanje vrijednosti četverodimenzionalne varijable $c(i, p, t, v)$ ³³ koja ujedno troši i najviše resursa računala te vrijednosti varijable $r(i, t)$. Ove dvije varijable su u korelaciji s obzirom na položaj broda u vremenu. Postavljanje većeg broja pristana (terminala) od dva, najviše bi stoga doprinijelo povećanju kardinalnosti.

Tablica 22: Veličine identifikatora i njihovih domena

Identifier	Cardinality	Maximaly	Density	Active	Inactive	Mem Usage
$r(i, t)$	250	3740 (20x187)	6.68%	250	0	4.08 Kb
$c(i, p, t, v)$	250	22440 (20x2x187x3)	1.11%	250	0	13.15 Kb
TW(t)	187	187	100.00%	187	0	2.13 Kb
Vrijeme	187	187	100.00%	187	0	1.59 Kb
$Z(i, j)$	98	400 (20x20)	24.50%	98	0	2.38 Kb
BrojDiz(i, v)	60	60 (20x3)	100.00%	60	0	1.97 Kb
Trajanje(i, v)	60	60 (20x3)	100.00%	60	0	1.97 Kb
QWF(i, p)	40	40 (20x2)	100.00%	40	0	1.58 Kb
Najranije(i)	20	20	100.00%	20	0	736
Zavrsetak(i)	20	20	100.00%	20	0	736
Dolazak(i)	20	20	100.00%	20	0	736
Duljina(i)	20	20	100.00%	20	0	736
Pocetak(i)	20	20	100.00%	20	0	736
opt(i, v)	20	60 (20x3)	33.33%	20	0	896
Brodovi	20	20	100.00%	20	0	168
$X(i, p)$	20	40 (20x2)	50.00%	20	0	896
Omega2(i)	20	20	100.00%	20	0	736
Omega1(i)	20	20	100.00%	20	0	736
Vez(i)	20	20	100.00%	20	0	736
$Y(i, j)$	11	400 (20x20)	2.75%	11	0	856
Cekanje(i)	5	20	25.00%	5	0	680
Varijante	3	3	100.00%	3	0	32
QCT(p)	2	2	100.00%	2	0	536
LT(p)	2	2	100.00%	2	0	536
Terminal	2	2	100.00%	2	0	32

Na efikasnost modela može se, međutim, utjecati podešavanjem vremenskog razdoblja planiranja tj. parametra H . Ovaj parametar određuje broj vremenskih segmenata s indeksom t . Tako se kod grupe N20-2 eksperimentiralo s različitim vrijednostima parametra H , pri čemu je model pokazao najbolji rezultat kada je $H = 197$.

³³ Oznaka se odnosi na varijablu r_{it}^{kv} , zbog sintakse programa neke varijable imaju različite oznake i nazive od onih navedenih u tekstu.

Analizu modela moguće je napraviti s obzirom na postavljena ograničenja i objektnu funkciju (Tablica 23). Prema tablici najveći utjecaj na trajanje procesa dobivanja optimalnog rješenja imaju ograničenje broja dizalica na terminalu (5.10) te ograničenja (5.14) i (5.15), kojima se osigurava konzistentnost varijable r_{it}^{kv} .

Tablica 23: Utjecaj ograničenja na vrijeme rješavanja modela

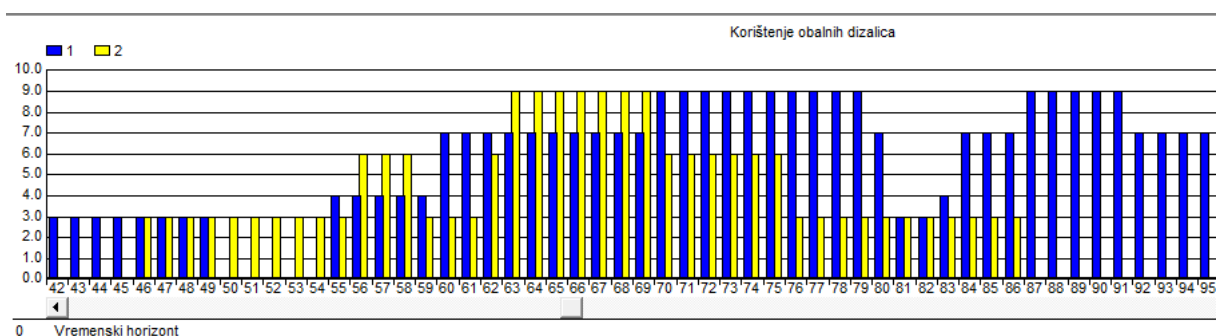
Name	hits	gross time	net time	average gross	average net
Procedure_1	12	5498.6	5493.3	458.22	457.77
ResursDizalica	11	1.565	1.565	0.142	0.142
ResursDizalica.index domain	11	1.565	1.565	0.142	0.142
DefZaC1.index domain	11	1.426	1.426	0.130	0.130
DefZaC1	11	1.426	1.426	0.130	0.130
DefZaC2	11	1.295	1.295	0.118	0.118
DefZaC2.index domain	11	1.295	1.295	0.118	0.118
DefZaC3.index domain	11	0.318	0.318	0.029	0.029
DefZaC3	11	0.318	0.318	0.029	0.029
DefPocetak.index domain	11	0.244	0.244	0.022	0.022
DefPocetak	11	0.244	0.244	0.022	0.022
DefZavrsetak.index domain	11	0.220	0.220	0.020	0.020
DefZavrsetak	11	0.220	0.220	0.020	0.020
DefZaC4.index domain	11	0.127	0.127	0.012	0.012
DefZaC4	11	0.127	0.127	0.012	0.012
UvjetPreklapanja	11	0.049	0.049	0.004	0.004
PreklapanjeY	11	0.034	0.034	0.003	0.003
PreklapanjeZ	11	0.034	0.034	0.003	0.003
ObjFun.index domain	11	0.018	0.018	0.002	0.002
ObjFun	11	0.018	0.018	0.002	0.002
PreklapanjeY.index domain	11	0.006	0.006	0.001	0.001
RanDol2.index domain	11	0.006	0.006	0.001	0.001
RanDol2	11	0.006	0.006	0.001	0.001
UvjetPreklapanja.index domain	11	0.005	0.005	0.000	0.000
PreklapanjeZ.index domain	11	0.005	0.005	0.000	0.000
RanDol1	11	0.005	0.005	0.000	0.000
RanDol1.index domain	11	0.005	0.005	0.000	0.000
DuljinaPristana	11	0.003	0.003	0.000	0.000
DuljinaPristana.index domain	11	0.003	0.003	0.000	0.000
Vrijeme	22	0.003	0.003	0.000	0.000
Z.index domain	11	0.002	0.002	0.000	0.000
Y.index domain	11	0.002	0.002	0.000	0.000
RanDol3.index domain	11	0.002	0.002	0.000	0.000
RanDol3	11	0.002	0.002	0.000	0.000
JednaVarijanta	11	0.001	0.001	0.000	0.000
JednaVarijanta.index domain	11	0.001	0.001	0.000	0.000
JedanTerminal	11	0.001	0.001	0.000	0.000
JedanTerminal.index domain	11	0.001	0.001	0.000	0.000
Brodovi	22	0.001	0.001	0.000	0.000

Kako je problem s 20 brodova najkompleksniji, napravljen je eksperiment s grupom N20-2 (*seed* 700) za koju jedino nije pronađeno optimalno rješenje, nego tek ono s maksimalnim odstupanjem od 22.4%, odnosno 28.5% ovisno o korištenom solveru (Tablica 20). Cilj je bio dobiti bolje rješenje od onog u prvom slučaju. Najprije se pokušalo s različitim vrijednostima parametra H . Inače su inicijalne vrijednosti ovog parametra postavljane uvijek tako da su više za 72 vremenska segmenta od vremena dolaska posljednjeg broda u grupi, što u ovom slučaju odgovara broju 199, budući da je

vrijeme dolaska posljednjeg broda 127. Najboljom se pokazala vrijednost $H = 197$, međutim to nije značajnije utjecalo na rezultat.

Činjenica da su brodovi gusto raspoređeni i da se radi o velikim brodovima utjecala je na odluku da se usmjeri pozornost na dva parametra: jedan od njih je povećanje broja dizalica na terminalu, a drugi je implementacija modela (5.29) s podesivim vremenom dolaska, tj. mogućnošću ranijeg dolaska broda od najavljenog. Ovaj drugi slučaj zahtjeva postavljanje vrijednosti za parametar α' kojim se određuje najraniji mogući dolazak broda.

Ako se oslobodi ograničenje broja dizalica (5.10), dobije se optimalno rješenje $Z=266$ za svega 1.5 minute. Ako se analizira raspodjela dizalica (Slika 44), uočava se da bi u kritičnom periodu kada je dolazak brodova intenzivan bilo potrebno osigurati čak 9 dizalica na svakom pristanu. Unatoč relaksaciji, ukupno čekanje brodova iznosi 9 i upravo se odnosi na vremenske periode između 65 i 76.



Slika 44: Raspodjela vremena rada dizalica za slučaj N20-2 nakon relaksacije

Rezultat je zanimljiv samo s teoretskog gledišta jer relaksacija ograničenja broja dizalica na pristanima nije realna opcija. Međutim, ovo dokazuje da su izrazito veliki zahtjevi za resursima i veliki brodovi koncentrirani u relativno malom vremenskom intervalu utjecali na nemogućnost dobivanja optimalnog rješenja za ovaj ekstremni slučaj.

Drugim eksperimentom ispitalo se kako se ponaša model u ovom istom slučaju ako se implementira model s podesivim vremenom dolaska. Pretpostavka je bila da bi se moglo ovom implementacijom prorijediti najopterećeniji vremenski interval tako što će se omogućiti najvećim brodovima da dođu ranije od najavljenog dolaska. S tom namjerom za brodove veličine 6 i 7 postavljene su vrijednosti parametra α' za 8 manje od

najavljenog vremena dolaska, što odgovara maksimalnoj uštedi od 8 vremenskih segmenata. Pored toga, uvedeno je ograničenje vremena čekanja za svaki brod u sustavu na maksimalnu vrijednost od 24 vremenska segmenta kako bi se suzio prostor pretraživanja u kojem se traži optimalno rješenje. Ograničenje broja dizalica vraćeno je i postavljeno na inicijalne vrijednosti (5 dizalica po pristanu). Nakon isteka vremena od 150 minuta, najbolje rješenje je bilo 310 uz *gap* od 8.39%. To znači da je maksimalno odstupanje od optimalnog rješenja tek nešto više od 8%, što je značajno poboljšanje u odnosu na originalno rješenje gdje je odstupanje bilo 28.5%. Rezultat je prikazan na slici 45, a raspodjela vremena rada dizalica na slici 46.



Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 310

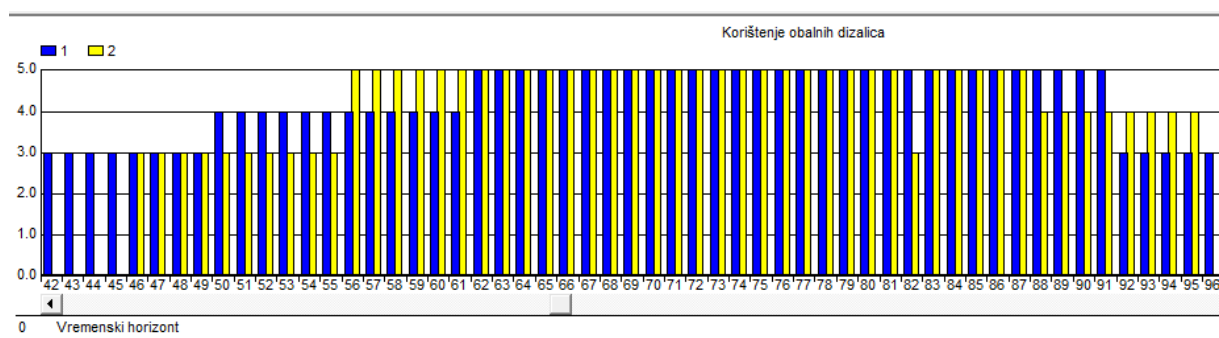
	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	X 1 2
1	6	13			13	27	1		23	2		15	3	1	14	4	x
2	6	22			22	35	1		21	2		14	3	1	13	4	x
3	5	32			32	39	1		12	2		8	3	1	7	4	x
4	4	42			42	50	8		24	1		12	2	1	8	3	x
5	6	46			46	59	8		33	1		17	2	1	13	3	x
6	6	55	5.00		50	62	1		21	2		14	3	1	12	4	x
7	7	56			56	82	1	1	26	2		20	3		1000	100	x
8	6	60	1.00		59	75	10		22	2	1	16	3		1000	100	x
9	4	62			62	72	1		19	1	1	10	2		8	3	x
10	4	63		15	78	88	1		25	1		13	2	1	10	3	x
11	6	65	3.00		62	78	10		23	2	1	16	3		14	4	x
12	5	68		4	72	87	5		31	1	1	15	2		14	3	x
13	3	70		5	75	88	9	1	13	1		10	2		1000	100	x
14	4	74		1	75	83	12		16	1	1	8	2		7	3	x
15	6	83			83	96	1		21	2		14	3	1	13	4	x
16	6	84		4	88	107	1		24	2	1	19	3		1000	100	x
17	3	87			87	92	13		10	1	1	5	2		1000	100	x
18	6	109			109	123	1		24	2		16	3	1	14	4	x
19	5	125			125	132	1		13	2		9	3	1	7	4	x
20	6	127			127	140	1		22	2		15	3	1	13	4	x

Slika 45: Rezultat za slučaj N20-2 uz varijantu ranijeg dolaska i ograničenje čekanja

Iz rezultata se može vidjeti da su ipak dolasci na vez nešto prorjeđeniji iako i dalje intenzivni. Također, nema ekstremnih čekanja kao što je slučaj s originalnim rješenjem. Brodovi 6, 8 i 11 trebaju prilagoditi dolaske tako da stignu 5, 1, odnosno 3 vremenska segmenta ranije. Brodovi 10, 12, 13, 14 i 16 morat će odgovarajuće vrijeme čekati na slobodan vez. Što se rasporeda dizalica tiče, za razliku od relaksiranog slučaja, sve raspoložive dizalice maksimalno se koriste tijekom duljeg vremenskog perioda. To je i očekivano jer se prekrcajni rad mora obaviti ograničenim brojem dizalica.

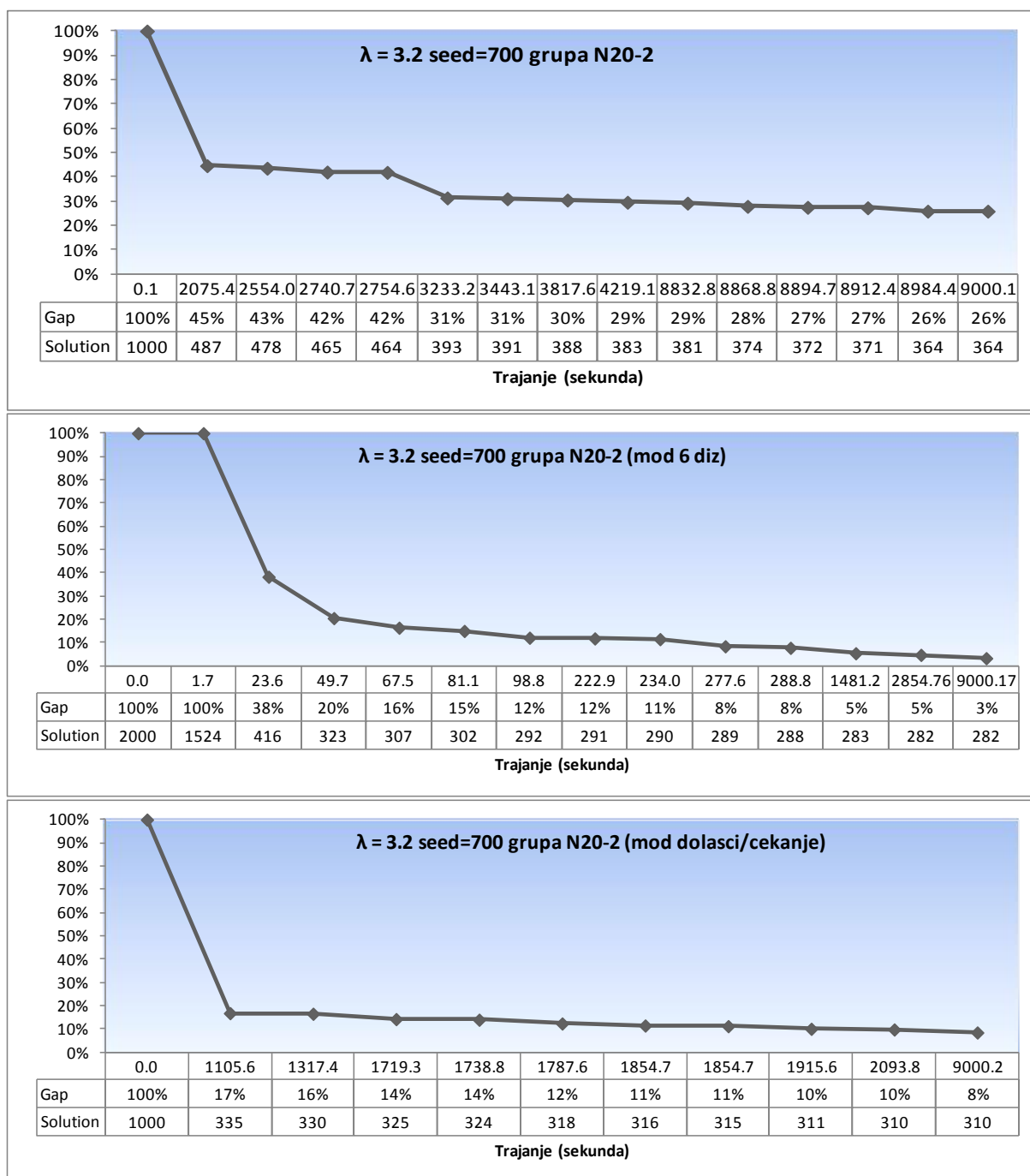
Vremena izvršavanja programa u odnosu na tri različite varijacije modela prikazana su na slici 47. Gornji graf predstavlja inicijalni slučaj, graf u sredini slučaj s ograničenjem

broja dizalica na 6 po pristanu, dok donji graf predstavlja proces dobivanja rješenja eksperimenta s podesivim vremenima dolaska brodova uz ograničenje vremena čekanja.



Slika 46: Raspodjela vremena rada dizalica za slučaj N20-2 uz prilagodbu vremena dolazaka brodova i ograničenje vremena čekanja

Može se zaključiti da se unatoč ekstremnom slučaju, modelom optimizacije uz varijacije parametara i ograničenja uspjelo dobiti zadovoljavajuće rješenje. Treba naglasiti da je ovakav slučaj ipak izuzetak, nastao kao posljedica svojstva funkcije razdiobe vjerojatnosti slučajne varijable čije vrijednosti su generirane generatorom pseudorandom brojeva, te da je teško očekivati u realnom okruženju takve vrijednosti. Međutim, i pored toga dokazana je stabilnost i koherentnost modela te funkcionalnost inačice s podesivim vremenima dolaska brodova.



Slika 47: Graf procesa dobivanja optimalnog rješenja za slučaj N20-2 s tri varijacije

7. ZAKLJUČAK

Kontejnerski terminali predmet su brojnih znanstvenih istraživanja u kojima se implementiraju metode iz industrijskog i procesnog inženjerstva. Zbog komercijalnog značenja u ukupnom transportnom procesu, tehnološki procesi na lučkim kontejnerskim terminalima nastoje se optimizirati na način da se poveća njihova efikasnost, transportni učinak i kvaliteta rada. Znanstveni pristup ovom problemu ogleda se u brojnim znanstvenim radovima, upravo iz područja taktičko-operativnog planiranja u kojima je cilj optimizirati pojedinačne procese ili pak simulirati transportne procese između morskog i kopnenog prometnog sučelja. Pri tome se pored matematičko-statističke osnove te metoda operacijskih istraživanja koriste i metaheurističke metode. Njima se nastoje pojednostaviti kompleksni problemi i osigurati dobivanje prihvatljivih rješenja u što kraćem vremenu.

Prilikom analize dosadašnjih znanstvenih istraživanja uočava se vrlo velik broj radova koji su usmjereni na rješavanje složenih operativnih problema raspoređivanja transportnih entiteta u prostorno-vremenskom okviru, pri čemu se ističu problemi koji su povezani s funkcionalnošću obalnog prekrcajnog podsustava lučkih kontejnerskih terminala. Velika većina autora proučava velike kontejnerske terminale, mahom s područja dalekog istoka, gdje učinci optimizacije mogu biti presudni u odnosu na njihovu konkurentnost.

Od samog početka istraživanja bilo je jasno da, iako postoji mnoštvo radova iz ovog područja, ne postoji univerzalni model koji bi jednoznačno ili jednako dobro opisivao zahtjeve za optimizacijom tehnoloških procesa na različitim kontejnerskim terminalima. Svaki lučki kontejnerski terminal je specifičan s obzirom na prometno-tehnička i prostorna obilježja, organizaciju rada i upravljanje, položaj na transportnom tržištu, interesne grupe, itd. Optimizacijska funkcija ili optimizacijski proces moraju stoga biti dovoljno fleksibilni da se mogu prilagoditi specifičnostima pojedinih terminala.

Ako se prihvati navedena činjenica, onda se model optimizacijskog procesa koji je prezentiran u ovom radu može smatrati pogodnim za male i srednje kontejnerske terminale na kojima dolaze brodovi različitih veličina i kapaciteta. Takvi terminali mogu

imati različite konfiguracije pristana koji mogu biti prostorno i tehnološki nezavisni. Pojedine varijacije osnovnih modela prikazane u radu pokazuju kako se predloženi modeli mogu prilagoditi specifičnim uvjetima ili zahtjevima korisnika pa je tako moguće uzeti u obzir ograničenje dubine, prilagoditi broj i tehnička obilježja obalnih dizalica, postaviti preferencije prema zahtjevima brodara i sl.

Taktičko planiranje i optimizaciju obalnog prekrcajnog podsustava moguće je promatrati s pozicije brodara ili s pozicije lučkog operatera, ali usprkos različitosti u teoretskim pristupima ovom problemu, zajedničko obilježje je da tehnološki procesi u odnosu na brod i teret moraju biti što kraći i uz što bolje iskorištenje resursa. U svim predloženim modelima u okviru teme ovog rada primijenjeno je ovo načelo.

Optimizacija obalnog prekrcajnog podsustava tj. tehnoloških procesa kojima se ostvaruje njegova funkcija, uključuje nekoliko standardnih problema koji u znanstvenoj teoriji egzistiraju samostalno. To su problem dodjele vezova ili raspoređivanja brodova, problem raspodjele obalnih dizalica po brodovima te problem redoslijeda prekrcajnih operacija. Ovi standardni problemi imaju veliku međusobnu korelaciju koja otežava njihovu praktičnu primjenu. S teoretskog gledišta svaki od njih moguće je riješiti samostalno. Međutim, kada se sagleda cjelovitost procesa dolazi se do zaključka da tako dobiveni rezultati odstupaju od realnih situacija.

Rješavanje problema dodjele veza pretpostavlja da je potrebno unaprijed definirati trajanje prekrcajnog procesa koje ovisi o rasporedu tereta i broju pridruženih dizalica. Aproksimacijom srednjih vrijednosti trajanja procesa dobiva se optimalno rješenje problema dodjele veza, ali ovo rješenje vrlo teško ili rijetko može biti održivo jer je broj resursa ograničen i ne može se garantirati da će isti biti dostupni svakom brodu. Eventualna korekcija dobivena rješavanjem samostalnog problema raspodjele dizalica na temelju rješenja problema dodjele veza, znači promjenu trajanja procesa, što znači da je potrebno revidirati dobiveni rezultat i ponovno riješiti problem dodjele veza.

Integracijom modela dodjele veza i raspodjele dizalica moguće je dobiti puno vjerodostojniji rezultat. Kako teret nije homogeno raspoređen po brodu, pojavljuje se problem utjecaja rasporeda tereta na iskorištenje kapaciteta obalnih dizalica. Aproksimacijom srednjih vrijednosti iskorištenja kapaciteta dizalica dolazi do manjih ili većih odstupanja u ostvarivanju prekrcajnih učinaka što dovodi do povećanja trajanja

prekrcajnog procesa, te posljedično utječe na optimalno rješenje kod kojeg je napravljena aproksimacija. Jedini izlaz u tom slučaju je prethodno rješavanje problema redoslijeda prekrcajnih procesa.

Rješenje koje je predloženo u ovom radu temeljeno je na optimizaciji procesa koji objedinjuje sva tri standardna modela, primjenjujući metode linearnog i cjelobrojnog programiranja, prilagođenog terminalima s nezavisnim pristanima. Prilagođen integralni model raspodjele brodova po pristanu i dizalica po brodovima sastoji se od triju faza: inicijalizacije, raspoređivanja i usklađivanja. Konceptualna osnova sastoji se u kreiranju triju scenarija realizacije prekrcajnog procesa i odabiru jednog od njih, pri čemu je za svaki od scenarija određeno njegovo trajanje i potrebni broj dizalica. Ovi scenariji nisu rezultat aproksimacije, nego su dobiveni na temelju rezultata optimizacije redoslijeda rada obalnih dizalica, ovisno o rasporedu tereta na brodu.

Jednu od važnih komponenti optimizacijskog procesa koji je ovdje predložen, predstavlja model za rješavanje problema redoslijeda rada obalnih dizalica s mogućnošću dijeljenja zadatka među dizalicama. Rezultati dobiveni testiranjem na uzorku od 100 brodova pokazuju da je njegovom implementacijom moguće dobiti visoke koeficijente iskorištenja kapaciteta obalnih dizalica.

Obilježje predloženog modela optimizacije je da se broj dizalica pridruženih brodu tijekom trajanja prekrcajnog procesa ne mijenja. Na ovaj način pruža se mogućnost brodaru da bolje kontrolira i planira putovanje broda, a terminal operateru osigurava veću vjerodostojnost u odnosu na brodara. Ovakav pristup je moguć jer primijenjeni model optimizacije redoslijeda rada obalnih dizalica osigurava visoko iskorištenje njihovih kapaciteta.

Dinamika planiranja osigurana je provedbom faze usklađivanja, gdje je moguće podesiti plan za slučajeve kada postoji zajednički sporazum luke i brodara oko implementacije modela ranijeg dolaska broda. Kontinuitet planiranja u vremenskom horizontu osiguran je predloženom heuristikom koja se primjenjuje na granici između dva sukcesivna razdoblja planiranja.

Rezultati testiranja koje je provedeno na slučajno generiranom uzorku od 100 brodova i četiri varijacije osnovne funkcije razdiobe vjerojatnosti njihovih dolazaka, pokazuju da je

optimizacija procesa ostvarena u teoretskom i funkcionalnom smislu. Osnovni cilj procesa – minimizacija ukupnog vremena brodova u luci ostvaren je primijenjenim metodama operacijskih istraživanja, metodama linearnog i cjelobrojnog programiranja, što je bila znanstvena hipoteza. Osiguravanje funkcionalnosti kako u teoretskom tako i u praktičnom smislu ispitano je za grupe od 10, 15 i 20 brodova čija ukupna prekrcajna potražnja odgovara dinamičkom kapacitetu malih i srednjih kontejnerskih terminala.

Dobiveni rezultati zadovoljavaju postavljenu hipotezu u svim slučajevima s grupama do 15 brodova u sustavu, a tek u ekstremnim slučajevima s 20 brodova u sustavu nije pronađeno optimalno rješenje u zadanom vremenu. To dokazuje garantiranu uspješnost primjene modela za razdoblje planiranja do 4 dana unaprijed što je zadovoljavajuće s obzirom na obilježja malih i srednjih kontejnerskih terminala. Kod velikih kontejnerskih terminala gdje je dinamika dolazaka brodova intenzivnija i gdje se zahtijeva dulji horizont planiranja, model optimizacijskog procesa mora se nadograditi nekom od metaheurističkih metoda.

Rezimirajući istraživanja u odnosu na glavnu i pomoćne hipoteze može se zaključiti sljedeće:

1. Dobivena optimalna rješenja metodom linearnog programiranja potvrđuju hipotezu u svim slučajevima kada razdioba vjerojatnosti dolazaka brodova i horizont planiranja odgovaraju malim i srednjim kontejnerskim terminalima s dva nezavisna pristana ili do dvije obale u sustavu.
2. Prilagodba modela raspodjele vezova i obalnih dizalica različitim tehničkim obilježjima i zahtjevima operatera na konkretnom terminalu postiže se intervencijom u objektnu funkciju ili pripadajuća ograničenja. Različite dispozicije i konfiguracije pristana uvrštavaju se promjenom parametara ulaznih veličina.
3. Razvijeni modeli redoslijeda rada obalnih dizalica omogućuju minimalno trajanje prekrcajnog procesa i visoko iskorištenje kapaciteta dizalica i radnog vremena. To je postignuto dijeljenjem pojedinačnih aktivnosti među dizalicama na podzadatke te stvaranjem prekrcajnih klastera ovisno o stvarnom rasporedu tereta na brodu.
4. Kvaliteta usluge u odnosu na brodara očituje se u točnijem predviđanju vremena boravka broda u luci, pri čemu je broj aktivnih dizalica pridruženih brodu konstantan za

čitavo vrijeme prekrcajnog procesa. Trajanje prekrcajnog procesa ovisi o broju pridruženih dizalica i rezultatu optimizacije, ali je njegov ishod rezultat pojedinačnih optimizacija triju odabranih scenarija.

U znanstveno-teorijskom smislu ovaj rad predstavlja nadogradnju već postojećim spoznajama o metodama korištenim za rješavanje standardnih problema raspodjele resursa na lučkim kontejnerskim terminalima i planiranja tehnoloških procesa. Naglašena je znanstveno utemeljena spoznaja o različitosti pristupa problematici optimizacije ovisno o prostornim, prometno-tehničkim i organizacijskim svojstvima kontejnerskih terminala. U smislu pristupa problematici ovaj rad u prvi plan ističe funkcionalnost modela optimizacije, prilagođenog za kontejnerske terminale koji su karakteristični za europsko mediteransko područje. Otuda proizlazi i glavni doprinos ovog rada u aplikativnom smislu.

Autor na kraju želi naglasiti važnost pristupanja rješavanju problematike optimizacije na lučkim kontejnerskim terminalima kroz znanstveno polje tehnologije prometa. Ideja funkcionalne optimizacije je potencirana vlastitim iskustvima i empirijskim viđenjem problematike s pozicije tehnologa prometa.

LITERATURA (REFERENCE)

1. Beškovnik, B. & Twrđy, E. (2009) Productivity simulation model for optimization of Maritime Container Terminals. *Transport Problems*. 4 (3), pp. 113–122.
2. Bierwirth, C. & Meisel, F. (2009) A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints. *Journal of Scheduling*. 12 (4), pp. 345–360.
3. Bierwirth, C. & Meisel, F. (2010) A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*. 202 (3), pp. 615–627.
4. Blanchard, B.S. (2004) *System engineering management*. Hoboken, NJ: John Wiley.
5. Brinkmann, B. (2005) *Seehafen Planung und Entwurf*. [online]. Berlin: Springer.
6. Cordeau, J.-F., Laporte, G., Legato, P. & Moccia, L. (2005) Models and Tabu Search Heuristics for the Berth-Allocation Problem. *Transportation Science*. 39 (4), pp. 526–538.
7. Daganzo, C.F. (1989) The crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*. 23 (3), pp. 159–175.
8. Du, Y., Chen, Q., Quan, X., Long, L. & Fung, R.Y.K. (2011) Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 47 (6), pp. 1021–1037.
9. Dundović, Č. (2002) *Lučki terminali*. Sveučilište u Rijeci. Pomorski fakultet u Rijeci.
10. Dundović, Č. (2001) *Tehnološki procesi u prometu: poslijediplomski studij 'Tehnološki sustavi u pomorskom prometu': Autorizirana predavanja iz nastavnog kolegija na poslijediplomskom studiju*. Sveučilište u Rijeci, Odjel za pomorstvo.
11. Dundović, Č. & Hess, S. (2005) Exploitability of the Port Container Terminal Stacking Area Capacity in the Circumstances of Increased Turnover. In: *Zbornik referatov - Intelligent transport systems - ITS*. 2005 Ljubljana: Elektrotehniška zveza Slovenije.
12. Dundović, Č. & Kesić, B. (2001) *Tehnologija i organizacija luka*. Sveučilište u Rijeci. Pomorski fakultet u Rijeci.
13. Dundović, Č. & Zenzerović, Z. (2000) An Optimal Capacity Planning Model for General Cargo Seaport. *Promet-Traffic-Traffico*. 12, pp. 217–221.
14. Grubišić, N. & Dundović, Č. (2011) Primjena sistemskog inženjeringa u planiranju lučkih terminala. *Pomorstvo*. 25 (1), pp. 189–207.
15. Guan, Y. & Cheung, R.K. (2004) The berth allocation problem: models and solution methods. *OR Spectrum*. 26 (1), pp. 75–92.

16. Gudelj, A., Krčum, M. & Twrdy, E. (2010) Models and Methods for Operations in Port Container Terminals. *Promet - Traffic&Transportation*. 22 (1).
17. Hendriks, M.P.M., Armbruster, D., Laumanns, M., Lefebvre, E. & Udding, J.T. (2011) Strategic allocation of cyclically calling vessels for multi-terminal container operators. *Flexible Services and Manufacturing Journal*.
18. Heragu, S.S. (2008) *Facilities Design*. CRC Press.
19. Imai, A., Chen, H.C., Nishimura, E. & Papadimitriou, S. (2008) The simultaneous berth and quay crane allocation problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 44 (5), pp. 900–920.
20. Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M. & Papadimitriou, S. (2007a) Berth allocation at indented berths for mega-containerships. *European Journal of Operational Research*. 179 (2), pp. 579–593.
21. Imai, A., Nishimura, E. & Papadimitriou, S. (2001) The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research Part B: Methodological*. 35 (4), pp. 401–417.
22. Imai, A., Sun, X., Nishimura, E. & Papadimitriou, S. (2005) Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. *Transportation Research Part B: Methodological*. 39 (3), pp. 199–221.
23. Imai, A., Zhang, J.-T., Nishimura, E. & Papadimitriou, S. (2007b) The Berth Allocation Problem with Service Time and Delay Time Objectives. *Maritime Economics & Logistics*. 9 (4), pp. 269–290.
24. Jones, O., Maillardet, R. & Robinson, A. (2009) *Introduction to Scientific Programming and Simulation Using R*. Boca Raton FL: Taylor & Francis Group, LLC.
25. Kim, K.H. & Moon, K.C. (2003) Berth scheduling by simulated annealing. *Transportation Research Part B: Methodological*. 37 (6), pp. 541–560.
26. Kim, K.H. & Park, Y.-M. (2004) A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal of Operational Research*. 156 (3), pp. 752–768.
27. Kirinčić, J. (1991) *Luke i terminali*. Zagreb: Sveučilište u Rijeci, Školska knjiga.
28. Kos, S., Hess, M. & Hess, S. (2006) Simulation Method in Modelling Exploitation Factors of Sea Port Queuing Systems. *Pomorstvo*. 20, pp. 67–85.
29. Kos, S. & Zenzerović, Z. (2004) Model of optimal cargo transport structure by full container ship on predefined sailing route. *Promet-Traffic-Traffico*. 16, pp. 15–20.
30. Kos, S. & Zenzerović, Z. (2003) Modelling the Transport Process in Marine Container Technology. *Promet-Traffic-Traffico*. 15, pp. 13–17.

31. Kossiakoff, A., Sweet, W.N., Seymour, S. & Biemer, S.M. (2011) *Systems Engineering Principles and Practice*. John Wiley & Sons.
32. Lee, D.-H., Wang, H.Q. & Miao, L. (2008) Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 44 (1), pp. 124–135.
33. Lim, A. (1998) The berth planning problem. *Operations Research Letters*. 22 (2-3), pp. 105–110.
34. Lim, A., Rodrigues, B., Xiao, F. & Zhu, Y. (2004) Crane scheduling with spatial constraints. *Naval Research Logistics*. 51 (3), pp. 386–406.
35. Lim, A., Rodrigues, B. & Xu, Z. (2007) A m-parallel crane scheduling problem with a non-crossing constraint. *Naval Research Logistics (NRL)*. 54 (2), pp. 115–127.
36. Liu, J., Wan, Y. & Wang, L. (2005) Quay crane scheduling at container terminals to minimize the maximum relative tardiness of vessel departures. *Naval Research Logistics (NRL)*. 53 (1), pp. 60–74.
37. Maritime Navigation Commission (2008) *Life Cycle Management of Port Structures: Recommended Practice for Implementation*. PIANC.
38. Meisel, F. (2009) *Seaside Operations Planning in Container Terminals*. Springer.
39. Meisel, F. & Bierwirth, C. (2009) Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 45 (1), pp. 196–209.
40. Moorthy, R. & Teo, C.-P. (2006) Berth management in container terminal: the template design problem. *OR Spectrum*. 28 (4), pp. 495–518.
41. Murty, K.G., Liu, J., Wan, Y. & Linn, R. (2005) A decision support system for operations in a container terminal. *Decision Support Systems*. 39 (3), pp. 309–332.
42. Nishimura, E., Imai, A. & Papadimitriou, S. (2001) Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*. 131 (2), pp. 282–292.
43. Park, N.-K. & Dragović, B. (2009) A Study of Container Terminal Planning. *FME Transactions*. 37 (4), pp. 203–209.
44. Park, Y.-M. & Kim, K.H. (2003) A scheduling method for Berth and Quay cranes. *OR Spectrum*. 25 (1), pp. 1–23.
45. Rashidi, H. & Tsang, E.P.K. (2006) *Container Terminals: Scheduling Decisions, their Formulation and Solutions*.
46. Schonfeld, P. & Sharafeldien, O. (1985) Optimal Berth and Crane Combinations in Containerports. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 111 (6), pp. 1060–1072.

47. Steenken, D., Voss, S. & Stahlbock, R. (2004) Container terminal operation and operations research - a classification and literature review. *OR Spectrum*. 26 (1), pp. 3–49.
48. Thi, M.-H.P., Ryu, K. & Kim, H. (2012) Comparing Cycle Times of Advanced Quay Cranes in Container Terminals. In: *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference*. 2012 Patong Beach, Phuket.
49. Thoresen, C.A. (2010) *Port Designer's Handbook*. Thomas Telford.
50. Tsinker, G.P. (2004) *Port engineering : planning, construction, maintenance, and security*. Hoboken, N.J.: Wiley.
51. Twrdy, E. & Beškovnik, B. (2008) Planning and decision-making to increase productivity on a Maritime Container Terminal. *Promet - Traffic & Transportation*. 20 (5), pp. 335–341.
52. United Nations Conference on Trade and Development (1985) *Port Development: A Handbook for Planners in Developing Countries*. 2nd edition. United Nations Pubns.
53. Vis, I.F.A. & de Koster, R. (2003) Transshipment of Containers at a Container Terminal: An Overview. *European Journal of Operational Research*. 147 (1), pp. 1–16.
54. Xu, D., Li, C.-L. & Leung, J.Y.-T. (2012) Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels. *European Journal of Operational Research*. 216 (1), pp. 47–56.
55. Zenzerović, Z. (2005) Kvantitativne metode u funkciji optimalnog funkcioniranja sustava kontejnerskoga prijevoza morem. *Pomorski zbornik*.
56. Zenzerović, Z. (1995) *Optimizacijski modeli planiranja kapaciteta morskih luka*. Rijeka: Sveučilište u Rijeci.
57. Zenzerović, Z. (2003) *Teorija redova čekanja*. Autorizirana predavanja. Rijeka: Pomorski fakultet u Rijeci.
58. Zenzerović, Z. & Bešlić, S. (2003) Contribution to the Optimization of the Cargo Transportation Problem. *Promet-Traffic-Traffico*. 15, pp. 65–115.
59. Zenzerović, Z. & Poletan, T. (1997) Utjecaj propusne moći pristana na efikasnost lučkog kontejnerskog terminala. *Pomorski zbornik*. 35, pp. 57–72.
60. Zenzerović, Z. & Vilke, S. (2011) Teorija redova čekanja u funkciji planiranja kapaciteta kontejnerskog terminala riječke luke. *Pomorstvo*. 25 (1), pp. 45–69.
61. Zhou, P. & Kang, H. (2008) Study on Berth and Quay-crane Allocation under Stochastic Environments in Container Terminal. *Systems Engineering - Theory & Practice*. 28 (1), pp. 161–169.

62. Zhu, Y. & Lim, A. (2005) Crane scheduling with non-crossing constraint. *Journal of the Operational Research Society*. 57 (12), pp. 1464–1471.
63. Zhu, Yi & Lim, A. (2011) *Crane Scheduling with Spatial Constraints: Mathematical Model and Solving Approaches*.

BIBLIOGRAFIJA

Knjige:

1. Alderton, P. (1999) *Port management and operations*. London: LLP Reference Pub.
2. Anon (2010) *Lingo user's guide*. Lindo Systems inc.
3. Blanchard, B.S. (2004) *System engineering management*. Hoboken, NJ: John Wiley.
4. Bohrer, P. (2008) *Crane Scheduling in Container Terminals*. VDM Verlag.
5. Böse, J.W. (n.d.) *Handbook of Terminal Planning*.
6. Bošnjak, I. & Badanjak, D. (2005) *Osnove prometnog inženjerstva*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti.
7. Brinkmann, B. (2005) *Seehafen Planung und Entwurf*. Berlin: Springer.
8. Dai, J., Lin, W., Moorthy, R. & Teo, C.-P. (2008) Berth Allocation Planning Optimization in Container Terminals. In: Christopher S. Tang, Chung-Piaw Teo, & Kwok-Kee Wei (eds.). *Supply Chain Analysis*. Boston, MA: Springer US. pp. 69–104.
9. Dundović, Č. (2003) *Pomorski sustav i pomorska politika*. Rijeka: Pomorski fakultet u Rijeci.
10. Dundović, Č. (2002) *Lučki terminali*. Rijeka: Pomorski fakultet u Rijeci.
11. Dundović, Č. (2001) *Tehnološki procesi u prometu*. Rijeka: Sveučilište u Rijeci.
12. Dundović, Č. & Kesić, B. (2001) *Tehnologija i organizacija luka*. Rijeka: Pomorski fakultet u Rijeci.
13. Eiben, A.E. & Smith, J.E. (2003) *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer.
14. Gen, M., Cheng, R. & Lin, L. (2008) *Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach*. Springer.
15. Hamming, R.W. & Hamming, R.W. (1973) *Numerical Methods for Scientists and Engineers*. Courier Dover Publications.
16. Heragu, S.S. (2008) *Facilities Design*. CRC Press.
17. Jones, O., Maillardet, R. & Robinson, A. (2009) *Introduction to Scientific Programming and Simulation Using R*. Boca Raton FL: Taylor & Francis Group, LLC.
18. Kirinčić, J. (1991) *Luke i terminali*. Sveučilište u Rijeci. Školska knjiga. Zagreb
19. Maritime Navigation Commission (2008) *Life Cycle Management of Port Structures: Recommended Practice for Implementation*. PIANC.

20. Matoušek, J. & Gärtner, B. (2007) *Understanding and Using Linear Programming*. Springer.
21. Meisel, F. (2009) *Seaside Operations Planning in Container Terminals*. Springer.
22. Michalewicz, Z. & Fogel, D.B. (2004) *How To Solve It: Modern Heuristics*. Springer.
23. Pašagić, H. (1998) *Matematičko modeliranje i teorija grafova*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti.
24. Roelofs, M. & Bisschop, J. (2010a) *AIMMS Language Reference*. Haarlem: Paragon Decision Technology B.V.
25. Roelofs, M. & Bisschop, J. (2010b) *AIMMS Optimization Modeling*. Haarlem: Paragon Decision Technology B.V.
26. Schneider, J.J. & Kirkpatrick, S. (2006) *Stochastic Optimization*. Springer.
27. Schrage, L. (2009) *Optimization Modeling with Lingo*. Lindo Systems.
28. Thoresen, C.A. (2010) *Port Designer's Handbook*. Thomas Telford.
29. Tsinker, G.P. (2004) *Port engineering : planning, construction, maintenance, and security*. Hoboken, N.J.: Wiley.
30. United Nations Conference on Trade and Development (1985) *Port Development: A Handbook for Planners in Developing Countries*. 2nd edition. United Nations Pubns.
31. Vazirani, V.V. (2001) *Approximation Algorithms*. Springer.
32. Zenzerović, Z. (2003) *Teorija redova čekanja*. Autorizirana predavanja. Rijeka: Pomorski fakultet u Rijeci.

Radovi u znanstvenim časopisima i zbornicima:

1. Allahverdi, A., Ng, C.T., Cheng, T.C.E. & Kovalyov, M.Y. (2008) A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*. 187 (3), pp. 985–1032.
2. Balin, S. (2011) Non-identical parallel machine scheduling using genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*. 38 (6), pp. 6814–6821.
3. Barros, V.H., Costa, T.S., Oliveira, A.C.M. & Lorena, L.A.N. (2011) Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints. *Computers & Industrial Engineering*. 60 (4), pp. 606–613.
4. Beškovnik, B. & Tvrđy, E. (2009) Productivity simulation model for optimization of Maritime Container Terminals. *Transport Problems*. 4 (3), pp. 113–122.

5. Bierwirth, C. & Meisel, F. (2009) A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints. *Journal of Scheduling*. 12 (4), pp. 345–360.
6. Bierwirth, C. & Meisel, F. (2010) A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*. 202 (3), pp. 615–627.
7. Buhrkal, K., Zuglian, S., Ropke, S., Larsen, J. & Lusby, R. (2011) Models for the discrete berth allocation problem: A computational comparison. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 47 (4), pp. 461–473.
8. Canonaco, P., Legato, P., Mazza, R.M. & Roberto Musmanno (2008) A queuing network model for the management of berth crane operations. *Computers & Operations Research*. 35 (8), pp. 2432–2446.
9. Cartenì, A. & Luca, S. de (2012) Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 21 (1), pp. 123–145.
10. Chang, D., Jiang, Z., Yan, W. & He, J. (2010) Integrating berth allocation and quay crane assignments. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 46 (6), pp. 975–990.
11. Chao, S.-L. & Lin, Y.-J. (2011) Evaluating advanced quay cranes in container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 47 (4), pp. 432–445. [Accessed 18 April 2012].
12. Chen, J. & Yahalom, S. (2013) Container Slot Co-Allocation Planning with Joint Fleet Agreement in a Round Voyage for Liner Shipping. *Journal of Navigation*. 66 (04), pp. 589–603.
13. Chen, J.H., Lee, D.-H. & Cao, J.X. (2011) Heuristics for quay crane scheduling at indented berth. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 47 (6), pp. 1005–1020.
14. Chen, L., Bostel, N., Dejax, P., Cai, J. & Xi, L. (2007) A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal. *European Journal of Operational Research*. 181 (1), pp. 40–58.
15. Cheong, C.Y., Tan, K.C., Liu, D.K. & Lin, C.J. (2008) Multi-objective and prioritized berth allocation in container ports. *Annals of Operations Research*. 180 (1), pp. 63–103.
16. Chung, S.H. & Choy, K.L. (2012) A modified genetic algorithm for quay crane scheduling operations. *Expert Systems with Applications*. 39 (4), pp. 4213–4221.
17. Cordeau, J.-F., Laporte, G., Legato, P. & Moccia, L. (2005) Models and Tabu Search Heuristics for the Berth-Allocation Problem. *Transportation Science*. 39 (4), pp. 526–538.

18. Daganzo, C.F. (1989) The crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*. 23 (3), pp. 159–175.
19. Du, Y., Chen, Q., Quan, X., Long, L. & Fung, R.Y.K. (2011) Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 47 (6), pp. 1021–1037.
20. Dundović, Č. & Hess, S. (2005) Exploitability of the Port Container Terminal Stacking Area Capacity in the Circumstances of Increased Turnover. In: *Zbornik referatov - Intelligent transport systems - ITS*. 2005 Ljubljana: Elektrotehniška zveza Slovenije.
21. Dundović, Č., Kolanović, I. & Grubišić, N. (2011) Integralni pristup planiranju riječkog lučkog sustava. *Suvremeni promet*. 31 (5-6), pp. 502–509.
22. Dundović, Č. & Neven Grubišić (1998) Tehničko-tehnološki parametri vrednovanja prekrcajnih sredstava na kontejnerskim terminalima. *Zbornik radova Pomorskog fakulteta*. 12, pp. 3–19.
23. Dundović, Č. & Zenzerović, Z. (2000) An Optimal Capacity Planning Model for General Cargo Seaport. *Promet-Traffic-Traffico*. 12, pp. 217–221.
24. Equi, L., Gallo, G., Marziale, S. & Weintraub, A. (1997) A combined transportation and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 97 (1), pp. 94–104.
25. Giallombardo, G., Moccia, L., Salani, M. & Vacca, I. (2010) Modeling and solving the Tactical Berth Allocation Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*. 44 (2), pp. 232–245.
26. Golbabaie, F., Seyedalizadeh Ganji, S.R. & Arabshahi, N. (2012) Multi-criteria evaluation of stacking yard configuration. *Journal of King Saud University - Science*. 24 (1), pp. 39–46.
27. Golias, M.M., Boile, M. & Theofanis, S. (2009) Berth scheduling by customer service differentiation: A multi-objective approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 45 (6), pp. 878–892.
28. Grubišić, N. & Dundović, Č. (2011) Primjena sistemskog inženjeringa u planiranju lučkih terminala. *Pomorstvo*. 25 (1), pp. 189–207.
29. Guan, Y. & Cheung, R.K. (2004) The berth allocation problem: models and solution methods. *OR Spectrum*. 26 (1), pp. 75–92.
30. Gudelj, A., Krčum, M. & Twrđy, E. (2010) Models and Methods for Operations in Port Container Terminals [online]. *Promet - Traffic&Transportation*. 22 (1).
31. Han, X., Lu, Z. & Xi, L. (2010) A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time. *European Journal of Operational Research*. 207 (3), pp. 1327–1340.

32. Van Hee, K.M. & Wijbrands, R.J. (1988) Decision support system for container terminal planning. *European Journal of Operational Research*. 34 (3), pp. 262–272.
33. Hendriks, M.P.M., Armbruster, D., Laumanns, M., Lefeber, E. & Udding, J.T. (2011) Strategic allocation of cyclically calling vessels for multi-terminal container operators. *Flexible Services and Manufacturing Journal*.
34. Hess, S. & Hess, M. (2009) Optimization of Ship's Operations by Genetic Algorithm. *Promet - Traffic & Transportation*. 21 (4), pp. 239–245.
35. Imai, A., Chen, H.C., Nishimura, E. & Papadimitriou, S. (2008) The simultaneous berth and quay crane allocation problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 44 (5), pp. 900–920.
36. Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M. & Papadimitriou, S. (2007a) Berth allocation at indented berths for mega-containerships. *European Journal of Operational Research*. 179 (2), pp. 579–593.
37. Imai, A., Nishimura, E. & Papadimitriou, S. (2003) Berth allocation with service priority. *Transportation Research Part B: Methodological*. 37 (5), pp. 437–457.
38. Imai, A., Nishimura, E. & Papadimitriou, S. (2001) The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research Part B: Methodological*. 35 (4), pp. 401–417.
39. Imai, A., Sun, X., Nishimura, E. & Papadimitriou, S. (2005) Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. *Transportation Research Part B: Methodological*. 39 (3), pp. 199–221.
40. Imai, A., Zhang, J.-T., Nishimura, E. & Papadimitriou, S. (2007b) The Berth Allocation Problem with Service Time and Delay Time Objectives. *Maritime Economics & Logistics*. 9 (4), pp. 269–290.
41. Jin, Z. & Li, N. (2011) Optimization of Quay Crane Dynamic Scheduling Based on Berth Schedules in Container Terminal. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 11 (3), pp. 58–64.
42. Jung, S.H. & Kim, K.H. (2006) Load scheduling for multiple quay cranes in port container terminals. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 17 (4), pp. 479–492.
43. Kim, K.H. & Moon, K.C. (2003) Berth scheduling by simulated annealing. *Transportation Research Part B: Methodological*. 37 (6), pp. 541–560.
44. Kim, K.H. & Park, Y.-M. (2004) A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal of Operational Research*. 156 (3), pp. 752–768.
45. Kos, S., Hess, M. & Hess, S. (2006) Simulation Method in Modelling Exploitation Factors of Sea Port Queuing Systems. *Pomorstvo*. 20, pp. 67–85.
46. Kos, S. & Zenzerović, Z. (2004) Model of optimal cargo transport structure by full container ship on predefined sailing route. *Promet-Traffic-Traffico*. 16, pp. 15–20.

47. Kos, S. & Zenzerović, Z. (2003) Modelling the Transport Process in Marine Container Technology. *Promet-Traffic-Traffico*. 15, pp. 13–17.
48. Kozan, E. (1997) Comparison of analytical and simulation planning models of seaport container terminals. *Transportation Planning and Technology*. 20 (3), pp. 235–248.
49. Lau, H.Y.K. & Zhao, Y. (2008) Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals. *International Journal of Production Economics*. 112 (2), pp. 665–682.
50. Lee, B.K. & Kim, K.H. (2010) Optimizing the block size in container yards. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 46 (1), pp. 120–135.
51. Lee, D.-H., Chen, J.H. & Cao, J.X. (2010) The continuous Berth Allocation Problem: A Greedy Randomized Adaptive Search Solution. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 46 (6), pp. 1017–1029.
52. Lee, D.-H., Jin, J.G. & Chen, J.H. (2012) Terminal and yard allocation problem for a container transshipment hub with multiple terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 48 (2), pp. 516–528.
53. Lee, D.-H., Wang, H.Q. & Miao, L. (2008) Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 44 (1), pp. 124–135.
54. Lee, Y. & Chen, C.-Y. (2009) An optimization heuristic for the berth scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 196 (2), pp. 500–508.
55. Legato, P. & Mazza, R.M. (2001) Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation. *European Journal of Operational Research*. 133 (3), pp. 537–547.
56. Lim, A. (1998) The berth planning problem. *Operations Research Letters*. 22 (2-3), pp. 105–110.
57. Lim, A., Rodrigues, B., Xiao, F. & Zhu, Y. (2004) Crane scheduling with spatial constraints. *Naval Research Logistics*. 51 (3), pp. 386–406.
58. Lim, A., Rodrigues, B. & Xu, Z. (2007) A m-parallel crane scheduling problem with a non-crossing constraint. *Naval Research Logistics (NRL)*. 54 (2), pp. 115–127.
59. Liu, C.-I., Jula, H. & Ioannou, P.A. (2002) Design, simulation, and evaluation of automated container terminals. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 3 (1), pp. 12–26.
60. Liu, J., Wan, Y. & Wang, L. (2005) Quay crane scheduling at container terminals to minimize the maximum relative tardiness of vessel departures. *Naval Research Logistics (NRL)*. 53 (1), pp. 60–74.

61. Lodi, A., Martello, S. & Monaci, M. (2002) Two-dimensional packing problems: A survey. *European Journal of Operational Research*. 141 (2), pp. 241–252.
62. Lu, Z., Han, X., Xi, L. & Erera, A.L. (2012) A heuristic for the quay crane scheduling problem based on contiguous bay crane operations. *Computers & Operations Research*.
63. Mauri, G.R., Oliveira, A.C.M. & Lorena, L.A.N. (2008) A hybrid column generation approach for the berth allocation problem. In: *Proceedings of the 8th European conference on Evolutionary computation in combinatorial optimization*. EvoCOP'08. 2008 Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. pp. pp. 110–122.
64. Meisel, F. & Bierwirth, C. (2011) A unified approach for the evaluation of quay crane scheduling models and algorithms. *Computers & Operations Research*. 38 (3), pp. 683–693.
65. Meisel, F. & Bierwirth, C. (2009) Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 45 (1), pp. 196–209.
66. Moorthy, R. & Teo, C.-P. (2006) Berth management in container terminal: the template design problem. *OR Spectrum*. 28 (4), pp. 495–518.
67. Murty, K.G., Liu, J., Wan, Y. & Linn, R. (2005) A decision support system for operations in a container terminal. *Decision Support Systems*. 39 (3), pp. 309–332.
68. Nam, K.-C. & Ha, W.-I. (2001) Evaluation of Handling Systems for Container Terminals. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 127 (3), pp. 171.
69. Nishimura, E., Imai, A. & Papadimitriou, S. (2001) Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*. 131 (2), pp. 282–292.
70. Pang, K.-W., Xu, Z. & Li, C.-L. (2011) Ship routing problem with berthing time clash avoidance constraints. *International Journal of Production Economics*. 131 (2), pp. 752–762.
71. Park, K., Lee, K., Park, S. & Kim, S. (1996) Modeling and solving the spatial block scheduling problem in a shipbuilding company. *Computers & Industrial Engineering*. 30 (3), pp. 357–364.
72. Park, N.-K. & Dragović, B. (2009) A Study of Container Terminal Planning. *FME Transactions*. 37 (4), pp. 203–209.
73. Park, Y.-M. & Kim, K.H. (2003) A scheduling method for Berth and Quay cranes. *OR Spectrum*. 25 (1), pp. 1–23.
74. Petering, M.E.H. & Murty, K.G. (2009) Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at a seaport container transshipment terminal. *Computers & Operations Research*. 36 (5), pp. 1711–1725.

75. Raa, B., Dullaert, W. & Schaeren, R.V. (2011) An enriched model for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem. *Expert Systems with Applications*.
76. Radmilovic, Z. & Jovanovic, S. (2006) Berth Occupancy at Container Terminals: Comparison of Analytical and Empirical Results. *Promet Traffic-Traffico*. 18 (2).
77. Salido, M.A., Rodriguez-Molins, M. & Barber, F. (2012) A decision support system for managing combinatorial problems in container terminals. *Knowledge-Based Systems*. 29, pp. 63–74.
78. Salido, M.A., Rodriguez-Molins, M. & Barber, F. (2011) Integrated intelligent techniques for remarshaling and berthing in maritime terminals. *Advanced Engineering Informatics*. 25 (3), pp. 435–451.
79. Saurí, S. & Martín, E. (2011) Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 47 (6), pp. 1038–1057.
80. Schonfeld, P. & Sharafeldien, O. (1985) Optimal Berth and Crane Combinations in Containerports. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 111 (6), pp. 1060–1072.
81. Shao, X., Li, X., Gao, L. & Zhang, C. (2009) Integration of process planning and scheduling—A modified genetic algorithm-based approach. *Computers & Operations Research*. 36 (6), pp. 2082–2096.
82. Silberholz, M.B., Golden, B.L. & Baker, E.K. (1991) Using simulation to study the impact of work rules on productivity at marine container terminals. *Computers & Operations Research*. 18 (5), pp. 433–452.
83. Song, L., Cherrett, T. & Guan, W. (2012) Study on berth planning problem in a container seaport: Using an integrated programming approach. *Computers & Industrial Engineering*. 62 (1), pp. 119–128.
84. Steenken, D., Voss, S. & Stahlbock, R. (2004) Container terminal operation and operations research - a classification and literature review. *OR Spectrum*. 26 (1), pp. 3–49.
85. Sun, Z., Lee, L.H., Chew, E.P. & Tan, K.C. (2012) MicroPort: A general simulation platform for seaport container terminals. *Advanced Engineering Informatics*. 26 (1), pp. 80–89.
86. Sung, C.S. & Juhn, J. (2009) Makespan minimization for a 2-stage assembly scheduling problem subject to component available time constraint. *International Journal of Production Economics*. 119 (2), pp. 392–401.
87. Tavakkoli-Moghaddam, R., Makui, A., Salahi, S., Bazzazi, M. & Taheri, F. (2009) An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports. *Computers & Industrial Engineering*. 56 (1), pp. 241–248.

88. Thi, M.-H.P., Ryu, K. & Kim, H. (2012) Comparing Cycle Times of Advanced Quay Cranes in Container Terminals. In: *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference*. 2012 Patong Beach, Phuket.
89. Twrdy, E. (2004) Container Traffic in European Ports. *Promet - Traffic & Transportation*. 16 (2).
90. Twrdy, E. & Beškovnik, B. (2008) Planning and decision - making to increase productivity on a Maritime Container Terminal. *Promet - Traffic & Transportation*. 20 (5), pp. 335–341.
91. Vallada, E. & Ruiz, R. (2011) A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times. *European Journal of Operational Research*. 211 (3), pp. 612–622.
92. Vis, I.F.A. & de Koster, R. (2003) Transshipment of Containers at a Container Terminal: An Overview. *European Journal of Operational Research*. 147 (1), pp. 1–16.
93. Xu, D., Li, C.-L. & Leung, J.Y.-T. (2012) Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels. *European Journal of Operational Research*. 216 (1), pp. 47–56.
94. Yang, C., Wang, X. & Li, Z. (2012) An optimization approach for coupling problem of berth allocation and quay crane assignment in container terminal. *Computers & Industrial Engineering*. 63 (1), pp. 243–253.
95. Yuan, S., Skinner, B.T., Huang, S., Liu, D.K., Dissanayake, G., Lau, H. & Pagac, D. (2011) A job grouping approach for planning container transfers at automated seaport container terminals. *Advanced Engineering Informatics*. 25 (3), pp. 413–426.
96. Zenzerović, Z. (2005) Kvantitativne metode u funkciji optimalnog funkcioniranja sustava kontejnerskoga prijevoza morem [online]. *Pomorski zbornik*.
97. Zenzerović, Z. & Bešlić, S. (2003) Contribution to the Optimization of the Cargo Transportation Problem. *Promet-Traffic-Traffico*. 15, pp. 65–115.
98. Zenzerović, Z. & Poletan, T. (1997) Utjecaj propusne moći pristana na efikasnost lučkog kontejnerskog terminala. *Pomorski zbornik*. 35, pp. 57–72.
99. Zenzerović, Z. & Vilke, S. (2011) Teorija redova čekanja u funkciji planiranja kapaciteta kontejnerskog terminala riječke luke. *Pomorstvo*. 25 (1), pp. 45–69.
100. Zhang, C., Liu, J., Wan, Y., Murty, K.G. & Linn, R.J. (2003) Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B: Methodological*. 37 (10), pp. 883–903.
101. Zhen, L. & Chang, D.-F. (2012) A bi-objective model for robust berth allocation scheduling. *Computers & Industrial Engineering*. 63 (1), pp. 262–273.

102. Zhen, L., Lee, L.H. & Chew, E.P. (2011) A decision model for berth allocation under uncertainty. *European Journal of Operational Research*. 212 (1), pp. 54–68.
103. Zhou, P. & Kang, H. (2008) Study on Berth and Quay-crane Allocation under Stochastic Environments in Container Terminal. *Systems Engineering - Theory & Practice*. 28 (1), pp. 161–169.
104. Zhou, P., Wang, K., Kang, H. & Jia, J. (2006) *Study on Berth Allocation Problem with Variable Service Priority in Multi-user Container Terminal*. 2006 Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference.
105. Zhu, Y. & Lim, A. (2005) Crane scheduling with non-crossing constraint. *Journal of the Operational Research Society*. 57 (12), pp. 1464–1471.

Doktorske disertacije, izvještaji i ostali rukopisi:

1. Čedomir Ivaković (1990) *Model kontejnerskog terminala u funkciji integralnog transporta*. Zagreb.
2. Henesey, L.E. & Blekinge tekniska högskola (2004) *Enhancing container terminal performance : a multi agent systems approach*. Ronneby: School of Engineering, Blekinge Institute of Technology.
3. Meersmans, P.J.. & Dekker, R. (2001) *Operations research supports container handling*.
4. Rashidi, H. & Tsang, E.P.K. (2006) *Container Terminals: Scheduling Decisions, their Formulation and Solutions*.
5. Zenzerović, Z. (1995) *Optimizacijski modeli planiranja kapaciteta morskih luka*. Rijeka: Sveučilište u Rijeci.
6. Zhu, Yi & Lim, A. (2011) *Crane Scheduling with Spatial Constraints: Mathematical Model and Solving Approaches*.

POPIS TABLICA

1. Razvoj kontejnerskih brodova	21
2. Varijacije BAP problema ovisno o funkciji cilja	47
3. Ulazni podaci za problem raspodjele vezova (<i>Primjer 1</i>)	50
4. Ulazni parametri o brodovima koji se očekuju na terminalu	63
5. Rješenje integriranog BAP i QCAP problema (<i>Primjer 2</i>)	63
6. Ulazni podaci i rješenje QCSP problema za <i>Primjer 3</i>	76
7. Ulazni podaci i rješenje QCSP problema za <i>Primjer 3a</i>	78
8. <i>Primjer 5</i> ulazni podaci	110
9. <i>Primjer 5</i> izlazni podaci – rješenje modela	111
10. <i>Primjer 5a</i> izlazni podaci – rješenje modela	113
11. <i>Primjer 5b</i> izlazni podaci – rješenje modela	115
12. <i>Primjer 5c</i> izlazni podaci – rješenje modela	116
13. <i>Primjer 5</i> ulazni podaci za drugo plansko razdoblje	117
14. <i>Primjer 5</i> izlazni podaci za rješenje modela kod prijelaza planskih razdoblja	119
15. Karakteristične veličine generirane prema tipskim brodovima	121
16. Odnos frekvencije dolazaka brodova i godišnjeg prometa terminala	126
17. Scenariji dobiveni rješenjem QCSP problema za 30 brodova u sustavu	130
18. Rezultati integriranog modela optimizacije za $\lambda=3.2$, seed=400	138
19. Rezultati integriranog modela optimizacije za $\lambda=3.5$, seed=400	139
20. Rezultati integriranog modela optimizacije za $\lambda=3.2$, seed=700	140
21. Rezultati integriranog modela optimizacije za $\lambda=3.5$, seed=700	141
22. Veličine identifikatora i njihovih domena	147
23. Utjecaj ograničenja na vrijeme rješavanja modela	148
24. Podaci o veličini i kapacitetu broda	200
25. Raspored tereta po brodskim pozicijama	203

POPIS SLIKA

1. Modeli brodova: Ideal-X – prvi prenamijenjeni brod za prijevoz kontejnera (1956.) i Maersk Triple-E (2013.) najnovija klasa kontejnerskih brodova.....	20
2. Kapaciteti flote 20 najvećih kontejnerskih brodara za 2013. godinu.....	22
3. Zone kontejnerskog terminala i tijek procesa	23
4. Obalne i RTG kontejnerske dizalice	25
5. Prijevozno-prekrcajna sredstva: <i>straddle carrier</i> i kamion s prikolicom.....	26
6. Standardni logistički problemi na LKT	29
7. Nomogram za proračun površine slagališta kontejnerskog terminala.....	36
8. Raspodjela vremena boravka broda u luci.....	43
9. Primjer označavanja kontejnerskog pristana	44
10. Grafički prikaz BAP problema.....	45
11. Grafičko rješenje BAP problema - <i>Primjer 1</i>	51
12. Vrijednost varijabli odlučivanja ovisno o položaju brodova.....	53
13. Dozvoljene pozicije broda na pristanu s obzirom na ograničenje dubine.....	62
14. Rješenje integriranog BAP i QCAP problema bez ograničenja dubine.....	64
15. Rješenje integriranog BAP i QCAP problema s ograničenjem dubine $[h_1, h_8] = 14, [h_9, h_{30}] = 20$	65
16. Označavanje kontejnerskih odjeljaka brodu (<i>bays</i>)	67
17. Rješenje QCSP problema s prekrcajnim klasterima i 3 obalne kontejnerske dizalice za Primjer 3.....	77
18. Rješenje za Primjer 3a.....	79
19. Operativne zone i dopuštena zona kretanja dizalica.....	80
20. Dva različita rješenja istog QCSP problema s dvosmjernim kretanjem (lijevo) i jednosmjernim kretanjem (desno) obalnih dizalica	83
21. Utjecaj razdvajanje zadatka na iskorištenje kapaciteta dizalica.....	85
22. Rješenje QCSP problema s jednosmjernim kretanjem dizalica uz dijeljenje zadatka	92
23. Prostorna dispozicija kontejnerskog terminala s nezavisnim pristanima	93
24. Proces optimizacije tehnoloških procesa obalnog prekrcajnog podsustava kontejnerskog terminala	97
25. Dobivanje operativnih scenarija rješavanjem QCSP problema.....	98

26. Prijelaz između dva razdoblja planiranja	106
27. Primjer 5 grafičko rješenje	112
28. Primjer 5a grafičko rješenje.....	114
29. Primjer 5b grafičko rješenje	115
30. Primjer 5c grafičko rješenje	116
31. Primjer 5 - rješenje kod prijelaza na sljedeće plansko razdoblje	118
32. Podjela pozicija na klastere.....	124
33. Frekvencija dolazaka brodova dobivena simulacijom za $\lambda=3.2$	127
34. Frekvencija dolazaka brodova dobivena simulacijom za $\lambda=3.5$	128
35. Učinak dijeljenja zadataka i broja dizalica na trajanje procesa.....	132
36. Rješenje QCSP modela za brod V24 s 3 dizalice	133
37. Rješenje QCSP modela za brod V1 s 3 dizalice.....	134
38. Rješenje QCSP modela za brod V18 s 4 dizalice	134
39. Rezultat modela s dijeljenim zadacima za brod V24 u varijanti s 3 dizalice.....	135
40. Optimalno rješenje BAP i QCAP modela za grupu N15-1 ($\lambda=3.2$, seed=400)	143
41. Optimalno rješenje BAP i QCAP modela za grupu N15-2 ($\lambda=3.2$, seed=400)	143
42. Korelacija vremena izvršenja modela i razdiobe dolazaka brodova	145
43. Distribucija dolazaka i veličina brodova	146
44. Raspodjela vremena rada dizalica za slučaj N20-2 nakon relaksacije	149
45. Rezultat za slučaj N20-2 uz varijantu ranijeg dolaska i ograničenje čekanja.....	150
46. Raspodjela vremena rada dizalica za slučaj N20-2 uz prilagodbu vremena dolazaka brodova i ograničenje vremena čekanja	151
47. Graf procesa dobivanja optimalnog rješenja za slučaj N20-2 s tri varijacije	152

PRIVITAK 1: PROGRAMSKE SKRIPTE

LINGO – Integrirani model optimizacije uz ograničenje dubine mora

[illegible]

```

);

@FOR (BRODOVI (i): @SUM (VRIJEME (t): r (i,t)) = ZAVRSETAK (i) - POCETAK (i));

@FOR (BRODOVI (i):
    @FOR (VRIJEME (t):
        (t+1)*r (i,t) <= ZAVRSETAK (i)
    )
);

@FOR (BRODOVI (i):
    @FOR (VRIJEME (t):
        t*r (i,t) + H*(1-r (i,t)) >= POCETAK (i)
    )
);

@FOR (BRODOVI (i): ZAVRSETAK (i) - POCETAK (i) - OPERACIJE (i) = 0);
@FOR (BRODOVI (i): DOLAZAK (i) + CEKANJE (i) + OPERACIJE (i) = ODLAZAK (i));
@FOR (BRODOVI (i): POCETAK (i) >= DOLAZAK (i));
@FOR (BRODOVI (i): ZAVRSETAK (i) <= ODLAZAK (i));
@FOR (BRODOVI (i):
    @FOR (BRODOVI (j)| j #NE# i : VEZ (j)+ M*(1-Y (i,j)) >= VEZ (i) + DULJINA (i))
);
@FOR (BRODOVI (i):
    @FOR (BRODOVI (j)| j #NE# i : POCETAK (j)+ M*(1-Z (i,j)) >= ZAVRSETAK (i))
);
@FOR (BRODOVI (i):
    @FOR (BRODOVI (j)| j #NE# i : Y (i,j)+Y (j,i)+Z (i,j)+Z (j,i) >= 1)
);

!Uspostavlja odnos između varijabli X(i,p) i VEZ(i) radi postavljanja ograničenja dubine na
pristanu;
@FOR (BRODOVI (i):
    @SUM (PRISTAN (p): X (i,p)) = 1
);
@FOR (BRODOVI (i):
    @SUM (PRISTAN (p): X (i,p)*p*W (i,p)) = VEZ (i)
);
!Zbijanje domene funkcije radi bržeg nalaženja optimuma;
@FOR (BRODOVI (i): CEKANJE (i) >= 0);
@FOR (BRODOVI (i): OPERACIJE (i) >= NAJKRA (i));

!Postavljanje donjih i gornjih granica vrijednosti varijabli;
@FOR (BRODOVI (i): @BND (1, VEZ (i), (L-DULJINA (i)+1)));
@FOR (BRODOVI (i): @BND (1, POCETAK (i), H));
@FOR (BRODOVI (i): @BND (1, ZAVRSETAK (i), H));

END

```


LINGO – QCSP s dvosmjernim kretanjem dizalica bez dijeljenja zadatka

```
!RASPORED OBALNIH KONTEJNERSKIH DIZALICA ZA PREKRCAJNE OPERACIJE NA BRODU;  
!Funkcija optimizacije definirana je kao minimum vremena dovršetka operacija i završetka rada  
dizalica;  
!Uzeto u obzir: uvjetovani slijed operacija, ometanje-razmak dizalica, nemogućnost  
pretjecanja, najranija dostupnost dizalice, grupiranje zadataka;
```

```
DATA:  
T = 7;           !Broj prekrcajnih zadataka;  
N = 3;           !Broj dizalica;  
SAFEDIST = 10;   !Razmak izmedju dviju dizalica (bays);  
UPLIMIT = 120;   !Gornja granica (prema krmi) za položaj dizalice;  
DOWNLIMIT = -10; !Donja granica (prema provi) za položaj dizalice;  
SPEED = 15;      !Brzina kretanja dizalice (bays/min);  
OMEGA1 = 1;      !Težinski koeficijent1;  
OMEGA2 = 0.01;   !Težinski koeficijent2;  
OMEGA3 = 1;      !Težinski koeficijent3;  
BUFFER = 0;      !Sigurnosni vremenski razmak;  
M = 1000;        !Velika cjelobrojna konstanta;  
ENDDATA  
  
SETS:  
TASK /1..T/: P, C, S, MBAY, LBAY, UBAY;           ! Index = i,j;  
DIZALICE /1..N/: W, FINISH, MOVETIME, IDLE, MUP, MDOWN; ! Index = k,l;  
RASDIZ(TASK,DIZALICE): X;                       ! Index = (i,k);  
TXT(TASK,TASK): Y, TRAVEL;                       ! Index = (i,j);  
PRETHUVJET(TASK,TASK);                          ! Index = (i,j);  
ENDSETS  
  
DATA:  
!           1   2   3   4   5   6   7;  
P           = 21  46  60  30  50  50  60; ! Trajanje operacija;  
LBAY        = 11  11  25  39  60  60  81;  
UBAY        = 13  13  31  49  70  70  87;  
PRETHUVJET = 1,2 5,6; ! Operacije koje moraju prethoditi jedna drugoj;  
ENDDATA  
  
CALC:  
@FOR(TASK(i): MBAY(i) = (LBAY(i)+UBAY(i))/2);  
@FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j): TRAVEL(i,j) = @ABS(MBAY(j)-MBAY(i))* (1/SPEED) ));  
!Relaksacija;  
BDN = @SUM(TASK(i): P(i))/N;  
BDT = @MAX(TASK: P);  
LB = @IF(BDN #GT# BDT, BDN, BDT);  
ENDCALC
```

```
!Funkcija određuje najraniji završetak prekrcajnih operacija i rada dizalica;  
MIN = OMEGA1*MAKESPAN + OMEGA2*@SUM(DIZALICE: FINISH - W) + OMEGA3*@SUM(DIZALICE: MOVETIME);
```

```
!Definira se varijabla odlučivanja MAKESPAN kao krajnje vrijeme završetka prekrcajnih  
operacija među dizalicama;
```

```
!ujedno se definira odnos između vremena početka i završetka pojedinih aktivnosti;
```

```
@FOR(TASK(i): C(i) <= MAKESPAN);  
@FOR(TASK(i): C(i) >= 0);  
@FOR(TASK(i): S(i) + P(i) = C(i));  
@FOR(DIZALICE(k): W(k) + IDLE(k) = FINISH(k));
```

```
!Osigurava da se svakoj operaciji dodjeljuje jedna dizalica;  
@FOR(TASK(i): @SUM(DIZALICE(k): X(i,k)) = 1);
```

```
!Određuje trajanje prekrcajnih operacija za svaku dizalicu (workload);  
@FOR(DIZALICE(k): @SUM(TASK(i): P(i)*X(i,k)) = W(k));
```

```
!Određuje vrijeme dovršetka rada pojedine dizalice;  
@FOR(DIZALICE(k): @FOR(TASK(i): C(i) - FINISH(k) <= M*(1-X(i,k)) ));
```

```
!Određuje donje i gornje granice u kojima je kretanje dizalica dopušteno;  
@FOR(TASK(i): @FOR(DIZALICE(k): M - M*X(i,k) + MUP(k) >= UBAY(i)*X(i,k) ));  
@FOR(TASK(i): @FOR(DIZALICE(k): M*X(i,k) - M + MDOWN(k) <= LBAY(i)*X(i,k) ));  
@FOR(DIZALICE(k): MDOWN(k) >= DOWNLIMIT);  
@FOR(DIZALICE(k): MUP(k) <= UPLIMIT);  
@FOR(DIZALICE(k): @FOR(DIZALICE(l) | k #LT# l: MDOWN(l) - MDOWN(k) >= (l-k)*SAFEDIST ));  
@FOR(DIZALICE(k): @FOR(DIZALICE(l) | k #LT# l: MUP(l) - MUP(k) >= (l-k)*SAFEDIST ));  
@FOR(DIZALICE(k): MUP(k) - MDOWN(k) <= SPEED* MOVETIME(k));
```

```

!Optimizira redoslijed operacija određujući najkraći put kretanja dizalica s obzirom na
lokaciju tereta - operacija;
@FOR(DIZALICE(k): @FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j): C(i) + TRAVEL(i,j) - S(j) <= M*(3-
(X(i,k)+X(j,k)+Y(i,j))) ));

!Definira se varijabla Y kojom se određuje da li se preklapaju vremena rada dviju operacija;
@FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j): C(i)+ BUFFER <= C(j)- P(j)+ M*(1 - Y(i,j)) ));
@FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j): M*Y(i,j)+ C(i)+ BUFFER > C(j)- P(j) ));

!Ne dozvoljava pretjecanje dizalica;
@FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j) | MBAY(i) #LT# MBAY(j):
    @SUM(DIZALICE(k): k*X(i,k)) - @SUM(DIZALICE(l): l*X(j,l)) + 1 <= M*(Y(i,j)+Y(j,i))
));
!Osigurava minimalni razmak između dizalica;
@FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j) | MBAY(i) #LT# MBAY(j):
    SAFEDIST*(@SUM(DIZALICE(l) | l #GT# 1 #AND# 1 #LE# N: l*X(j,l)) - @SUM(DIZALICE(k) | k
#GE# 1 #AND# k #LT# N: k*X(i,k))) <=
    (LBAY(j)-UBAY(i))+ M*(Y(i,j)+Y(j,i))
));
!Osigurava da se zadaci na istom bayu rade sukcesivno (ako nije zadan prethuvjet);
@FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j) | MBAY(i) #EQ# MBAY(j) #AND# i #NE# j: Y(i,j)+Y(j,i) = 1 ));

!Određuju se uvjeti za posebne slučajeve operacija;
@FOR(PRETHUVJET(i,j): C(i) <= C(j)- P(j));
@FOR(PRETHUVJET(i,j): Y(i,j)+ Y(j,i) = 1);

!Definiraju se binarne varijable;
@FOR(RASDIZ:@BIN(X));
@FOR(TXT:@BIN(Y));

DATA:
!@OLE('Users\Mateo\Dropbox\Doktorat\Work\qcsp_fulltask_3_v2.xlsx','MAKESPAN','OMEGA1','OMEGA2'
,'KRETANJE','FINISH','TASK','N','SAFEDIST','UPLIMIT','DOWNLIMIT','SPEED','P','UBAY','MBAY','LB
AY','X','W','S','CE')= MAKESPAN, OMEGA1, OMEGA2, KRETANJE, FINISH, TASK, N, SAFEDIST, UPLIMIT,
DOWNLIMIT, SPEED, P, UBAY, MBAY, LBAY, X, W, S, C;
ENDDATA

END

```

LINGO – QCSP s jednosmjernim kretanjem dizalica uz dijeljenje zadatka

```

!RASPORED OBALNIH KONTEJNERSKIH DIZALICA ZA PREKRCAJNE OPERACIJE NA BRODU;

DATA:
T = 7;           !Broj prekrcajnih zadataka;
N = 3;           !Broj dizalica;
SAFEDIST = 10;   !Razmak izmedju dviju dizalica (bays);
UPLIMIT = 120;  !Gornja granica (prema krmi) za položaj dizalice;
DOWNLIMIT = -10; !Donja granica (prema provi) za položaj dizalice;
SPEED = 15;      !Brzina kretanja dizalice (bays/min);
OMEGA1 = 1;      !Težinski koeficijent1;
OMEGA2 = 0.01;   !Težinski koeficijent2;
OMEGA3 = 1;      !Težinski koeficijent3;
BUFFER = 0;      !Sigurnosni vremenski razmak;
SPKOE = 1;       !Koeficijent dijeljenja zadatka;
M = 1000;        !Velika cjelobrojna konstanta;
ENDDATA

SETS:
TASK /1..T/: P, MBAY, LBAY, UBAY;   ! Index = i,j;
DIZALICE /1..N/: B, E, MOVETIME;   ! Index = k,l;
RASDIZ(TASK,DIZALICE): S, C, X, W; ! Index = (i,k), (i,l), (j,k), (j,l);
TXT(TASK,TASK): TRAVEL;             ! Index = (i,j);
PRETHUVJET(TASK,TASK);              ! Index = (i,j);
ENDSETS

DATA:
!
!      1      2      3      4      5      6      7;
P      = 21  46  60  30  50  50  60; ! Trajanje operacija;
LBAY    = 11  11  25  39  60  60  81;
UBAY    = 13  13  31  49  70  70  87;
PRETHUVJET = 1,2 5,6; ! Operacije koje moraju prethoditi jedna drugoj;
ENDDATA

CALC:
@FOR(TASK(i): MBAY(i) = (LBAY(i)+ UBAY(i))/ 2);
@FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j): TRAVEL(i,j) = @ABS(MBAY(j)- MBAY(i))* (1/SPEED) ));
ENDCALC

!Funkcija određuje najraniji zavrsetak prekrcajnih operacija i rada dizalica;
MIN = OMEGA1*MAKESPAN + OMEGA2*@SUM(RASDIZ: C - W) + OMEGA3*@SUM(DIZALICE: MOVETIME);

!Definira se varijabla odlučivanja MAKESPAN kao krajnje vrijeme završetka prekrcajnih operacija među dizalicama;
!ujedno se definira odnos između vremena početka i završetka pojedinih aktivnosti;
@FOR(TASK(i): @FOR(DIZALICE(k): C(i,k) <= MAKESPAN));
@FOR(TASK(i): @FOR(DIZALICE(k): W(i,k)+ S(i,k) = C(i,k) ));

!Ogranicenje za split task mode;
@FOR(TASK(i): @SUM(DIZALICE(k): W(i,k)) = P(i));
@FOR(TASK(i): @FOR(DIZALICE(k): W(i,k) <= P(i)*X(i,k) ));
@FOR(TASK(i): @FOR(DIZALICE(k): X(i,k) <= M*W(i,k) ));
@FOR(TASK(i): @FOR(DIZALICE(k): W(i,k) >= SPKOE*X(i,k) ));

!Jednosmjerno kretanje dizalica od prove do krme broda (jednosmjerno kretanje prema gore);
@FOR(TASK(i): @FOR(DIZALICE(k): M*X(i,k) - M + B(k) <= LBAY(i)*X(i,k) ));
@FOR(TASK(i): @FOR(DIZALICE(k): M - M*X(i,k) + E(k) >= UBAY(i)*X(i,k) ));

!Onemogućuje pretjecanje i osigurava sigurnosni razmak;
@FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j) | MBAY(i) #LE# MBAY(j): @FOR(DIZALICE(k): @FOR(DIZALICE(l) | k #LT# l:
C(j,k)-W(j,k) >= C(i,l)+ BUFFER+ TRAVEL(i,j)- M*(2-(X(j,k)+X(i,l)))
)))));
!Ako je razmak premali startaj donji zadatak nakon što se kompletira gornji zadatak;
@FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j) | MBAY(i) #LT# MBAY(j): @FOR(DIZALICE(k): @FOR(DIZALICE(l) | k #LT# l #AND# (LBAY(j)-UBAY(i)) #LT# (1-k)*SAFEDIST:
C(i,k)-W(i,k) >= C(j,l)+ BUFFER - M*(2-(X(i,k)+X(j,l)))
)))));
!Dizalica ne može istovremeno raditi na dvije aktivnosti;
@FOR(DIZALICE(k): @FOR(TASK(i): @FOR(TASK(j) | MBAY(i) #LE# MBAY(j) #AND# i #LT# j: C(j,k)-W(j,k) >= C(i,k) + BUFFER+ TRAVEL(i,j) - M*(2-(X(i,k)+X(j,k))) ));

!Određuje početnu i konačnu poziciju dizalica na pristanu, prijedeni put i smjer kretanja;
!ovisno o postavljenim granicama i sigurnosnom razmaku između dizalica;
@FOR(DIZALICE(k): (E(k)- B(k)) <= SPEED* MOVETIME(k));

```

```

@FOR(DIZALICE(k): @FOR(DIZALICE(l) | k #LT# l: B(l)- B(k) >= (l-k)*SAFEDIST ));
@FOR(DIZALICE(k): @FOR(DIZALICE(l) | k #LT# l: E(l)- E(k) >= (l-k)*SAFEDIST ));
@FOR(DIZALICE(k): B(k) >= DOWNLIMIT);
@FOR(DIZALICE(k): E(k) <= UPLIMIT);

!Određuju se uvjeti za posebne slučajeve operacija;
@FOR(PRETHUVJET(i,j): @FOR(DIZALICE(k): @FOR(DIZALICE(l): C(j,k)-W(j,k) >= C(i,l)+
TRAVEL(i,j)- M*(2-(X(j,k)+X(i,l))) ));

!Definiraju se domene varijabli;
@FOR(RASDIZ: W >= 0);
@FOR(RASDIZ: @BIN(X));
@FOR(DIZALICE: B >= 0);
@FOR(DIZALICE: E >= 0);

DATA:
!@OLE('Users\Mateo\Dropbox\Doktorat\Work\qcsp_onedir_share_2.xlsx','MAKESPAN','OMEGA1','OMEGA2
','KRETANJE','TASK','N','SAFEDIST','UPLIMIT','DOWNLIMIT','SPEED','P','UBAY','MBAY','LBAY','X',
'W','S','CE')= MAKESPAN, OMEGA1, OMEGA2, KRETANJE, TASK, N, SAFEDIST, UPLIMIT, DOWNLIMIT,
SPEED, P, UBAY, MBAY, LBAY, X, W, S, C;
ENDDATA

END

```

R - Generator brodova i tereta

```
1 #####
2 #####GENERATOR BRODOVA I TERETA#####
3 #####
4 rm(list = ls())
5 n <- as.numeric(readline("n = "))
6 sjeme <- 1300
7 vsl.size <- numeric(n)
8 l.bay <- 1
9 u.bay <- numeric(n)
10 l.cap <- numeric(n)
11 u.cap <- numeric(n)
12 cargo <- NA
13 task <- NA
14 #####Definiranje veličine brodova#####
15 velicina <- function(n,sjeme) {
16   set.seed(sjeme)
17   duljina <- runif(n)
18   vsl.size[duljina < 0.20] <- 3
19   vsl.size[duljina >= 0.20 & duljina < 0.40] <- 4
20   vsl.size[duljina >= 0.40 & duljina < 0.70] <- 5
21   vsl.size[duljina >= 0.70 & duljina < 0.90] <- 6
22   vsl.size[duljina >= 0.90] <- 7
23   return(vsl.size)
24 }
25 vsl.size <- velicina(n,sjeme)
26 #####Definiranje raspona pozicija i kapaciteta po pozicijama ovisno o veličini broda#####
27 for(i in 1:n) {
28   if (vsl.size[i] == 3) {
29     u.bay[i] <- 26
30     l.cap[i] <- 5
31     u.cap[i] <- 37
32   } else if (vsl.size[i] == 4) {
33     u.bay[i] <- 52
34     l.cap[i] <- 5
35     u.cap[i] <- 69
36   } else if (vsl.size[i] == 5) {
37     u.bay[i] <- 62
38     l.cap[i] <- 5
39     u.cap[i] <- 77
40   } else if (vsl.size[i] == 6) {
41     u.bay[i] <- 72
42     l.cap[i] <- 5
43     u.cap[i] <- 92
44   } else if (vsl.size[i] == 7) {
45     u.bay[i] <- 86
46     l.cap[i] <- 5
47     u.cap[i] <- 132
48   } else {
49     u.bay[i] <- 0
50   }
51 }
52 #####Definiranje broja zadataka#####
53 brojstiva <- function(n,sjeme) {
54   set.seed(sjeme)
55   x.bay <- round(runif(n, min=8, max=16))
56   return(x.bay)
57 }
58 x.bay <- brojstiva(n,sjeme)
59
60 #####Definiranje brodskih pozicija i kontejnera za ukrcaj/iskrcaj#####
61 ukupni.teret <- 0
62 for (i in 1:n) {
63   neparni.bay <- seq(1,u.bay[i],by=2)
64   parni.bay <- seq(2,u.bay[i],by=4)
65   poz.bay <- sort(c(neparni.bay, parni.bay))
66   nezavisni.bay <- sample(poz.bay, size=x.bay[i])
67   zavisni.bay <- sample(nezavisni.bay, size=rbinom(1,x.bay[i],0.1))
68   y.bay <- c(nezavisni.bay, zavisni.bay)
69   task[i] <- length(y.bay)
70   z <- runif(length(y.bay))
71   q.bay <- ifelse(z > 0.4, u.cap[i], round(z*2.5*u.cap[i]))
```

```

72 cargo[i] <- sum(q.bay)
73 #output
74 raspored.tereta <- data.frame(matrix(c(i,rep(NA,length(y.bay)-1), y.bay, q.bay), nrow=3,
byrow=T) )
75 write.table(raspored.tereta, sep="\t", append=TRUE, col.names=F, row.names=c("Vsl","Bay",
"TEU"),
na="-", fileEncoding="UTF-8", quote=F, file="/home/neno/UbuntuOne/R/tables/R_raspored_tereta")
76 }
77 #output
78 specifikacija.brodova <- data.frame(vsl.size, u.bay, u.cap, x.bay, task, cargo)
79 write.table(specifikacija.brodova, sep="\t", row.names=TRUE, col.names=TRUE, quote=FALSE,
file="/home/neno/UbuntuOne/R/tables/R_spec_brodova")
80 ukupni.teret <- sum(cargo)
81 ukupni.teret
82

```

R - Generator dolazaka brodova

```

1 #####Generator dolazaka brodova#####
2 rm(list=ls())
3 sjeme <- 700
4 #
5 set.seed(sjeme)
6 broj.dolazaka <- rpois(1260,3.5)
7 (dolasci <- broj.dolazaka[1:100])
8 #
9 set.seed(sjeme)
10 vremena.dolazaka <- rexp(1260,3.5)*24
11 (intervali <- round(vremena.dolazaka[1:100]))
12 (cumsum(intervali))
13 #
14 usporodba <- data.frame(dol=dolasci,int=intervali)
15 write.table(usporodba, file="razdioba_dolazaka", sep=" ", col.names=TRUE)
16 a <- cumsum(data.frame(time=intervali))
17 write.csv(a, file = "dolasci_brodova.csv")
18 #
19 par(mfrow=c(2,3))
20 hist(broj.dolazaka, col="dodgerblue", las=1, freq=T, ylim=c(0,300), xlab="pois(lambda =
3.5) seed=700",main="Dnevni broj dolazaka")
21 hist(vremena.dolazaka, col=heat.colors(9), las=1, freq=T, ylim=c(0,300), xlab="exp(lambda =
3.5) seed=700",main="Intervali dolazaka (sati)")
22

```

AIMMS - Integrirani model za nezavisne pristane

MAIN MODEL Main_bacap1

DECLARATION SECTION

MATHEMATICAL PROGRAM:

identifier : BacapNezavisni
objective : ObjFun
direction : minimize
constraints : AllConstraints
variables : AllVariables
type : Automatic ;

PARAMETER:

identifier : H
range : integer
property : Integer ;

PARAMETER:

identifier : Lmax
range : integer
property : Integer
initial data : 15 ; ;

PARAMETER:

identifier : N
text : "Broj brodova"
range : integer ;

VARIABLE:

identifier : Vez
index domain : i
range : [1, 20) ;

VARIABLE:

identifier : Y
index domain : (i,j) | j <> i
range : binary ;

VARIABLE:

identifier : Z
index domain : (i,j) | j <> i
range : binary ;

VARIABLE:

identifier : Pocetak
index domain : i
range : {1..H} ;

VARIABLE:

identifier : Zavrsetak
index domain : i
range : {1..H} ;

VARIABLE:

identifier : Cekanje
index domain : i
range : nonnegative ;

VARIABLE:

identifier : Ubrzanje
index domain : i
range : nonnegative ;

VARIABLE:

identifier : r
index domain : (i,t)

```

        range      : binary ;

VARIABLE:
    identifier  : X
    index domain : (i,p)
    range      : binary ;

VARIABLE:
    identifier  : opt
    index domain : (i,v)
    range      : binary ;

VARIABLE:
    identifier  : c
    index domain : (i,p,t,v)
    range      : binary ;

VARIABLE:
    identifier  : ObjFun
    range      : free
    definition  : sum[(i), Omega1(i)*Ubrzanje(i) + Omega2(i)*Cekanje(i)] +
sum[(i,v), Trajanje(i,v)*opt(i,v)] + sum[(i,p), X(i,p)*QWF(i,p)] ;

CONSTRAINT:
    identifier  : RanDol1
    index domain : i
    definition  : Pocetak(i) = Dolazak(i) - Ubrzanje(i) + Cekanje(i) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : MaksCek
    index domain : (i)
    definition  : Cekanje(i) <= 24 ;

CONSTRAINT:
    identifier  : RanDol2
    index domain : i
    definition  : Zavrsetak(i) - Pocetak(i) - sum[(v), Trajanje(i,v)*opt(i,v)]
= 0 ;

CONSTRAINT:
    identifier  : RanDol3
    index domain : (i)
    definition  : Pocetak(i) >= Najranije(i) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : ResursDizalica
    index domain : (t,p)
    definition  : sum[(i,v), c(i,p,t,v)*BrojDiz(i,v)] <= QCT(p) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : JednaVarijanta
    index domain : (i)
    definition  : sum[(v), opt(i,v)] = 1 ;

CONSTRAINT:
    identifier  : JedanTerminal
    index domain : (i)
    definition  : sum[(p), X(i,p)] = 1 ;

CONSTRAINT:
    identifier  : DuljinaPristana
    index domain : (i,p)
    definition  : Vez(i) + Duljina(i)-1 - LT(p) <= M*(1-X(i,p)) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : DefZaC1
    index domain : (i,p,t,v)
    definition  : c(i,p,t,v) >= (r(i,t)+ opt(i,v)+ X(i,p)- 2) ;

```



```

CONSTRAINT:
  identifier   : DefZaC2
  index domain : (i,p,t,v)
  definition   :  $3 * c(i,p,t,v) \leq (r(i,t) + opt(i,v) + X(i,p))$  ;

CONSTRAINT:
  identifier   : DefZaC3
  index domain : (i,t)
  definition   :  $sum[(p,v), c(i,p,t,v)] = r(i,t)$  ;

CONSTRAINT:
  identifier   : DefZaC4
  index domain : (i)
  definition   :  $sum[(v), Trajanje(i,v) * opt(i,v)] = sum[(p,t,v), c(i,p,t,v)]$ 
;

CONSTRAINT:
  identifier   : DefZavrsetak
  index domain : (i,t)
  definition   :  $(val(t)+1) * r(i,t) \leq Zavrsetak(i)$  ;

CONSTRAINT:
  identifier   : DefPocetak
  index domain : (i,t)
  definition   :  $val(t) * r(i,t) + M * (1 - r(i,t)) \geq Pocetak(i)$  ;

CONSTRAINT:
  identifier   : PreklapanjeY
  index domain : (i,j) |  $j \neq i$ 
  definition   :  $Vez(j) + M * (1 - Y(i,j)) \geq Vez(i) + Duljina(i)$  ;

CONSTRAINT:
  identifier   : PreklapanjeZ
  index domain : (i,j) |  $j \neq i$ 
  definition   :  $Pocetak(j) + M * (1 - Z(i,j)) \geq Zavrsetak(i)$  ;

CONSTRAINT:
  identifier   : UvjetPreklapanja
  index domain : (i,j,p) |  $j \neq i$ 
  definition   :  $Y(i,j) + Y(j,i) + Z(i,j) + Z(j,i) \geq X(i,p) + X(j,p) - 1$  ;

PARAMETER:
  identifier   : Trajanje
  index domain : (i,v)
  range       : free ;

PARAMETER:
  identifier   : Dolazak
  index domain : (i)
  range       : nonnegative ;

PARAMETER:
  identifier   : Duljina
  index domain : (i)
  range       : nonnegative ;

PARAMETER:
  identifier   : BrojDiz
  index domain : (i,v)
  range       : nonnegative ;

PARAMETER:
  identifier   : Najranije
  index domain : (i)
  range       : [1, inf) ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : Omega1
  index domain : (i)
  range       : free ;

PARAMETER:
  identifier   : Omega2
  index domain : (i)
  range       : free
  property    : Double ;

PARAMETER:
  identifier   : M
  range       : integer ;

PARAMETER:
  identifier   : LT
  index domain : p
  range       : integer ;

PARAMETER:
  identifier   : TW
  index domain : t
  range       : integer
  definition   : val(t) ;

PARAMETER:
  identifier   : QCT
  index domain : p
  range       : integer ;

PARAMETER:
  identifier   : QWF
  index domain : (i,p)
  range       : nonnegative ;

SET:
  identifier   : Vrijeme
  index       : t
  definition   : ElementRange(1,H,fill:0) ;

SET:
  identifier   : Varijante
  index       : v
  definition   : {1..3} ;

SET:
  identifier   : Brodovi
  indices     : i, j
  definition   : ElementRange(1,N,fill:0) ;

SET:
  identifier   : Terminal
  index       : p
  definition   : {1..2} ;

SET:
  identifier   : BxT
  index domain : (i,t)
  subset of    : Brodovi ;

SET:
  identifier   : BxV
  index domain : (i,v)
  subset of    : Brodovi ;

SET:
  identifier   : BxP

```

```

        index domain : (i,p)
        subset of    : Brodovi ;

SET:
    identifier      : BVV
    index domain    : (i,p,t,v)
    subset of       : Brodovi ;

ENDSECTION ;

PROCEDURE
    identifier : Procedure_1
    body       :

        solve BacapNezavisni;

ENDPROCEDURE ;

PROCEDURE
    identifier : MainInitialization

ENDPROCEDURE ;

PROCEDURE
    identifier : MainExecution
    body       :

        solve BacapNezavisni;

ENDPROCEDURE ;

PROCEDURE
    identifier : MainTermination
    body       :
        return DataManagementExit();

ENDPROCEDURE ;

ENDMODEL Main_bacap1 ;

```

AIMMS - QCSP model s dijeljenjem zadatka i bez dijeljenja zadatka

MAIN MODEL Main_QC_Scheduling

SECTION Splittask

DECLARATION SECTION

MATHEMATICAL PROGRAM:

identifier : DizaliceSplit
objective : ObjFun
direction : minimize
constraints : SkupOgranicenja_S
variables : SkupVarijabli_S
type : Automatic ;

SET:

identifier : SkupVarijabli_S
subset of : AllVariables
definition : data { B, E, Movetime, S, C, W, X, Makespan, ObjFun } ;

SET:

identifier : SkupOgranicenja_S
subset of : AllConstraints
definition : data
 { DefMakespan1, DefMakespan2, Split1 , Split2
, Split3 , Split4 , JedanSmjer1 , JedanSmjer2 , Pretjecanje ,
 Razmak , Istovremeno , PozDizalica1,
PozDizalica2, PozDizalica3, PozDizalica4, PozDizalica5 } ;

PARAMETER:

identifier : TrajanjeProcesa
text : "Ukupno trajanje prekrcajnog procesa (h)"
definition : Round(Makespan/60,1) ;

PARAMETER:

identifier : CraneUtilisation
text : "Prosjecno iskoristenje kapaciteta"
range : free
definition : sum[i, P(i)]/(N*Makespan) ;

VARIABLE:

identifier : B
index domain : (k)
range : nonnegative ;

VARIABLE:

identifier : E
index domain : (k)
range : nonnegative ;

VARIABLE:

identifier : S
index domain : (i,k)
text : "Pocetak (S)"
range : nonnegative ;

VARIABLE:

identifier : C
index domain : (i,k)
text : "Zavrsetak (C)"
range : nonnegative ;

VARIABLE:

identifier : W
index domain : (i,k)
text : "Trajanje (W)"

```

        range          : nonnegative ;

VARIABLE:
    identifier  : ObjFun
    text       : "Objektna funkcija (Z)"
    range      : free
    definition  : Omega1*Makespan + Omega2*sum[(i,k), C(i,k)-W(i,k)] +
Omega3*sum[(k),Movetime(k)] ;

VARIABLE:
    identifier  : Makespan
    text       : "Raspon vremena (Makespan)"
    range      : free ;

VARIABLE:
    identifier  : Movetime
    index domain : (k)
    range      : nonnegative ;

VARIABLE:
    identifier  : X
    index domain : (i,k)
    text       : "Asignacija (X)"
    range      : binary ;

CONSTRAINT:
    identifier  : DefMakespan1
    index domain : (i,k)
    definition  : C(i,k) <= Makespan ;

CONSTRAINT:
    identifier  : DefMakespan2
    index domain : (i,k)
    definition  : W(i,k)+ S(i,k) = C(i,k) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : Split1
    index domain : (i)
    definition  : sum[(k), W(i,k)] = P(i) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : Split2
    index domain : (i,k)
    definition  : W(i,k) <= P(i)*X(i,k) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : Split3
    index domain : (i,k)
    definition  : X(i,k) <= M*W(i,k) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : Split4
    index domain : (i,k)
    definition  : W(i,k) >= Spkoef*X(i,k) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : JedanSmjer1
    index domain : (i,k)
    definition  : M*X(i,k) - M + B(k) <= Lbay(i)*X(i,k) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : JedanSmjer2
    index domain : (i,k)
    definition  : M - M*X(i,k) + E(k) >= Ubay(i)*X(i,k) ;

CONSTRAINT:
    identifier  : Pretjecanje
    index domain : (i,j,k,l) | Mbay(i) <= Mbay(j) and k < l

```

```

        definition      :  $C(j,k) - W(j,k) \geq C(i,l) + \text{Buffer} + \text{Travel}(i,j) - M \cdot (2 - (X(j,k) + X(i,l)))$  ;

CONSTRAINT:
    identifier      : Razmak
    index domain    :  $(i,j,k,l) \mid \text{Mbay}(i) < \text{Mbay}(j) \text{ and } k < l \text{ and } (\text{Lbay}(j) - \text{Ubay}(i)) < (\text{val}(l) - \text{val}(k)) \cdot \text{Safedist}$ 
    definition      :  $C(i,k) - W(i,k) \geq C(j,l) + \text{Buffer} - M \cdot (2 - (X(i,k) + X(j,l)))$ 
;

CONSTRAINT:
    identifier      : Istovremeno
    index domain    :  $(i,j,k) \mid \text{Mbay}(i) \leq \text{Mbay}(j) \text{ and } i < j$ 
    definition      :  $C(j,k) - W(j,k) \geq C(i,k) + \text{Buffer} + \text{Travel}(i,j) - M \cdot (2 - (X(i,k) + X(j,k)))$  ;

CONSTRAINT:
    identifier      : PozDizalica1
    index domain    : (k)
    definition      :  $(E(k) - B(k)) \leq \text{Speed} \cdot \text{Movetime}(k)$  ;

CONSTRAINT:
    identifier      : PozDizalica2
    index domain    :  $(k,l) \mid k < l$ 
    definition      :  $B(l) - B(k) \geq (\text{Val}(l) - \text{Val}(k)) \cdot \text{Safedist}$  ;

CONSTRAINT:
    identifier      : PozDizalica3
    index domain    :  $(k,l) \mid k < l$ 
    definition      :  $E(l) - E(k) \geq (\text{Val}(l) - \text{Val}(k)) \cdot \text{Safedist}$  ;

CONSTRAINT:
    identifier      : PozDizalica4
    index domain    : (k)
    definition      :  $B(k) \geq \text{Downlimit}$  ;

CONSTRAINT:
    identifier      : PozDizalica5
    index domain    : (k)
    definition      :  $E(k) \leq \text{Uplimit}$  ;

ENDSECTION ;

PROCEDURE
    identifier : SolveSplittask
    body      :
        solve DizaliceSplit;

        !if(DizaliceSplit.ProgramStatus <> 'Optimal') then
        !      empty Makespan, ObjFun, B, E, Movetime, S, C, X, W;
        !endif;

ENDPROCEDURE ;

ENDSECTION Splittask ;

SECTION Fulltask

DECLARATION SECTION

MATHEMATICAL PROGRAM:
    identifier      : DizaliceFull
    objective       : fObjFun
    direction       : minimize
    constraints      : SkupOgranicenja_F
    variables       : SkupVarijabli_F
    type            : Automatic ;

```

```

SET:
  identifier      : SkupVarijabli_F
  subset of      : AllVariables
  definition      : data { fS, fC, fW, Idle, Finish, Mup, Mdown, Y, fObjFun,
fMakespan, fMovetime, fX } ;

SET:
  identifier      : SkupOgranicenja_F
  subset of      : AllConstraints
  definition      : data
                    { fDefMakespan1      , PocZavAktivnosti      , PocZavRada
, SamoJednaDizalica      , Workload      , KrajRadaDizalice      ,
                    KretanjeDizalica1      , KretanjeDizalica2      ,
KretanjeDizalica3      , KretanjeDizalica4      , KretanjeDizalica5      , KretanjeDizalica6      ,
                    KretanjeDizalica7      , RazmakDizalica      ,
IstiBayZadaci      , NajkraciPut      , Preklapanje1      , Preklapanje2      ,
                    PretjecanjeDizalica } ;

PARAMETER:
  identifier      : fTrajanjeProcesa
  text            : "Ukupno trajanje prekrcajnog procesa (h)"
  definition      : Round(fMakespan/60,1) ;

PARAMETER:
  identifier      : fCraneUtilisation
  text            : "Prosjecno iskoristenje kapaciteta"
  range           : free
  definition      : sum[i, P(i)]/(N*fMakespan) ;

VARIABLE:
  identifier      : fS
  index domain    : (i)
  text            : "Pocetak (S)"
  range           : nonnegative ;

VARIABLE:
  identifier      : fC
  index domain    : (i)
  text            : "Zavrsetak (C)"
  range           : nonnegative ;

VARIABLE:
  identifier      : fW
  index domain    : (k)
  text            : "Rad (W)"
  range           : nonnegative ;

VARIABLE:
  identifier      : Idle
  index domain    : (k)
  text            : "Prazan hod"
  range           : nonnegative ;

VARIABLE:
  identifier      : Finish
  index domain    : (k)
  text            : "Kraj rada (F)"
  range           : free ;

VARIABLE:
  identifier      : Mup
  index domain    : (k)
  range           : nonnegative ;

VARIABLE:
  identifier      : Mdown
  index domain    : (k)

```

```

        range          : nonnegative ;

VARIABLE:
    identifier   : Y
    index domain : (i,j)
    range       : binary ;

VARIABLE:
    identifier   : fObjFun
    text        : "Objektna funkcija (Z)"
    range       : free
    definition   : Omega1*fMakespan + Omega2*sum[(k), Finish(k) - fW(k)] +
Omega3*sum[(k), fMovetime(k)] ;

VARIABLE:
    identifier   : fMakespan
    text        : "Raspon vremena (Makespan)"
    range       : free ;

VARIABLE:
    identifier   : fMovetime
    index domain : (k)
    range       : nonnegative ;

VARIABLE:
    identifier   : fX
    index domain : (i,k)
    text        : "Assignacija (X)"
    range       : binary ;

CONSTRAINT:
    identifier   : fDefMakespan1
    index domain : (i)
    definition   : fC(i) <= fMakespan ;

CONSTRAINT:
    identifier   : PocZavAktivnosti
    index domain : (i)
    definition   : fS(i) + P(i) = fC(i) ;

CONSTRAINT:
    identifier   : PocZavRada
    index domain : (k)
    definition   : fW(k) + Idle(k) = Finish(k) ;

CONSTRAINT:
    identifier   : SamoJednaDizalica
    index domain : (i)
    definition   : sum[(k), fX(i,k)] = 1 ;

CONSTRAINT:
    identifier   : Workload
    index domain : (k)
    definition   : sum[(i), P(i)*fX(i,k)] = fW(k) ;

CONSTRAINT:
    identifier   : KrajRadaDizalice
    index domain : (i,k)
    definition   : fC(i) - Finish(k) <= M*(1-fX(i,k)) ;

CONSTRAINT:
    identifier   : KretanjeDizalica1
    index domain : (i,k)
    definition   : M - M*fX(i,k) + Mup(k) >= Ubay(i)*fX(i,k) ;

CONSTRAINT:
    identifier   : KretanjeDizalica2
    index domain : (i,k)

```



```

        definition      :  M*fX(i,k) - M + Mdown(k) <= Lbay(i)*fX(i,k) ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  KretanjeDizalica3
    index domain    :  (k,l) | k < l
    definition      :  Mdown(l)- Mdown(k) >= (Val(l)-Val(k))*Safedist ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  KretanjeDizalica4
    index domain    :  (k,l) | k < l
    definition      :  Mup(l)- Mup(k) >= (Val(l)-Val(k))*Safedist ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  KretanjeDizalica5
    index domain    :  (k)
    definition      :  Mdown(k) >= Downlimit ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  KretanjeDizalica6
    index domain    :  (k)
    definition      :  Mup(k) <= Uplimit ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  KretanjeDizalica7
    index domain    :  (k)
    definition      :  (Mup(k)- Mdown(k)) <= Speed* fMovetime(k) ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  NajkraciPut
    index domain    :  (i,j,k)
    definition      :  fC(i)+ Travel(i,j)- fS(j) <= M*(3-
(fX(i,k)+fX(j,k)+Y(i,j))) ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  Preklapanje1
    index domain    :  (i,j)
    definition      :  fC(i)+ Buffer <= fC(j)- P(j)+ M*(1-Y(i,j)) ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  Preklapanje2
    index domain    :  (i,j)
    definition      :  M*Y(i,j)+ fC(i)+ Buffer >= fC(j)- P(j)+ 0.001 ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  PretjecanjeDizalica
    index domain    :  (i,j) | Mbay(i) < Mbay(j)
    definition      :  sum[k, val(k)*fX(i,k)] - sum[l, val(l)*fX(j,l)] + 1 <=
M*(Y(i,j)+Y(j,i)) ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  RazmakDizalica
    index domain    :  (i,j) | Mbay(i) < Mbay(j)
    definition      :  Safedist*(sum[l | val(l) > 1 and val(l) <= N,
val(l)*fX(j,l)] - sum[k | val(k) >= 1 and val(k) < N, val(k)*fX(i,k)]) <= (Lbay(j)-
Ubay(i))+ M*(Y(i,j)+ Y(j,i)) ;

CONSTRAINT:
    identifier      :  IstiBayZadaci
    index domain    :  (i,j) | Mbay(i) = Mbay(j) and i <> j
    definition      :  Y(i,j)+ Y(j,i) = 1 ;

ENDSECTION ;

PROCEDURE
    identifier :  SolveFulltask
    body      :
        solve DizaliceFull;

```

```

        !if(DizaliceFull.ProgramStatus <> 'Optimal') then
        !      empty fMakespan, fObjFun, fMovetime, fS, fC, fX, fW, Idle, Finish,
Mup, Mdown, Y;
        !endif;

```

```

ENDPROCEDURE ;

```

```

ENDSECTION Fulltask ;

```

```

DECLARATION SECTION

```

```

PARAMETER:
  identifier   : T
  text        : "Broj prekrcajnih zadataka"
  range       : integer
  property    : Integer ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : N
  text        : "Broj dizalica"
  range       : integer
  property    : Integer ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : Safedist
  range       : nonnegative
  initial data : 10 ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : Uplimit
  range       : nonnegative
  initial data : 106 ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : Downlimit
  range       : nonpositive
  initial data : -10 ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : Speed
  text        : "Brzina kretanja dizalica"
  range       : free
  definition   : 7 ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : Omegal
  range       : nonnegative
  initial data : 1 ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : Omega2
  range       : nonnegative
  initial data : 0.01 ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : Omega3
  range       : nonnegative
  initial data : 1 ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : Buffer
  range       : nonnegative
  initial data : 0 ;

```

```

PARAMETER:
  identifier   : Spkoef
  range       : nonnegative
  definition   : 15 ;

```

```

PARAMETER:
  identifier : Productivity
  range      : nonnegative
  initial data : 27 ;

PARAMETER:
  identifier : M
  range      : integer
  definition : 5000 ;

PARAMETER:
  identifier : Teu
  index domain : i
  range      : integer ;

PARAMETER:
  identifier : P
  index domain : (i)
  definition : Round(Teu(i)/Productivity*60) ;

PARAMETER:
  identifier : Lbay
  index domain : (i)
  range      : integer ;

PARAMETER:
  identifier : Ubay
  index domain : (i)
  range      : integer ;

PARAMETER:
  identifier : Mbay
  index domain : (i)
  definition : (Lbay(i)+Ubay(i))/2 ;

PARAMETER:
  identifier : Travel
  index domain : (i,j)
  range      : free
  definition : Abs(Mbay(j)-Mbay(i))*(1/Speed) ;

SET:
  identifier : Task
  indices    : i, j
  definition : ElementRange(1,T,fill:0) ;

SET:
  identifier : Dizalice
  indices    : k, l
  definition : ElementRange(1,N,fill:0) ;

SET:
  identifier : TxT
  index domain : (i,j)
  subset of    : Task ;

SET:
  identifier : RasDiz
  index domain : (i,k)
  subset of    : Task ;

ENDSECTION ;

PROCEDURE
  identifier : MainInitialization

ENDPROCEDURE ;

```

```

PROCEDURE
  identifier : MainExecution
  body      :
    solve DizaliceSplit;

    if(DizaliceSplit.ProgramStatus <> 'Optimal') then
      empty Makespan, ObjFun, B, E, Movetime, S, C, X, W;
    endif;

    solve DizaliceFull;

    if(DizaliceFull.ProgramStatus <> 'Optimal') then
      empty fMakespan, fObjFun, fMovetime, fS, fC, fX, fW, Idle, Finish,
Mup, Mdown, Y;
    endif;

ENDPROCEDURE ;

PROCEDURE
  identifier : MainTermination
  body      :
    return DataManagementExit();

ENDPROCEDURE ;

ENDMODEL Main_QC_Scheduling ;

```

PRIVITAK 2: GENERIRANI PODACI I DOBIVENI REZULTATI

Tablica 24: Podaci o veličini i kapacitetu broda

SPECIFIKACIJA BRODOVA I TERETA n=100 seed=1300						
	vsl.size	u.bay	u.cap	x.bay	task	cargo
1.	5	62	77	12	13	874
2.	6	72	92	14	17	1157
3.	6	72	92	15	18	1310
4.	3	26	37	8	9	229
5.	4	52	69	10	11	648
6.	4	52	69	10	11	598
7.	4	52	69	11	13	741
8.	4	52	69	11	12	589
9.	5	62	77	13	14	792
10.	6	72	92	14	15	1247
11.	4	52	69	10	11	548
12.	3	26	37	8	8	210
13.	5	62	77	13	13	724
14.	3	26	37	9	12	359
15.	7	86	132	15	16	1706
16.	6	72	92	15	19	1492
17.	4	52	69	10	11	516
18.	6	72	92	14	16	1228
19.	5	62	77	13	14	791
20.	7	86	132	16	18	2023
21.	6	72	92	14	15	1221
22.	6	72	92	15	16	1126
23.	5	62	77	12	13	624
24.	4	52	69	10	12	638
25.	6	72	92	14	15	904
26.	6	72	92	15	16	1123
27.	7	86	132	15	16	1384
28.	6	72	92	14	16	1185
29.	4	52	69	11	12	518
30.	4	52	69	11	11	680
31.	6	72	92	14	17	1251
32.	5	62	77	12	13	824
33.	3	26	37	9	10	354
34.	4	52	69	11	11	423
35.	6	72	92	14	15	1113
36.	6	72	92	14	17	1311
37.	3	26	37	8	10	271
38.	6	72	92	15	17	1293
39.	5	62	77	13	13	719
40.	6	72	92	15	16	1187
41.	3	26	37	9	9	256
42.	5	62	77	12	12	813
43.	5	62	77	13	15	899

44.	3	26	37	8	10	299
45.	3	26	37	9	12	354
46.	5	62	77	12	12	729
47.	6	72	92	14	16	1335
48.	4	52	69	10	10	604
49.	3	26	37	9	10	295
50.	6	72	92	14	16	1126
51.	3	26	37	9	10	330
52.	5	62	77	14	14	928
53.	7	86	132	15	18	1768
54.	4	52	69	11	11	647
55.	3	26	37	10	11	348
56.	3	26	37	8	8	188
57.	5	62	77	12	13	638
58.	3	26	37	10	13	324
59.	5	62	77	13	15	1008
60.	6	72	92	14	14	1048
61.	5	62	77	11	11	745
62.	5	62	77	12	12	750
63.	3	26	37	9	10	329
64.	4	52	69	10	10	454
65.	6	72	92	14	17	1185
66.	4	52	69	11	11	588
67.	5	62	77	11	13	832
68.	5	62	77	13	13	902
69.	3	26	37	9	10	321
70.	5	62	77	12	12	592
71.	6	72	92	14	15	1165
72.	5	62	77	13	14	935
73.	6	72	92	15	16	1336
74.	4	52	69	10	11	661
75.	5	62	77	13	13	836
76.	4	52	69	11	12	596
77.	7	86	132	15	15	1357
78.	4	52	69	11	11	543
79.	5	62	77	12	14	986
80.	5	62	77	12	14	1075
81.	4	52	69	10	10	517
82.	5	62	77	14	14	754
83.	6	72	92	15	15	1309
84.	5	62	77	13	15	980
85.	6	72	92	15	17	1370
86.	3	26	37	9	9	257
87.	6	72	92	14	16	1387
88.	3	26	37	9	11	315
89.	6	72	92	15	16	1381
90.	3	26	37	8	8	257
91.	6	72	92	14	14	1026

92.	6	72	92	14	17	1243
93.	3	26	37	9	10	268
94.	7	86	132	15	15	1535
95.	3	26	37	9	10	270
96.	4	52	69	11	11	514
97.	3	26	37	9	9	278
98.	5	62	77	12	15	984
99.	5	62	77	13	13	738
100.	5	62	77	13	14	823

Tablica 25: Raspored tereta po brodskim pozicijama

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
RASPORED TERETA n=100 seed=1300																			
Vsl	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	1	6	7	17	18	30	35	38	39	51	51	59	62						
TEU	77	77	77	53	59	77	77	42	77	77	77	27	77						
Vsl	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Bay	1	2	9	9	10	22	25	25	30	30	31	33	37	43	53	61	63		
TEU	1	29	41	61	83	67	92	5	92	92	92	62	92	92	92	72	92		
Vsl	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bay	2	5	5	7	15	17	23	23	25	27	37	41	47	47	57	59	63	66	
TEU	73	92	52	59	92	38	7	92	92	92	92	69	3	92	92	92	89	92	
Vsl	4	-	-	-	-	-	-	-	-										
Bay	5	14	17	18	19	19	21	23	25										
TEU	37	37	37	37	22	37	4	2	16										
Vsl	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	2	5	7	10	10	13	17	26	27	38	50								
TEU	54	69	69	69	69	62	69	15	69	69	34								
Vsl	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	2	6	15	17	18	18	25	29	41	43	49								
TEU	34	69	69	69	69	31	23	59	37	69	69								
Vsl	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	2	13	19	22	22	23	26	26	34	35	42	45	51						
TEU	69	69	0	36	69	69	43	69	69	41	69	69	69						
Vsl	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	2	5	13	14	23	25	31	41	41	46	49	50							
TEU	28	69	53	30	16	69	69	69	38	10	69	69							
Vsl	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Bay	3	5	6	15	17	18	18	31	34	35	41	47	55	58					
TEU	77	35	77	13	77	77	62	60	57	77	24	5	74	77					
Vsl	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Bay	5	9	10	11	14	15	25	30	35	39	41	43	43	47	69				
TEU	72	92	92	92	92	66	92	92	92	92	25	78	92	86	92				
Vsl	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	1	2	5	13	29	29	35	38	39	41	46								
TEU	55	41	69	8	60	50	69	69	69	2	56								
Vsl	12	-	-	-	-	-	-	-											
Bay	1	3	5	6	11	13	21	23											
TEU	0	37	12	37	37	37	37	13											
Vsl	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	7	17	18	30	38	39	43	47	49	50	51	54	58						
TEU	77	77	41	77	77	24	54	77	20	38	77	60	25						

Min	171	171	91	171	171	53	120	171	44	84	171	133	56						
Vs1	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	1	3	5	7	10	14	17	17	18	18	19	19							
TEU	24	16	8	37	37	24	37	37	37	37	28	37							
Vs1	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	1	5	14	21	22	30	34	35	41	45	47	53	53	62	71	75			
TEU	52	50	98	132	132	132	90	42	85	125	132	132	117	132	123	132			
Vs1	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bay	9	9	13	17	23	26	27	29	31	33	33	53	54	54	61	63	63	65	71
TEU	92	92	78	92	92	92	92	92	92	32	47	92	45	92	92	92	2	92	92
Vs1	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	1	2	6	7	23	25	34	34	38	39	51								
TEU	63	25	15	60	69	37	69	32	8	69	69								
Vs1	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	1	2	10	13	15	25	30	39	39	47	51	54	57	62	67	67			
TEU	79	92	92	92	92	25	92	74	92	92	92	16	92	88	92	26			
Vs1	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Bay	2	14	19	21	26	30	35	45	50	51	51	53	54	55					
TEU	0	77	77	77	77	77	20	48	9	72	77	77	26	77					
Vs1	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bay	1	1	2	17	23	23	29	41	47	51	57	59	61	62	63	71	75	85	
TEU	132	132	132	132	132	70	132	123	67	132	132	106	4	132	69	132	132	132	
Vs1	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Bay	1	7	13	15	21	27	29	33	41	41	47	50	61	63	67				
TEU	92	92	92	22	38	92	57	92	92	92	92	92	92	92	92				
Vs1	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	1	2	3	5	7	14	15	33	42	43	50	55	66	66	67	69			
TEU	39	20	15	92	10	65	92	91	92	92	92	88	88	75	83	92			
Vs1	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	2	6	9	10	14	17	17	21	26	34	42	46	58						
TEU	77	12	77	25	77	6	3	63	77	77	77	31	22						
Vs1	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
Bay	1	6	6	9	11	13	18	33	35	37	37	49							
TEU	69	69	25	36	69	17	69	8	69	69	69	69							
Vs1	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Bay	6	10	11	18	21	35	39	41	46	49	50	55	55	62	69				
TEU	64	33	25	92	57	56	9	92	92	92	41	61	55	43	92				
Vs1	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	11	15	19	21	22	29	30	39	43	45	47	50	55	61	62	62			
TEU	51	92	92	36	39	92	92	92	92	92	7	27	91	76	92	60			
Vs1	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	1	6	7	9	11	22	31	49	50	54	61	61	71	81	82	85			
TEU	54	132	132	132	132	92	22	55	25	19	132	132	27	37	132	129			

Vsl	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	2	6	7	11	11	14	19	26	27	37	38	38	46	53	55	71			
TEU	92	92	92	67	92	8	92	89	92	92	70	92	92	92	9	22			
Vsl	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
Bay	1	3	9	15	15	17	18	19	21	38	45	50							
TEU	69	69	69	3	9	33	26	69	69	69	20	13							
Vsl	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	6	9	11	17	25	29	34	38	41	43	46								
TEU	69	69	69	69	12	69	69	69	51	65	69								
Vsl	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Bay	2	2	6	6	14	22	31	34	37	39	43	53	61	61	63	66	69		
TEU	92	92	31	92	63	92	33	92	92	92	92	26	92	92	92	51	35		
Vsl	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
Bay	1	6	17	21	27	29	33	37	37	39	41	58	59						
TEU	77	10	77	77	68	28	77	77	77	77	67	77	35						
Vsl	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
Bay	1	1	2	3	5	6	10	11	17	18									
TEU	37	37	37	21	37	37	37	37	37	37									
Vsl	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	11	15	17	19	21	25	27	29	37	39	46								
TEU	16	32	27	69	27	5	69	17	69	69	23								
Vsl	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Bay	6	9	13	14	17	21	31	46	47	54	57	61	61	67	69				
TEU	92	92	79	90	92	92	92	92	28	4	92	92	44	40	92				
Vsl	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Bay	3	10	15	15	23	26	27	33	38	38	41	43	43	51	59	61	71		
TEU	92	92	92	92	16	50	80	42	92	92	92	92	92	19	92	92	92		
Vsl	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
Bay	3	6	9	10	13	13	23	25	25	26									
TEU	37	13	0	37	35	28	37	10	37	37									
Vsl	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Bay	1	1	5	14	18	30	31	33	35	42	50	59	59	61	67	69	71		
TEU	76	92	92	92	50	78	75	92	92	35	92	92	92	76	44	92	31		
Vsl	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	5	6	10	14	17	18	26	34	43	50	55	57	61						
TEU	77	77	3	40	77	77	32	77	52	10	77	77	43						
Vsl	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Bay	2	9	9	11	14	22	26	31	34	41	45	51	53	58	67	71			
TEU	92	92	92	76	62	1	92	25	92	92	92	92	92	61	42	92			
Vsl	41	-	-	-	-	-	-	-	-										
Bay	5	6	9	10	11	13	22	23	26										
TEU	37	35	37	5	37	7	37	37	24										
Vsl	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							

Bay	1	2	5	9	11	14	22	26	42	43	55	59						
TEU	77	77	34	77	77	77	61	46	77	71	62	77						
Vsl	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	10	14	14	17	18	19	39	42	45	47	50	51	58	58	59			
TEU	77	65	77	77	77	57	10	77	30	19	77	36	77	66	77			
Vsl	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	1	2	2	3	9	11	11	15	23	25								
TEU	18	37	37	37	27	12	36	21	37	37								
Vsl	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	2	3	3	9	10	11	11	13	15	21	21	22						
TEU	37	37	37	37	37	37	37	34	37	6	9	9						
Vsl	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	1	14	18	30	31	33	37	43	46	47	50	62						
TEU	77	77	77	77	61	77	11	77	77	77	5	36						
Vsl	47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Bay	1	6	11	13	26	27	27	35	39	41	49	51	53	53	69	70		
TEU	92	92	66	92	92	92	92	92	92	92	42	92	92	92	89	34		
Vsl	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	1	10	13	18	21	29	31	33	37	41								
TEU	68	63	69	37	56	69	69	69	69	35								
Vsl	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	2	6	7	9	10	13	17	17	21	25								
TEU	37	37	10	18	37	37	37	37	8	37								
Vsl	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Bay	2	10	15	18	19	19	21	22	39	39	53	55	57	58	59	71		
TEU	21	30	92	92	26	92	92	92	37	36	92	92	56	92	92	92		
Vsl	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	6	7	9	11	13	15	17	17	22	26								
TEU	37	35	37	32	37	37	25	37	37	16								
Vsl	52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Bay	3	7	10	11	33	35	37	38	46	50	53	58	59	62				
TEU	77	77	77	38	77	23	77	77	34	77	77	63	77	77				
Vsl	53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bay	7	11	11	13	19	19	22	22	23	31	34	42	47	69	71	77	81	83
TEU	132	132	132	132	57	132	132	109	38	132	48	132	16	58	52	70	132	132
Vsl	54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
Bay	1	3	7	9	11	15	21	22	23	26	41							
TEU	4	69	69	69	69	69	69	69	47	44	69							
Vsl	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
Bay	2	3	5	6	14	18	19	21	22	22	26							
TEU	15	37	37	37	37	37	37	37	37	15	22							
Vsl	56	-	-	-	-	-	-	-										
Bay	3	6	7	10	13	17	21	26										

TEU	37	25	23	37	6	17	24	19										
Vs1	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Bay	10	10	13	21	22	26	31	33	34	37	43	50	55					
TEU	61	77	77	7	77	7	77	47	5	77	2	47	77					
Vs1	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Bay	2	2	3	5	6	7	10	10	14	14	18	19	25					
TEU	4	37	25	19	8	37	19	37	37	19	37	8	37					
Vs1	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	1	2	5	6	7	7	17	22	23	34	41	45	45	53	62			
TEU	77	77	77	33	77	15	77	38	75	77	77	77	77	77	77			
Vs1	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	5	6	13	17	19	25	29	42	45	51	53	62	69	70				
TEU	92	92	92	92	10	92	89	92	14	92	59	92	92	48				
Vs1	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
Bay	7	18	26	27	29	31	33	43	49	54	57							
TEU	77	77	77	77	77	64	77	37	77	28	77							
Vs1	62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	5	10	25	27	31	34	39	45	47	50	51	54						
TEU	77	77	77	77	33	14	59	77	58	77	47	77						
Vs1	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	2	5	5	6	7	13	14	15	18	21								
TEU	37	10	37	37	37	37	37	37	23	37								
Vs1	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	3	5	7	9	10	13	27	29	38	45								
TEU	23	69	69	48	69	69	16	24	2	65								
Vs1	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bay	2	5	5	11	14	14	18	19	23	25	29	39	41	58	58	59	63	
TEU	3	92	92	92	92	55	36	92	92	92	92	92	5	61	70	35	92	
Vs1	66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
Bay	2	19	21	26	33	34	35	39	43	45	51							
TEU	5	69	69	69	69	69	30	69	51	19	69							
Vs1	67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Bay	18	26	27	30	30	35	39	45	50	55	58	58	61					
TEU	77	76	43	28	75	77	77	77	77	77	31	40	77					
Vs1	68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Bay	5	9	11	15	23	27	29	33	35	45	50	54	58					
TEU	77	77	77	77	77	35	77	77	77	60	37	77	77					
Vs1	69	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	2	3	3	6	10	15	17	18	22	25								
TEU	37	37	34	37	37	37	12	16	37	37								
Vs1	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	9	10	13	14	21	25	30	31	35	42	57	59						
TEU	41	77	49	77	52	13	59	73	3	61	10	77						

Vsl	71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Bay	14	19	19	21	23	43	46	50	51	54	61	62	65	66	70				
TEU	92	92	6	92	92	92	92	92	92	65	28	92	85	92	61				
Vsl	72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Bay	10	17	21	22	27	29	31	34	46	46	47	53	54	57					
TEU	74	62	16	77	16	77	77	74	77	77	77	77	77	77					
Vsl	73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	3	6	6	7	9	10	11	14	18	23	25	38	46	58	66	67			
TEU	92	92	92	40	82	62	92	92	48	92	92	92	92	92	92	92			
Vsl	74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	3	5	6	19	25	31	43	45	49	49	51								
TEU	69	69	42	69	69	67	69	69	0	69	69								
Vsl	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	7	9	14	15	17	21	23	25	27	30	45	49	59						
TEU	77	71	54	25	77	77	77	67	77	56	77	24	77						
Vsl	76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	1	3	3	9	10	13	23	25	27	34	37	50							
TEU	38	69	14	21	69	69	31	69	69	69	69	9							
Vsl	77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	7	10	13	14	19	22	25	31	38	61	63	75	79	83	86				
TEU	0	78	71	6	67	132	94	132	132	132	132	70	47	132	132				
Vsl	78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	1	3	11	18	23	25	26	31	47	49	51								
TEU	69	58	19	69	28	69	69	51	32	10	69								
Vsl	79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	2	6	6	13	14	17	23	23	29	37	42	49	59	61					
TEU	77	77	21	70	77	48	77	77	77	77	77	77	77	77					
Vsl	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	1	9	10	17	19	30	33	41	41	45	45	50	54	59					
TEU	77	77	77	77	77	77	77	77	77	74	77	77	77	77					
Vsl	81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	1	2	9	13	19	21	25	31	33	41									
TEU	31	69	69	50	61	69	40	6	53	69									
Vsl	82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	3	6	13	14	17	23	25	26	31	34	49	53	57	59					
TEU	77	63	37	77	77	77	77	77	17	46	26	77	12	14					
Vsl	83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	1	6	10	11	25	39	41	43	46	50	55	62	63	69	71				
TEU	45	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	68	92	92				
Vsl	84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	2	5	7	7	15	23	30	31	31	33	39	46	49	51	55				
TEU	77	77	6	77	77	77	77	47	41	57	77	76	60	77	77				
Vsl	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Bay	1	3	15	18	21	23	33	33	34	37	38	39	43	43	51	59	69		
TEU	92	92	58	39	92	92	92	92	92	40	69	92	92	92	60	92	92		
Vsl	86	-	-	-	-	-	-	-	-										
Bay	1	7	10	14	15	18	23	25	26										
TEU	4	37	13	18	37	37	37	37	37										
Vsl	87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	3	18	19	22	22	25	26	27	33	34	39	39	49	57	59	63			
TEU	92	92	92	92	92	92	92	26	92	92	73	92	92	92	92	92			
Vsl	88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	1	1	2	6	11	13	13	15	17	21	23								
TEU	37	13	25	4	37	37	37	37	14	37	37								
Vsl	89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Bay	1	6	7	9	9	13	14	30	34	39	50	54	65	67	70	71			
TEU	92	92	92	84	92	92	9	92	92	92	92	92	92	92	92	92			
Vsl	90	-	-	-	-	-	-	-											
Bay	1	2	3	5	7	9	19	22											
TEU	6	37	37	37	37	29	37	37											
Vsl	91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Bay	9	15	23	30	31	37	41	43	45	46	53	58	63	69					
TEU	92	49	92	92	92	92	56	92	27	59	85	92	92	14					
Vsl	92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Bay	5	6	6	7	9	10	17	19	23	30	34	34	45	46	59	70	70		
TEU	16	92	54	92	92	92	92	92	92	51	50	3	57	92	92	92	92		
Vsl	93	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
Bay	2	5	7	9	10	10	11	14	22	26									
TEU	37	10	13	34	37	19	37	8	37	36									
Vsl	94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Bay	2	6	10	13	17	18	26	29	30	37	39	42	66	74	86				
TEU	132	47	132	132	132	132	132	132	132	3	22	132	28	132	115				
Vsl	95	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
Bay	1	5	9	11	13	14	15	15	17	18									
TEU	5	37	9	37	30	37	37	4	37	37									
Vsl	96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Bay	2	5	13	26	27	31	33	34	38	39	41								
TEU	69	53	69	69	69	37	50	17	69	7	5								
Vsl	97	-	-	-	-	-	-	-	-										
Bay	3	9	10	11	13	17	18	21	25										
TEU	37	37	37	37	15	37	37	37	4										
Vsl	98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Bay	5	5	6	6	10	14	15	21	25	25	26	45	47	53	58				
TEU	77	77	47	77	23	77	77	29	64	77	77	71	74	60	77				
Vsl	99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Bay	1	9	13	25	31	37	39	42	45	46	51	54	59						

TEU	77	77	77	77	77	77	11	77	19	40	17	77	35					
Vs1	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Bay	1	6	9	13	17	22	33	41	43	47	53	54	62	62				
TEU	43	37	77	54	77	77	68	77	77	33	35	66	46	56				

Ulazni podaci za integralni BAP i QCAP model na temelju simulacije dolazaka

ULAZNE VELIČINE INTEGRALNOG MODELA OPTIMIZACIJE - Dolasci n=100, seed = 400, $\lambda = 3.2$									
Broj dizalica						Trajanje prekrcaja			TEU
<i>n</i>	<i>a</i>	<i>l</i>	<i>opt1</i>	<i>opt2</i>	<i>opt3</i>	<i>opt1</i>	<i>opt2</i>	<i>opt3</i>	
1	12	5	2	3	4	16	11	10	874
2	26	6	1	2	3	43	22	16	1157
3	29	6	2	3	4	24	16	14	1310
4	38	3	1	2	M	9	7	M	229
5	39	4	1	2	M	24	13	M	648
6	39	4	1	2	3	22	11	9	598
7	45	4	1	2	3	28	14	11	741
8	51	4	1	2	3	22	11	10	589
9	70	5	2	3	4	15	10	9	792
10	71	6	1	2	3	46	23	19	1247
11	76	4	1	2	M	20	12	M	548
12	78	3	1	M	M	8	M	M	210
13	82	5	1	2	3	27	14	10	724
14	90	3	1	2	M	13	10	M	359
15	96	7	2	3	4	32	21	19	1706
16	98	6	2	3	4	28	19	17	1492
17	112	4	1	2	3	19	10	7	516
18	114	6	2	3	4	23	15	12	1228
19	115	5	1	2	3	29	15	14	791
20	118	7	3	4	5	25	19	17	2023
21	140	6	2	3	4	23	15	14	1221
22	140	6	2	3	4	21	14	13	1126
23	145	5	2	3	4	12	8	7	624
24	150	4	1	2	3	24	12	8	638
25	157	6	1	2	3	33	17	13	904
26	160	6	2	3	4	21	14	12	1123
27	163	7	2	3	M	26	20	M	1384
28	175	6	2	3	M	22	16	M	1185
29	178	4	1	2	3	19	10	8	518
30	218	4	1	2	3	25	13	10	680
31	222	6	2	3	4	23	16	14	1251
32	231	5	1	2	3	31	15	14	824
33	238	3	1	2	M	13	10	M	354
34	241	4	1	2	3	16	8	7	423
35	248	6	2	3	4	21	14	13	1113
36	250	6	2	3	M	24	19	M	1311
37	257	3	1	2	M	10	5	M	271
38	260	6	2	3	4	24	16	14	1293
39	269	5	2	3	4	13	9	7	719
40	277	6	2	3	4	22	15	13	1187
41	284	3	1	2	M	10	6	M	256
42	294	5	1	2	3	30	15	13	813
43	301	5	1	2	3	33	17	16	899
44	304	3	1	2	M	11	8	M	299
45	314	3	1	2	M	13	10	M	354

46	316	5	1	2	3	27	14	9	729
47	317	6	2	3	4	25	17	15	1335
48	323	4	1	2	3	23	11	10	604
49	330	3	1	2	M	11	6	M	295
50	341	6	1	2	3	42	21	18	1126
51	342	3	1	2	M	12	8	M	330
52	349	5	2	3	4	17	12	11	928
53	357	7	2	3	M	33	22	M	1768
54	364	4	1	2	3	24	12	10	647
55	370	3	1	2	M	13	8	M	348
56	383	3	1	2	M	7	5	M	188
57	384	5	1	2	3	24	12	8	638
58	386	3	1	2	M	12	7	M	324
59	398	5	1	2	3	38	19	13	1008
60	414	6	2	3	4	20	13	10	1048
61	417	5	1	2	M	28	14	M	745
62	429	5	1	2	3	28	14	13	750
63	453	3	1	2	M	12	9	M	329
64	455	4	1	2	M	17	12	M	454
65	457	6	1	2	3	44	22	16	1185
66	477	4	1	2	M	22	11	M	588
67	488	5	1	2	3	31	16	11	832
68	490	5	2	3	4	17	11	10	902
69	526	3	1	2	M	12	7	M	321
70	536	5	1	2	3	22	11	9	592
71	544	6	2	3	4	22	15	14	1165
72	546	5	1	2	3	35	18	14	935
73	560	6	2	3	M	25	21	M	1336
74	575	4	1	2	3	25	12	10	661
75	589	5	1	2	3	31	16	13	836
76	603	4	1	2	3	22	11	8	596
77	615	7	2	3	4	25	17	13	1357
78	616	4	1	2	3	20	10	9	543
79	619	5	1	2	3	37	18	13	986
80	627	5	1	2	3	40	20	14	1075
81	632	4	1	2	3	19	10	7	517
82	635	5	1	2	3	28	14	12	754
83	635	6	1	2	3	49	24	17	1309
84	645	5	2	3	4	18	12	11	980
85	650	6	2	3	M	26	25	M	1370
86	658	3	1	2	M	10	6	M	257
87	666	6	2	3	M	26	22	M	1387
88	678	3	1	2	M	12	7	M	315
89	705	6	2	3	M	26	17	M	1381
90	731	3	1	2	M	10	7	M	257
91	743	6	2	3	4	19	13	12	1026
92	761	6	1	2	3	46	23	16	1243
93	768	3	1	2	M	10	7	M	268
94	772	7	2	3	M	29	20	M	1535
95	784	3	1	2	M	10	9	M	270

96	791	4	1	2	3	19	10	9	514
97	795	3	1	2	M	10	8	M	278
98	796	5	1	2	3	37	18	17	984
99	797	5	1	2	3	28	14	9	738
100	825	5	2	3	4	15	10	8	823

ULAZNE VELIČINE INTEGRALNOG MODELA OPTIMIZACIJE - Dolasci n=100, seed = 400, $\lambda = 3.5$									
Broj dizalica						Trajanje prekrcaja			
<i>n</i>	<i>a</i>	<i>l</i>	<i>opt1</i>	<i>opt2</i>	<i>opt3</i>	<i>opt1</i>	<i>opt2</i>	<i>opt3</i>	TEU
1	11	5	2	3	4	16	11	10	874
2	24	6	1	2	3	43	22	16	1157
3	27	6	2	3	4	24	16	14	1310
4	35	3	1	2	M	9	7	M	229
5	36	4	1	2	M	24	13	M	648
6	36	4	1	2	3	22	11	9	598
7	41	4	1	2	3	28	14	11	741
8	47	4	1	2	3	22	11	10	589
9	64	5	2	3	4	15	10	9	792
10	65	6	1	2	3	46	23	19	1247
11	69	4	1	2	M	20	12	M	548
12	71	3	1	M	M	8	M	M	210
13	75	5	1	2	3	27	14	10	724
14	82	3	1	2	M	13	10	M	359
15	88	7	2	3	4	32	21	19	1706
16	89	6	2	3	4	28	19	17	1492
17	102	4	1	2	3	19	10	7	516
18	104	6	2	3	4	23	15	12	1228
19	104	5	1	2	3	29	15	14	791
20	107	7	3	4	5	25	19	17	2023
21	127	6	2	3	4	23	15	14	1221
22	127	6	2	3	4	21	14	13	1126
23	132	5	2	3	4	12	8	7	624
24	137	4	1	2	3	24	12	8	638
25	143	6	1	2	3	33	17	13	904
26	146	6	2	3	4	21	14	12	1123
27	149	7	2	3	M	26	20	M	1384
28	160	6	2	3	M	22	16	M	1185
29	162	4	1	2	3	19	10	8	518
30	199	4	1	2	3	25	13	10	680
31	202	6	2	3	4	23	16	14	1251
32	210	5	1	2	3	31	15	14	824
33	216	3	1	2	M	13	10	M	354
34	218	4	1	2	3	16	8	7	423
35	225	6	2	3	4	21	14	13	1113
36	227	6	2	3	M	24	19	M	1311
37	233	3	1	2	M	10	5	M	271
38	235	6	2	3	4	24	16	14	1293
39	243	5	2	3	4	13	9	7	719
40	250	6	2	3	4	22	15	13	1187

41	256	3	1	2	M	10	6	M	256
42	265	5	1	2	3	30	15	13	813
43	271	5	1	2	3	33	17	16	899
44	273	3	1	2	M	11	8	M	299
45	282	3	1	2	M	13	10	M	354
46	284	5	1	2	3	27	14	9	729
47	285	6	2	3	4	25	17	15	1335
48	291	4	1	2	3	23	11	10	604
49	297	3	1	2	M	11	6	M	295
50	307	6	1	2	3	42	21	18	1126
51	308	3	1	2	M	12	8	M	330
52	314	5	2	3	4	17	12	11	928
53	321	7	2	3	M	33	22	M	1768
54	327	4	1	2	3	24	12	10	647
55	332	3	1	2	M	13	8	M	348
56	344	3	1	2	M	7	5	M	188
57	345	5	1	2	3	24	12	8	638
58	347	3	1	2	M	12	7	M	324
59	358	5	1	2	3	38	19	13	1008
60	372	6	2	3	4	20	13	10	1048
61	375	5	1	2	M	28	14	M	745
62	386	5	1	2	3	28	14	13	750
63	408	3	1	2	M	12	9	M	329
64	410	4	1	2	M	17	12	M	454
65	411	6	1	2	3	44	22	16	1185
66	429	4	1	2	M	22	11	M	588
67	439	5	1	2	3	31	16	11	832
68	441	5	2	3	4	17	11	10	902
69	473	3	1	2	M	12	7	M	321
70	482	5	1	2	3	22	11	9	592
71	489	6	2	3	4	22	15	14	1165
72	491	5	1	2	3	35	18	14	935
73	504	6	2	3	M	25	21	M	1336
74	518	4	1	2	3	25	12	10	661
75	531	5	1	2	3	31	16	13	836
76	544	4	1	2	3	22	11	8	596
77	555	7	2	3	4	25	17	13	1357
78	556	4	1	2	3	20	10	9	543
79	558	5	1	2	3	37	18	13	986
80	566	5	1	2	3	40	20	14	1075
81	570	4	1	2	3	19	10	7	517
82	573	5	1	2	3	28	14	12	754
83	573	6	1	2	3	49	24	17	1309
84	582	5	2	3	4	18	12	11	980
85	587	6	2	3	M	26	25	M	1370
86	595	3	1	2	M	10	6	M	257
87	602	6	2	3	M	26	22	M	1387
88	613	3	1	2	M	12	7	M	315
89	638	6	2	3	M	26	17	M	1381
90	662	3	1	2	M	10	7	M	257

91	673	6	2	3	4	19	13	12	1026
92	689	6	1	2	3	46	23	16	1243
93	696	3	1	2	M	10	7	M	268
94	700	7	2	3	M	29	20	M	1535
95	711	3	1	2	M	10	9	M	270
96	718	4	1	2	3	19	10	9	514
97	722	3	1	2	M	10	8	M	278
98	723	5	1	2	3	37	18	17	984
99	724	5	1	2	3	28	14	9	738
100	750	5	2	3	4	15	10	8	823

ULAZNE VELIČINE INTEGRALNOG MODELA OPTIMIZACIJE - Dolasci n=100, seed = 700, $\lambda = 3.2$									
Broj dizalica						Trajanje prekrcaja			Cargo
<i>n</i>	<i>a</i>	<i>l</i>	<i>opt1</i>	<i>opt2</i>	<i>opt3</i>	<i>opt1</i>	<i>opt2</i>	<i>opt3</i>	
1	6	5	2	3	4	16	11	10	874
2	8	6	1	2	3	43	22	16	1157
3	31	6	2	3	4	24	16	14	1310
4	34	3	1	2	M	9	7	M	229
5	39	4	1	2	M	24	13	M	648
6	40	4	1	2	3	22	11	9	598
7	50	4	1	2	3	28	14	11	741
8	51	4	1	2	3	22	11	10	589
9	65	5	2	3	4	15	10	9	792
10	66	6	1	2	3	46	23	19	1247
11	77	4	1	2	M	20	12	M	548
12	79	3	1	M	M	8	M	M	210
13	81	5	1	2	3	27	14	10	724
14	94	3	1	2	M	13	10	M	359
15	99	7	2	3	4	32	21	19	1706
16	101	6	2	3	4	28	19	17	1492
17	119	4	1	2	3	19	10	7	516
18	120	6	2	3	4	23	15	12	1228
19	132	5	1	2	3	29	15	14	791
20	151	7	3	4	5	25	19	17	2023
21	157	6	2	3	4	23	15	14	1221
22	166	6	2	3	4	21	14	13	1126
23	176	5	2	3	4	12	8	7	624
24	186	4	1	2	3	24	12	8	638
25	190	6	1	2	3	33	17	13	904
26	199	6	2	3	4	21	14	12	1123
27	200	7	2	3	M	26	20	M	1384
28	204	6	2	3	M	22	16	M	1185
29	206	4	1	2	3	19	10	8	518
30	207	4	1	2	3	25	13	10	680
31	209	6	2	3	4	23	16	14	1251
32	212	5	1	2	3	31	15	14	824
33	214	3	1	2	M	13	10	M	354
34	218	4	1	2	3	16	8	7	423

35	227	6	2	3	4	21	14	13	1113
36	228	6	2	3	M	24	19	M	1311
37	231	3	1	2	M	10	5	M	271
38	253	6	2	3	4	24	16	14	1293
39	269	5	2	3	4	13	9	7	719
40	271	6	2	3	4	22	15	13	1187
41	272	3	1	2	M	10	6	M	256
42	289	5	1	2	3	30	15	13	813
43	292	5	1	2	3	33	17	16	899
44	300	3	1	2	M	11	8	M	299
45	311	3	1	2	M	13	10	M	354
46	311	5	1	2	3	27	14	9	729
47	313	6	2	3	4	25	17	15	1335
48	322	4	1	2	3	23	11	10	604
49	327	3	1	2	M	11	6	M	295
50	327	6	1	2	3	42	21	18	1126
51	328	3	1	2	M	12	8	M	330
52	349	5	2	3	4	17	12	11	928
53	351	7	2	3	M	33	22	M	1768
54	353	4	1	2	3	24	12	10	647
55	363	3	1	2	M	13	8	M	348
56	365	3	1	2	M	7	5	M	188
57	377	5	1	2	3	24	12	8	638
58	394	3	1	2	M	12	7	M	324
59	396	5	1	2	3	38	19	13	1008
60	398	6	2	3	4	20	13	10	1048
61	419	5	1	2	M	28	14	M	745
62	420	5	1	2	3	28	14	13	750
63	423	3	1	2	M	12	9	M	329
64	433	4	1	2	M	17	12	M	454
65	458	6	1	2	3	44	22	16	1185
66	461	4	1	2	M	22	11	M	588
67	464	5	1	2	3	31	16	11	832
68	475	5	2	3	4	17	11	10	902
69	476	3	1	2	M	12	7	M	321
70	488	5	1	2	3	22	11	9	592
71	488	6	2	3	4	22	15	14	1165
72	498	5	1	2	3	35	18	14	935
73	524	6	2	3	M	25	21	M	1336
74	576	4	1	2	3	25	12	10	661
75	603	5	1	2	3	31	16	13	836
76	604	4	1	2	3	22	11	8	596
77	607	7	2	3	4	25	17	13	1357
78	607	4	1	2	3	20	10	9	543
79	630	5	1	2	3	37	18	13	986
80	638	5	1	2	3	40	20	14	1075
81	639	4	1	2	3	19	10	7	517
82	647	5	1	2	3	28	14	12	754
83	657	6	1	2	3	49	24	17	1309
84	675	5	2	3	4	18	12	11	980

85	689	6	2	3	M	26	25	M	1370
86	694	3	1	2	M	10	6	M	257
87	699	6	2	3	M	26	22	M	1387
88	701	3	1	2	M	12	7	M	315
89	702	6	2	3	M	26	17	M	1381
90	706	3	1	2	M	10	7	M	257
91	713	6	2	3	4	19	13	12	1026
92	715	6	1	2	3	46	23	16	1243
93	724	3	1	2	M	10	7	M	268
94	724	7	2	3	M	29	20	M	1535
95	725	3	1	2	M	10	9	M	270
96	740	4	1	2	3	19	10	9	514
97	748	3	1	2	M	10	8	M	278
98	753	5	1	2	3	37	18	17	984
99	761	5	1	2	3	28	14	9	738
100	771	5	2	3	4	15	10	8	823

ULAZNE VELIČINE INTEGRALNOG MODELA OPTIMIZACIJE - Dolasci n=100, seed = 700, $\lambda = 3.5$									
n	a	l	Broj dizalica			Trajanje prekrcaja			Cargo
			opt1	opt2	opt3	opt1	opt2	opt3	
1	6	5	2	3	4	16	11	10	874
2	8	6	1	2	3	43	22	16	1157
3	29	6	2	3	4	24	16	14	1310
4	32	3	1	2	M	9	7	M	229
5	37	4	1	2	M	24	13	M	648
6	38	4	1	2	3	22	11	9	598
7	47	4	1	2	3	28	14	11	741
8	48	4	1	2	3	22	11	10	589
9	61	5	2	3	4	15	10	9	792
10	62	6	1	2	3	46	23	19	1247
11	72	4	1	2	M	20	12	M	548
12	74	3	1	M	M	8	M	M	210
13	76	5	1	2	3	27	14	10	724
14	87	3	1	2	M	13	10	M	359
15	91	7	2	3	4	32	21	19	1706
16	93	6	2	3	4	28	19	17	1492
17	109	4	1	2	3	19	10	7	516
18	109	6	2	3	4	23	15	12	1228
19	120	5	1	2	3	29	15	14	791
20	137	7	3	4	5	25	19	17	2023
21	142	6	2	3	4	23	15	14	1221
22	150	6	2	3	4	21	14	13	1126
23	159	5	2	3	4	12	8	7	624
24	168	4	1	2	3	24	12	8	638
25	172	6	1	2	3	33	17	13	904
26	180	6	2	3	4	21	14	12	1123
27	181	7	2	3	M	26	20	M	1384
28	185	6	2	3	M	22	16	M	1185

29	187	4	1	2	3	19	10	8	518
30	188	4	1	2	3	25	13	10	680
31	190	6	2	3	4	23	16	14	1251
32	193	5	1	2	3	31	15	14	824
33	195	3	1	2	M	13	10	M	354
34	199	4	1	2	3	16	8	7	423
35	207	6	2	3	4	21	14	13	1113
36	208	6	2	3	M	24	19	M	1311
37	211	3	1	2	M	10	5	M	271
38	231	6	2	3	4	24	16	14	1293
39	246	5	2	3	4	13	9	7	719
40	248	6	2	3	4	22	15	13	1187
41	249	3	1	2	M	10	6	M	256
42	265	5	1	2	3	30	15	13	813
43	268	5	1	2	3	33	17	16	899
44	275	3	1	2	M	11	8	M	299
45	285	3	1	2	M	13	10	M	354
46	285	5	1	2	3	27	14	9	729
47	287	6	2	3	4	25	17	15	1335
48	295	4	1	2	3	23	11	10	604
49	300	3	1	2	M	11	6	M	295
50	300	6	1	2	3	42	21	18	1126
51	301	3	1	2	M	12	8	M	330
52	320	5	2	3	4	17	12	11	928
53	321	7	2	3	M	33	22	M	1768
54	323	4	1	2	3	24	12	10	647
55	332	3	1	2	M	13	8	M	348
56	334	3	1	2	M	7	5	M	188
57	345	5	1	2	3	24	12	8	638
58	361	3	1	2	M	12	7	M	324
59	363	5	1	2	3	38	19	13	1008
60	364	6	2	3	4	20	13	10	1048
61	384	5	1	2	M	28	14	M	745
62	385	5	1	2	3	28	14	13	750
63	388	3	1	2	M	12	9	M	329
64	397	4	1	2	M	17	12	M	454
65	420	6	1	2	3	44	22	16	1185
66	423	4	1	2	M	22	11	M	588
67	426	5	1	2	3	31	16	11	832
68	436	5	2	3	4	17	11	10	902
69	437	3	1	2	M	12	7	M	321
70	448	5	1	2	3	22	11	9	592
71	448	6	2	3	4	22	15	14	1165
72	457	5	1	2	3	35	18	14	935
73	481	6	2	3	M	25	21	M	1336
74	528	4	1	2	3	25	12	10	661
75	553	5	1	2	3	31	16	13	836
76	554	4	1	2	3	22	11	8	596
77	557	7	2	3	4	25	17	13	1357
78	557	4	1	2	3	20	10	9	543

79	578	5	1	2	3	37	18	13	986
80	585	5	1	2	3	40	20	14	1075
81	586	4	1	2	3	19	10	7	517
82	593	5	1	2	3	28	14	12	754
83	602	6	1	2	3	49	24	17	1309
84	618	5	2	3	4	18	12	11	980
85	631	6	2	3	M	26	25	M	1370
86	635	3	1	2	M	10	6	M	257
87	640	6	2	3	M	26	22	M	1387
88	641	3	1	2	M	12	7	M	315
89	642	6	2	3	M	26	17	M	1381
90	645	3	1	2	M	10	7	M	257
91	651	6	2	3	4	19	13	12	1026
92	653	6	1	2	3	46	23	16	1243
93	661	3	1	2	M	10	7	M	268
94	661	7	2	3	M	29	20	M	1535
95	662	3	1	2	M	10	9	M	270
96	676	4	1	2	3	19	10	9	514
97	683	3	1	2	M	10	8	M	278
98	688	5	1	2	3	37	18	17	984
99	695	5	1	2	3	28	14	9	738
100	704	5	2	3	4	15	10	8	823

Rezultat simulacije slučajnih dolazaka brodova

```
> #####Generator dolazaka brodova#####
> rm(list=ls())
> sjeme <- 400
> set.seed(sjeme)
> broj.dolazaka <- rpois(1152,3.2)
> (dolasci <- broj.dolazaka[1:100])
[1] 1 2 4 2 6 3 2 3 2 2 1 3 5 4 4 3 3 6 2 3 2 4 3 4 1 2 3 7 1 1 4 2 2 3 2 6 4 4 1 5 5 3
[43] 0 4 3 4 5 2 6 3 6 2 5 5 3 2 4 2 2 2 3 3 2 2 4 3 4 3 2 3 1 3 2 3 3 3 2 3 6 1 3 2
[85] 5 2 6 4 2 3 2 1 4 2 3 2 1 4 6 4
> set.seed(sjeme)
> vremena.dolazaka <- rexp(1152,3.2)*24
> (intervali <- round(vremena.dolazaka[1:100]))
[1] 12 14 3 9 1 0 6 6 19 1 5 2 4 8 6 2 14 2 1 3 22 0 5 5 7 3 3 12
[29] 3 40 4 9 7 3 7 2 7 3 9 8 7 10 7 3 10 2 1 6 7 11 1 7 8 7 6 13
[57] 1 2 12 16 3 12 24 2 2 20 11 2 36 10 8 2 14 15 14 14 12 1 3 8 5 3 0 10
[85] 5 8 8 12 27 26 12 18 7 4 12 7 4 1 1 28
> (cumsum(intervali))
[1] 12 26 29 38 39 39 45 51 70 71 76 78 82 90 96 98 112 114 115 118 140
[22] 140 145 150 157 160 163 175 178 218 222 231 238 241 248 250 257 260 269 277 284 294
[43] 301 304 314 316 317 323 330 341 342 349 357 364 370 383 384 386 398 414 417 429 453
[64] 455 457 477 488 490 526 536 544 546 560 575 589 603 615 616 619 627 632 635 635 645
[85] 650 658 666 678 705 731 743 761 768 772 784 791 795 796 797 825
> #####Generator dolazaka brodova#####
> rm(list=ls())
> sjeme <- 400
> set.seed(sjeme)
> broj.dolazaka <- rpois(1260,3.5)
> (dolasci <- broj.dolazaka[1:100])
[1] 2 2 5 3 6 3 2 3 2 2 1 4 5 4 5 3 4 6 2 4 2 4 3 5 1 2 3 8 1 1 4 2 2 3 3 6 4 4 2 6 5
[42] 3 0 5 3 4 5 2 7 3 6 3 6 5 3 2 4 3 3 2 3 3 3 4 3 4 4 2 3 2 4 1 4 2 3 3 4 2 3 7 1
[83] 3 2 5 2 6 4 2 3 3 1 4 2 3 3 1 4 6 4
> set.seed(sjeme)
> vremena.dolazaka <- rexp(1260,3.5)*24
> (intervali <- round(vremena.dolazaka[1:100]))
[1] 11 13 3 8 1 0 5 6 17 1 4 2 4 7 6 1 13 2 0 3 20 0 5 5 6 3 3
[28] 11 2 37 3 8 6 2 7 2 6 2 8 7 6 9 6 2 9 2 1 6 6 10 1 6 7 6
[55] 5 12 1 2 11 14 3 11 22 2 1 18 10 2 32 9 7 2 13 14 13 13 11 1 2 8 4
[82] 3 0 9 5 8 7 11 25 24 11 16 7 4 11 7 4 1 1 26
> (cumsum(intervali))
[1] 11 24 27 35 36 36 41 47 64 65 69 71 75 82 88 89 102 104 104 107
[21] 127 127 132 137 143 146 149 160 162 199 202 210 216 218 225 227 233 235 243 250
[41] 256 265 271 273 282 284 285 291 297 307 308 314 321 327 332 344 345 347 358 372
[61] 375 386 408 410 411 429 439 441 473 482 489 491 504 518 531 544 555 556 558 566
[81] 570 573 573 582 587 595 602 613 638 662 673 689 696 700 711 718 722 723 724 750
> #####Generator dolazaka brodova#####
> rm(list=ls())
> sjeme <- 700
> set.seed(sjeme)
> broj.dolazaka <- rpois(1152,3.2)
> (dolasci <- broj.dolazaka[1:100])
[1] 3 2 3 6 3 4 1 4 5 3 3 5 6 2 2 3 2 1 2 4 4 2 3 3 5 4 1 6 1 5 2 2 5 1 2 3 3 3 5 3 5 4 3 4 6
2 3
[48] 3 4 4 4 4 3 4 5 4 3 4 0 1 1 3 4 3 1 6 4 3 2 2 3 1 7 1 4 6 4 2 6 8 8 6 0 3 5 2 3 1 2 1 4 4
7 3
[95] 2 3 3 7 3 2
> set.seed(sjeme)
> vremena.dolazaka <- rexp(1152,3.2)*24
> (intervali <- round(vremena.dolazaka[1:100]))
[1] 6 2 23 3 5 1 10 1 14 1 11 2 2 13 5 2 18 1 12 19 6 9 10 10 4 9 1 4 2 1 2
[32] 3 2 4 9 1 3 22 16 2 1 17 3 8 11 0 2 9 5 0 1 21 2 2 10 2 12 17 2 2 21 1
[63] 3 10 25 3 3 11 1 12 0 10 26 52 27 1 3 0 23 8 1 8 10 18 14 5 5 2 1 4 7 2 9
[94] 0 1 15 8 5 8 10
> (cumsum(intervali))
[1] 6 8 31 34 39 40 50 51 65 66 77 79 81 94 99 101 119 120 132 151 157 166 176
[24] 186 190 199 200 204 206 207 209 212 214 218 227 228 231 253 269 271 272 289 292 300 311
311
[47] 313 322 327 327 328 349 351 353 363 365 377 394 396 398 419 420 423 433 458 461 464 475
476
[70] 488 488 498 524 576 603 604 607 607 630 638 639 647 657 675 689 694 699 701 702 706 713
715
[93] 724 724 725 740 748 753 761 771
> #####Generator dolazaka brodova#####
> rm(list=ls())
> sjeme <- 700
```

```

> set.seed(sjeme)
> broj.dolazaka <- rpois(1260,3.5)
> (dolasci <- broj.dolazaka[1:100])
[1] 3 2 3 7 3 4 1 4 5 4 3 5 7 2 2 4 2 1 2 4 4 2 3 3 5 4 1 6 1 5 2 3 5 1 2 3 3 3 5 3 5 5 4 5 7
3 3
[48] 4 4 4 4 5 3 5 5 4 4 4 1 1 2 3 4 4 1 6 4 4 3 2 3 1 8 1 4 7 4 3 7 8 8 6 0 3 6 2 4 1 2 1 5 4
7 3
[95] 3 3 3 7 4 3
> set.seed(sjeme)
> vremena.dolazaka <- rexp(1260,3.5)*24
> (intervali <- round(vremena.dolazaka[1:100]))
[1] 6 2 21 3 5 1 9 1 13 1 10 2 2 11 4 2 16 0 11 17 5 8 9 9 4 8 1 4 2 1 2
[32] 3 2 4 8 1 3 20 15 2 1 16 3 7 10 0 2 8 5 0 1 19 1 2 9 2 11 16 2 1 20 1
[63] 3 9 23 3 3 10 1 11 0 9 24 47 25 1 3 0 21 7 1 7 9 16 13 4 5 1 1 3 6 2 8
[94] 0 1 14 7 5 7 9
> (cumsum(intervali))
[1] 6 8 29 32 37 38 47 48 61 62 72 74 76 87 91 93 109 109 120 137 142 150 159
[24] 168 172 180 181 185 187 188 190 193 195 199 207 208 211 231 246 248 249 265 268 275 285
285
[47] 287 295 300 300 301 320 321 323 332 334 345 361 363 364 384 385 388 397 420 423 426 436
437
[70] 448 448 457 481 528 553 554 557 557 578 585 586 593 602 618 631 635 640 641 642 645 651
653
[93] 661 661 662 676 683 688 695 704

```

Rješenje QCSP modela sa 1-5 dizalica

	1		2		3		4		5	
	Full	Split	Full	Split	Full	Split	Full	Split	Full	Split
1	1958.52	2042.15	1011.33	1024.58	755.79	684	611.11	625.41	610.84	618.29
	1949.7	1949.7	999.4	976.4	747.9	650.1	607.2	607.2	607.2	607.2
	32.5	32.5	16.66	16.27	12.47	10.84	10.12	10.12	10.12	10.12
	0.996	0.996	0.971	0.994	0.865	0.995	0.799	0.799	0.639	0.639
2	2587.59	2698.64	1321.38	1340.27	986.01	1016.62	984.56	997.35	984.56	997.35
	2578.6	2578.6	1311.1	1289.9	978.4	979.2	978.4	979.2	978.4	979.2
	42.98	42.98	21.85	21.5	16.31	16.32	16.31	16.32	16.31	16.32
	0.997	0.997	0.98	0.996	0.876	0.875	0.657	0.656	0.525	0.525
3	2927.38	3088.57	1477.56	1542.02	1028.95	1032.99	824.91	846.37	824.68	838.4
	2918.1	2918.1	1464	1459.3	1019.1	976.3	818.9	812.1	818.9	811.4
	48.64	48.64	24.4	24.32	16.99	16.27	13.65	13.54	13.65	13.52
	0.997	0.997	0.994	0.997	0.951	0.993	0.888	0.895	0.711	0.717
4	514.74	526.59	394.03	399.89	394.03	396.6	394.03	396.6	394.03	396.6
	511.9	511.9	391	392.1	391	391.6	391	391.6	391	391.6
	8.53	8.53	6.52	6.54	6.52	6.53	6.52	6.53	6.52	6.53
	0.994	0.994	0.651	0.649	0.434	0.433	0.325	0.325	0.26	0.26
5	1454.78	1512.47	759.24	780.33	757.51	769.13	755.92	765.87	755.92	765.87
	1447.9	1447.9	752.6	752.6	752.6	752.6	752.6	752.6	752.6	752.6
	24.13	24.13	12.54	12.54	12.54	12.54	12.54	12.54	12.54	12.54
	0.995	0.995	0.957	0.957	0.638	0.638	0.479	0.479	0.383	0.383
6	1342.5	1386.37	736.07	691.94	535.92	548.18	532.86	538.02	532.86	537.18
	1335.7	1335.7	728.9	667.9	529	529	529.4	529.4	529.4	529.4
	22.26	22.26	12.15	11.13	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82
	0.995	0.995	0.912	0.995	0.837	0.837	0.628	0.628	0.502	0.502
7	1659.07	1720.42	870.37	861.02	701.55	655.59	640.98	649.6	640.98	649.6
	1652	1652	861.4	826.3	695.9	636.5	636	636	636	636
	27.53	27.53	14.36	13.77	11.6	10.61	10.6	10.6	10.6	10.6
	0.996	0.996	0.955	0.995	0.788	0.861	0.647	0.647	0.517	0.517
8	1321.71	1366.15	717.22	685.88	572.4	582.41	572.4	581.18	572.4	580.52
	1314.8	1314.8	709.1	658	568.2	568.2	568.2	568.2	568.2	567.5
	21.91	21.91	11.82	10.97	9.47	9.47	9.47	9.47	9.47	9.46
	0.995	0.995	0.922	0.994	0.767	0.767	0.575	0.575	0.46	0.461
9	1774.79	1849.08	910.44	917.88	654.71	617.71	512.96	519.51	512.09	518.84
	1766.9	1766.9	902.1	883.6	642	589.2	509.4	509.4	509.4	509.4
	29.45	29.45	15.04	14.73	10.7	9.82	8.49	8.49	8.49	8.49
	0.996	0.996	0.975	0.995	0.913	0.995	0.863	0.863	0.691	0.691
10	2786.38	2921.97	1454.08	1463.59	1132.57	1161.32	1129.25	1153.3	1129.25	1149.07
	2777.1	2777.1	1445.6	1388.9	1125.4	1125.4	1125.4	1125.4	1125.4	1125.4
	46.29	46.29	24.09	23.15	18.76	18.76	18.76	18.76	18.76	18.76
	0.997	0.997	0.957	0.996	0.82	0.82	0.615	0.615	0.492	0.492
11	1228.85	1263.65	715.04	730.86	713.67	725.32	712.81	721.35	712.81	721.35
	1222.4	1222.4	708.6	708.6	709.5	709.5	709.5	709.5	709.5	709.5

12	20.37	20.37	11.81	11.81	11.83	11.83	11.83	11.83	11.83	11.83
	0.995	0.995	0.858	0.858	0.571	0.571	0.428	0.428	0.343	0.343
	471.6	480.64	471.6	480.64	471.6	480.64	471.6	480.64	471.6	480.64
	468.7	468.7	468.7	468.7	468.7	468.7	468.7	468.7	468.7	468.7
	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81
13	0.994	0.994	0.497	0.497	0.331	0.331	0.249	0.249	0.199	0.199
	1622.64	1693.71	839.28	845.83	614.08	632.5	609.74	619.9	608.29	616.75
	1615.3	1615.3	832.5	807.6	607.3	604.6	604	604.4	604	604.4
	26.92	26.92	13.88	13.46	10.12	10.08	10.07	10.07	10.07	10.07
	0.995	0.995	0.966	0.995	0.883	0.887	0.666	0.665	0.532	0.532
14	801.88	810.64	611.45	616.15	611.45	616.15	611.45	616.15	611.45	616.15
	799.3	799.3	609.1	609.1	609.1	609.1	609.1	609.1	609.1	609.1
	13.32	13.32	10.15	10.15	10.15	10.15	10.15	10.15	10.15	10.15
	0.997	0.997	0.654	0.654	0.436	0.436	0.327	0.327	0.262	0.262
	3811.25	3997.77	1914.98	1994.04	1423.8	1337.37	1132.65	1163.66	1131.34	1157.7
15	3800.6	3800.6	1902.4	1902.4	1415.1	1266.9	1125	1125	1124	1124
	63.34	63.34	31.71	31.71	23.59	21.12	18.75	18.75	18.73	18.73
	0.997	0.997	0.996	0.996	0.893	0.997	0.842	0.842	0.674	0.674
	3331.81	3496.82	1726.96	1751.01	1210.05	1171.75	1028.4	1062.02	1028.4	1054.57
	3322.9	3322.9	1716.9	1661.9	1197.5	1108.8	1022.5	1023	1022.5	1023
16	55.38	55.38	28.62	27.7	19.96	18.48	17.04	17.05	17.04	17.05
	0.997	0.997	0.965	0.997	0.922	0.996	0.81	0.81	0.648	0.648
	1160.28	1195.34	607.27	601.5	456.74	409.4	397.52	403.95	397.52	403.95
	1153.1	1153.1	601.4	576.5	448.4	395.6	395.6	395.6	395.6	395.6
	19.22	19.22	10.02	9.61	7.47	6.59	6.59	6.59	6.59	6.59
17	0.994	0.994	0.953	0.994	0.852	0.966	0.724	0.724	0.579	0.579
	2746.88	2912.8	1383.54	1445	998.11	963.11	786.07	732.72	640.65	639.28
	2737.4	2737.4	1372	1372	986.7	916.3	778.7	687.6	632.1	613.6
	45.62	45.62	22.87	22.87	16.45	15.27	12.98	11.46	10.54	10.23
	0.997	0.997	0.994	0.994	0.922	0.992	0.876	0.992	0.863	0.889
18	1768.63	1827.08	906.47	919.28	863.04	878.97	863.04	878.97	863.04	878.97
	1762.7	1762.7	902	881.4	859.3	859.3	859.3	859.3	859.3	859.3
	29.38	29.38	15.03	14.69	14.32	14.32	14.32	14.32	14.32	14.32
	0.997	0.997	0.974	0.997	0.682	0.682	0.511	0.511	0.409	0.409
	4518.05	4794.98	2292.02	2395.68	1563.72	1591.07	1272.54	1200.83	1018.21	1027
19	4505.9	4505.9	2275	2255.5	1549	1504.4	1261	1127.2	1011.1	985.6
	75.1	75.1	37.92	37.59	25.82	25.07	21.02	18.79	16.85	16.43
	0.997	0.997	0.988	0.996	0.967	0.996	0.891	0.997	0.889	0.912
	2728.95	2864.49	1374.97	1433.64	961.52	960.89	824.2	852.54	823.82	843.39
	2719.4	2719.4	1363.7	1363.7	952.7	906.5	818.3	818.3	818.3	817.4
20	45.32	45.32	22.73	22.73	15.88	15.11	13.64	13.64	13.64	13.62
	0.997	0.997	0.994	0.994	0.948	0.997	0.828	0.828	0.662	0.663
	2521.17	2590.38	1361.25	1297.17	953.35	874.28	755.62	765.23	755.62	762.43
	2511.4	2511.4	1349.6	1255.7	946.4	837.1	751	751	751	751
	41.86	41.86	22.49	20.93	15.77	13.95	12.52	12.52	12.52	12.52
21	0.996	0.996	0.927	0.996	0.881	0.996	0.833	0.833	0.666	0.666

23	1403.08	1477.3	736.86	739.82	510.06	495.15	431.7	444.84	429.97	440.71
	1395	1395	725	697.8	503.7	465.2	426.1	426.1	426.1	426.1
	23.25	23.25	12.08	11.63	8.4	7.75	7.1	7.1	7.1	7.1
	0.994	0.994	0.957	0.994	0.918	0.994	0.814	0.814	0.651	0.651
24	1430.78	1467.29	793.19	741.12	637.98	505.91	483.68	491.12	483.68	491.12
	1423.9	1423.9	788.4	711.9	633	480.9	480.4	480.4	480.4	480.4
	23.73	23.73	13.14	11.87	10.55	8.02	8.01	8.01	8.01	8.01
	0.995	0.995	0.899	0.995	0.746	0.982	0.737	0.737	0.59	0.59
25	2011.09	2103.56	1030.41	1057.27	766.77	793.78	765.15	783.96	764.16	779.49
	2002	2002	1017.7	1002	758.5	759.3	759.3	758.8	759.3	759.3
	33.37	33.37	16.96	16.7	12.64	12.66	12.66	12.65	12.66	12.66
	0.996	0.996	0.976	0.994	0.876	0.875	0.656	0.657	0.525	0.525
26	2509.57	2617.18	1301.26	1303.51	923	874.2	714.69	733.1	714.69	729.87
	2502.2	2502.2	1289.7	1251.1	915.6	834.2	709	709.9	709	709.9
	41.7	41.7	21.5	20.85	15.26	13.9	11.82	11.83	11.82	11.83
	0.997	0.997	0.967	0.997	0.908	0.997	0.88	0.879	0.704	0.703
27	3098.83	3221.37	1559.16	1604.08	1186.89	1204.71	1182.5	1191.22	1181.05	1187,,84
	3086.7	3086.7	1549.6	1549.6	1173	1173	1173	1173	1173	1173
	51.45	51.45	25.83	25.83	19.55	19.55	19.55	19.55	19.55	19.55
	0.996	0.996	0.992	0.992	0.874	0.874	0.655	0.655	0.524	0.524
28	2650.81	2777.49	1383.33	1387.69	1004.22	1006.87	974.35	992.82	972.19	986.71
	2640.9	2640.9	1371.5	1321.3	992	967.3	967.3	967.3	967.3	967.3
	44.02	44.02	22.86	22.02	16.53	16.12	16.12	16.12	16.12	16.12
	0.996	0.996	0.959	0.996	0.884	0.907	0.68	0.68	0.544	0.544
29	1164.93	1215.09	600.72	609,93,	469.46	477.9	469.32	474.69	469.32	474.69
	1157.9	1157.9	593.2	580	465.7	465.7	465.7	465.7	465.7	465.7
	19.3	19.3	9.89	9.67	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76
	0.994	0.994	0.97	0.992	0.824	0.824	0.618	0.618	0.494	0.494
30	1521.49	1582.31	775.63	792.87	569.47	584.1	569.47	580.61	569.47	580.61
	1515.7	1515.7	769.3	762	565.1	565.1	565.1	565.1	565.1	565.1
	25.26	25.26	12.82	12.7	9.42	9.42	9.42	9.42	9.42	9.42
	0.996	0.996	0.981	0.991	0.891	0.891	0.668	0.668	0.534	0.534
31	2797.02	2943.57	1430.91	1466.67	973.69	983.13	830.69	854.36	823.69	839.18
	2787.4	2787.4	1417.6	1395.3	961.1	929.1	817	817.9	817.9	817
	46.46	46.46	23.63	23.26	16.02	15.49	13.62	13.63	13.63	13.62
	0.997	0.997	0.98	0.995	0.963	0.997	0.85	0.849	0.679	0.68
32	1846.22	1911.06	931	962.06	839.48	857.79	837.89	851.22	837.89	848.42
	1837.9	1837.9	923.2	919.6	834.1	834.1	834.1	833.7	834.1	833.7
	30.63	30.63	15.39	15.33	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9
	0.996	0.996	0.991	0.995	0.731	0.731	0.548	0.549	0.439	0.439
33	789.74	810.52	624.23	632.55	624.23	632.55	624.23	632.55	624.23	632.55
	787.3	787.3	622.2	622.2	622.2	622.2	622.2	622.2	622.2	622.2
	13.12	13.12	10.37	10.37	10.37	10.37	10.37	10.37	10.37	10.37
	0.997	0.997	0.631	0.631	0.421	0.421	0.315	0.315	0.252	0.252
34	950.05	978.75	515.46	492.36	443.18	452.78	443.18	452.78	443.18	452.78
	945	945	509.1	472.5	438.1	437.4	438.1	437.4	438.1	437.4

35	15.75	15.75	8.49	7.88	7.3	7.29	7.3	7.29	7.3	7.29
	0.995	0.995	0.923	0.995	0.715	0.716	0.536	0.537	0.429	0.43
	2489.09	2619.03	1273.63	1312.22	875.46	874.91	790.98	811.61	789.82	805.21
	2480	2480	1260.8	1242.1	865.2	826.7	785.1	785.1	785.1	785.1
	41.33	41.33	21.01	20.7	14.42	13.78	13.09	13.09	13.09	13.09
36	0.996	0.996	0.98	0.995	0.952	0.996	0.787	0.787	0.629	0.629
	2930.53	3091.68	1483.83	1541.01	1126.15	1157.28	1122.86	1143.34	1121.41	1137.38
	2920.7	2920.7	1471.6	1461.4	1116.3	1116.3	1115.6	1116.3	1115.16	1116.3
	48.68	48.68	24.53	24.36	18.61	18.61	18.59	18.61	18.59	18.61
	0.997	0.997	0.989	0.996	0.869	0.869	0.652	0.652	0.522	0.522
37	608.39	615.61	336.3	310.05	300.73	278.26	300.73	278.26	300.73	278.26
	605.1	605.1	334.4	302.5	298	269	298	269	298	269
	10.09	10.09	5.57	5.04	4.97	4.48	4.97	4.48	4.97	4.48
	0.995	0.995	0.9	0.995	0.673	0.746	0.505	0.559	0.404	0.448
	2891.96	3045.82	1456.12	1513.76	1040.57	1023.02	870.29	857.94	833.4	847.29
38	2881.9	2881.9	1443	1443	1033.5	962.1	862.1	828.4	828.4	827
	48.03	48.03	24.05	24.05	17.23	16.04	14.37	13.81	13.81	13.78
	0.997	0.997	0.995	0.995	0.926	0.995	0.833	0.867	0.693	0.695
	1614.01	1686.62	819.9	843.51	592.7	567.97	444.69	457.21	444.69	451.12
	1605.9	1605.9	808.4	803	586.4	535.3	438.9	438.8	438.9	438.8
39	26.77	26.77	13.47	13.38	9.77	8.92	7.32	7.31	7.32	7.31
	0.995	0.995	0.988	0.995	0.908	0.995	0.91	0.91	0.728	0.728
	2656.81	2816.98	1340.42	1406.75	928	937.71	793.15	812.63	790.44	804.14
	2646.9	2646.9	1327	1326.7	913.7	882.3	783.1	783.1	783.1	783.1
	44.12	44.12	22.12	22.11	15.23	14.71	13.05	13.05	13.05	13.05
40	0.996	0.996	0.994	0.994	0.962	0.996	0.842	0.842	0.673	0.673
	574.96	588.64	354.8	359.56	354.8	358.67	354.8	358.67	354.8	358.67
	571.9	571.9	353.1	352.6	353.1	352.6	353.1	352.6	353.1	352.6
	9.53	9.53	5.89	5.88	5.89	5.88	5.89	5.88	5.89	5.88
	0.995	0.995	0.806	0.807	0.537	0.538	0.403	0.403	0.322	0.323
41	1823.29	1885.3	926.66	941.54	766.84	182.52	765.1	777.17	765.1	774.7
	1814.9	1814.9	917.1	907.5	761.2	761.2	761.2	761.2	761.2	761.2
	30.25	30.25	15.29	15.13	12.69	12.69	12.69	12.69	12.69	12.69
	0.996	0.996	0.985	0.996	0.791	0.791	0.593	0.593	0.475	0.475
	2011.35	2070.02	1028.99	1028.87	959.74	966.48	959.74	966.48	959.74	966.48
42	2004.3	2004.3	1022.4	1002.4	956	956	956	956	956	956
	33.41	33.41	17.04	16.71	15.93	15.93	15.93	15.93	15.93	15.93
	0.997	0.997	0.977	0.997	0.697	0.697	0.522	0.522	0.418	0.418
	671.75	690.06	458.03	462.67	458.03	462.56	458.03	462.56	458.03	462.56
	668.3	668.3	455.1	455.1	455.1	455.1	455.1	455.1	455.1	455.1
43	11.14	11.14	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59
	0.995	0.995	0.731	0.731	0.487	0.487	0.365	0.365	0.292	0.292
	792.6	808.2	579.66	583.71	579.66	583.71	579.66	583.71	579.66	583.71
	789.7	789.7	577.1	577.1	577.1	577.1	577.1	577.1	577.1	577.1
	13.16	13.16	9.62	9.62	9.62	9.62	9.62	9.62	9.62	9.62
44	0.997	0.997	0.682	0.682	0.455	0.455	0.341	0.341	0.273	0.273

46	1636.52	1699.15	832.73	849.62	612.92	581.49	553.28	562.21	551.4	558.87
	1627.7	1627.7	824.2	818.5	606.7	549.6	548.6	549.6	548.6	549.6
	27.13	27.13	13.74	13.64	10.11	9.16	9.14	9.16	9.14	9.16
	0.995	0.995	0.982	0.989	0.889	0.982	0.738	0.736	0.59	0.589
47	2983.74	3091.77	1590.24	1545.4	1183.86	1042.17	990.59	940.92	918.68	931.87
	2973.8	2973.8	1580.9	1486.9	1171.3	994.9	982.6	912.4	911	911
	49.56	49.56	26.35	24.78	19.52	16.58	16.38	15.21	15.18	15.18
	0.997	0.997	0.937	0.997	0.844	0.993	0.754	0.812	0.651	0.651
48	1351.49	1413.67	696.33	713.9	617.9	635.12	616.89	632.89	616.89	632.89
	1345.7	1345.7	691.7	672.9	612.6	612.9	613.1	613.1	613.1	613.1
	22.43	22.43	11.53	11.22	10.21	10.22	10.22	10.22	10.22	10.22
	0.996	0.996	0.969	0.996	0.729	0.729	0.546	0.546	0.437	0.437
49	660.6	681.61	371.67	380.68	371.67	378.3	371.67	378.3	371.67	378.3
	657.3	657.3	368.6	368.6	368.6	368.6	368.6	368.6	368.6	368.6
	10.96	10.96	6.14	6.14	6.14	6.14	6.14	6.14	6.14	6.14
	0.995	0.995	0.887	0.887	0.591	0.591	0.444	0.444	0.355	0.355
50	2521.81	2579.94	1320.07	1298.9	1158.71	1106.5	1088.83	1094.54	1083.66	1089
	2511.9	2511.9	1312.6	1255.9	1148.1	1080.6	1080	1080	1080.6	1080
	41.87	41.87	21.88	20.93	19.14	18.01	18	18	18.01	18
	0.996	0.996	0.953	0.996	0.726	0.772	0.579	0.579	0.463	0.463
51	738.67	761.34	480.67	488.99	480.67	488.99	480.67	488.99	480.67	488.99
	735.8	735.8	478.1	478.1	478.1	478.1	478.1	478.1	478.1	478.1
	12.26	12.26	7.97	7.97	7.97	7.97	7.97	7.97	7.97	7.97
	0.996	0.996	0.767	0.767	0.511	0.511	0.383	0.383	0.307	0.307
52	2078.36	2165.68	1060.38	1078.67	743.19	723.97	658.8	670.01	658.73	670.01
	2069.9	2069.9	1050	1035.2	737.3	690	653.5	654.3	653.4	654.3
	34.5	34.5	17.5	17.25	12.29	11.5	10.89	10.91	10.89	10.91
	0.996	0.996	0.982	0.996	0.932	0.996	0.789	0.788	0.631	0.63
53	3950.68	4158.46	2009.55	2068.8	1406.69	1407.19	1340.86	1371.45	1340.06	1366.64
	3939.7	3939.7	1996.9	1970.1	1394.3	1334.4	1333.5	1333.5	1333.5	1333.5
	65.66	65.66	33.28	32.84	23.24	22.24	22.23	22.23	22.23	22.23
	0.997	0.997	0.984	0.997	0.939	0.981	0.737	0.737	0.589	0.589
54	1448.34	1491.88	730.79	748.96	627.9	635.19	627.02	633.33	627.02	633.33
	1442.6	1442.6	723.4	721.3	623.1	623.1	623.1	623.1	623.1	623.1
	24.04	24.04	12.06	12.02	10.39	10.39	10.39	10.39	10.39	10.39
	0.996	0.996	0.993	0.996	0.769	0.769	0.577	0.577	0.461	0.461
55	779.82	799.97	447.54	457.35	447.54	452.1	447.54	452.1	447.54	452.1
	776.4	776.4	444	444.4	444	445.1	444	445.1	444	445.1
	12.94	12.94	7.4	7.41	7.4	7.42	7.4	7.42	7.4	7.42
	0.996	0.996	0.87	0.87	0.58	0.579	0.435	0.434	0.348	0.347
56	423.6	437.44	274.88	280.54	274.88	280.54	274.88	280.54	274.88	280.54
	420.3	420.3	272	272	272	272	272	272	272	272
	7.01	7.01	4.53	4.53	4.53	4.53	4.53	4.53	4.53	4.53
	0.992	0.992	0.767	0.767	0.511	0.511	0.383	0.383	0.307	0.307
57	1431.92	1495.56	747.2	748.76	496.61	499.68	483.35	492.52	483.35	492.52
	1425.4	1425.4	741.4	713.1	491.7	478.4	478.4	478.4	478.4	478.4

58	23.76	23.76	12.36	11.89	8.2	7.97	7.97	7.97	7.97	7.97
	0.995	0.995	0.957	0.995	0.962	0.989	0.741	0.741	0.593	0.593
	725.53	745.82	416.81	424.66	416.8	422.41	416.8	422.41	416.8	422.41
	722.2	722.2	414.1	414.1	414.1	414.1	414.1	414.1	414.1	414.1
	12.04	12.04	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
59	0.996	0.996	0.868	0.868	0.579	0.579	0.434	0.434	0.347	0.347
	2256.44	2358.86	1148.17	1178.99	798.42	822.3	796.26	808.24	795.68	805.94
	2247.6	2247.6	1137.6	1123.8	791.6	791.6	791.6	791.6	791.6	791.6
	37.46	37.46	18.96	18.73	13.19	13.19	13.19	13.19	13.19	13.19
	0.996	0.996	0.984	0.996	0.943	0.943	0.707	0.707	0.566	0.566
60	2346.52	2458.26	1189.2	1231.26	825.75	822.54	636.19	641.6	619.65	632.54
	2337.1	2337.1	1175.8	1168.8	814.4	779	630.6	614.1	613	613
	38.95	38.95	19.6	19.48	13.57	12.98	10.51	10.24	10.22	10.22
	0.996	0.996	0.99	0.996	0.953	0.996	0.923	0.948	0.76	0.76
	1668.14	1718.69	919.78	863.88	831.25	841.44	830.1	838.65	830.1	837.17
61	1660.9	1660.9	910.4	830.5	826.6	826.6	826.6	826	826.6	826
	27.68	27.68	15.17	13.84	13.78	13.78	13.78	13.77	13.78	13.77
	0.996	0.996	0.908	0.996	0.667	0.667	0.5	0.501	0.4	0.4
	1721.19	1679.78	862	868.11	751.89	764.12	751.89	760.13	751.89	760.13
	1672.7	1672.7	853.8	836.4	747.9	747	747.9	747	747.9	747
62	27.88	27.88	14.23	13.94	12.47	12.45	12.47	12.45	12.47	12.45
	0.996	0.996	0.976	0.996	0.743	0.743	0.557	0.558	0.446	0.446
	736.46	753.3	519.22	525.79	519.22	525.79	519.22	525.79	519.22	525.79
	733.7	733.7	516	516	516	516	516	516	516	516
	12.23	12.23	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
63	0.996	0.996	0.708	0.708	0.472	0.472	0.354	0.354	0.283	0.283
	1021.06	1055.87	726.81	738.19	726.12	732.54	726.11	732.08	726.11	732.08
	1015	1015	720	720.5	720.5	720.5	720.5	720.5	720.5	720.5
	16.92	16.92	12	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
	0.994	0.994	0.701	0.7	0.467	0.467	0.35	0.35	0.28	0.28
64	2648.94	2751.03	1367.88	1378.03	955.27	982.46	952.82	973.82	952.82	969.81
	2640.1	2640.1	1358.1	1320.4	948.5	948.5	948.5	948.5	948.5	947.4
	44	44	22.64	22.01	15.81	15.81	15.81	15.81	15.81	15.79
	0.997	0.997	0.969	0.997	0.925	0.925	0.694	0.694	0.555	0.556
	1318.7	1356.67	692.35	708.24	689.71	697.7	689.71	694.31	689.71	694.31
65	1311.6	1311.6	684.4	683.4	683.4	682.7	683.4	682.7	683.4	682.7
	21.86	21.86	11.41	11.39	11.39	11.38	11.39	11.38	11.39	11.38
	0.996	0.996	0.954	0.955	0.637	0.638	0.478	0.478	0.382	0.383
	1860.35	1933.7	1014.34	969.55	677.33	691.26	669.76	683.96	669.76	683.45
	1854.1	1854.1	1009	927.1	672.6	665.7	665.7	665.7	665.7	665.2
66	30.9	30.9	16.82	15.45	11.21	11.1	11.1	11.1	11.1	11.09
	0.997	0.997	0.916	0.997	0.916	0.925	0.694	0.694	0.555	0.556
	2018.22	2100.3	1029.53	1051.44	768.62	699.89	598.44	609.55	598.44	606.33
	2010.6	2010.6	1019.3	1006.6	763.6	670.2	591.9	591.9	591.9	591.9
	33.51	33.51	16.99	16.78	12.73	11.17	9.87	9.87	9.87	9.87
67	0.996	0.996	0.983	0.995	0.874	0.996	0.846	0.846	0.677	0.677

69	718.53	744.92	407.65	417.83	407.65	414.7	407.65	414.7	407.65	414.7
	715.2	715.2	404.5	405.1	404.5	404.5	404.5	404.5	404.5	404.5
	11.92	11.92	6.74	6.75	6.74	6.74	6.74	6.74	6.74	6.74
	0.996	0.996	0.88	0.879	0.587	0.587	0.44	0.44	0.352	0.352
70	1330.14	1372.85	669.35	685.66	547.76	554.36	546.02	551.26	546.02	551.26
	1322.9	1322.9	662.7	662.7	542.6	542.6	542.6	542.6	542.6	542.6
	22.05	22.05	11.05	11.05	9.04	9.04	9.04	9.04	9.04	9.04
	0.995	0.995	0.993	0.993	0.808	0.808	0.606	0.606	0.485	0.485
71	2603.46	2714.29	1359.28	1353.98	947.03	906.19	836.03	847.71	836.03	847.71
	2595.4	2595.4	1351.8	1298.4	942.3	865.1	831	831	831	831
	43.26	43.26	22.53	21.64	15.71	14.42	13.85	13.85	13.85	13.85
	0.997	0.997	0.957	0.997	0.916	0.997	0.779	0.779	0.623	0.623
72	2090.5	2160	1059.48	1089.39	862.88	878.45	861.04	873.29	860.74	873.29
	2083.7	2083.7	1054.4	1044.3	855	855	856	855	856	855
	34.73	34.73	17.57	17.41	14.25	14.25	14.27	14.25	14.27	14.25
	0.997	0.997	0.985	0.994	0.81	0.81	0.607	0.607	0.485	0.486
73	2983.73	3116.82	1547.65	1555.21	1233.92	1259.43	1232.18	1252.65	1232.18	1249.16
	2974.5	2974.5	1539.1	1487.3	1227	1227	1227	1227	1227	1227
	49.58	49.58	25.65	24.79	20.45	20.45	20.45	20.45	20.45	20.45
	0.997	0.997	0.964	0.997	0.806	0.806	0.604	0.604	0.483	0.483
74	1480.09	1506.22	770.34	761.81	616.3	620.09	616.3	620.6	616.3	620.6
	1474.1	1474.1	764.3	737	613	613	613	613	613	613
	24.57	24.57	12.74	12.28	10.22	10.22	10.22	10.22	10.22	10.22
	0.996	0.996	0.96	0.996	0.798	0.798	0.599	0.599	0.479	0.479
75	1872.93	1943.25	994.51	973.52	792.68	813.56	791.24	808.83	791.24	805.14
	1865.4	1865.4	985.4	932.7	787.9	787.9	787.9	787.5	787.9	787.5
	31.09	31.09	16.42	15.55	13.13	13.13	13.13	13.13	13.13	13.13
	0.996	0.996	0.943	0.996	0.786	0.786	0.59	0.59	0.472	0.472
76	1337.93	1393.15	700.78	701.11	536.48	489.89	478.54	484.33	478.54	484
	1330.9	1330.9	694	665.4	530.9	470.1	470.1	470.1	470.1	470.1
	22.18	22.18	11.57	11.09	8.85	7.84	7.84	7.84	7.84	7.84
	0.995	0.995	0.954	0.995	0.831	0.939	0.704	0.704	0.563	0.563
77	3036.82	3165.96	1555.47	1590.65	1099.64	1060.09	803.49	830.66	803.13	823.14
	3025.9	3025.9	1537.3	1518.8	1082	1009	796.9	796.9	795.4	796.9
	50.43	50.43	25.62	25.31	18.03	16.82	13.28	13.28	13.26	13.28
	0.996	0.996	0.981	0.995	0.929	0.996	0.946	0.946	0.758	0.757
78	1219.92	1254.34	645.25	631.67	526.77	535.12	526.02	531.76	526.02	531.76
	1212.7	1212.7	636.9	606.5	522	523.1	522	523.1	522	523.1
	20.21	20.21	10.62	10.11	8.7	8.72	8.7	8.72	8.7	8.72
	0.994	0.994	0.947	0.994	0.77	0.769	0.578	0.576	0.462	0.461
79	2207.8	2304.42	1148.52	1149.8	801.21	808.58	782.55	797.96	782.55	795.7
	2199.3	2199.3	1139.1	1099.6	793.9	776.9	777.4	776.9	777.4	777.4
	36.66	36.66	18.99	18.33	13.23	12.95	12.96	12.95	12.96	12.96
	0.996	0.996	0.962	0.996	0.92	0.94	0.705	0.705	0.564	0.564
80	2404.65	2519.43	1208.79	1258.79	863.63	888.25	857.75	875.73	857.75	873.35
	2396.3	2396.3	1201.6	1202.7	857.4	851	850.3	850.7	850.3	850.3

81	39.94	39.94	20.03	20.05	14.29	14.18	14.17	14.18	14.17	14.17
	0.997	0.997	0.994	0.993	0.928	0.935	0.702	0.702	0.562	0.562
	1159.41	1196.71	584.99	600.49	405.61	412.04	405.38	409.6	405.38	409.6
	1153.6	1153.6	578.4	577.3	401	401	401	401	401	401
	19.23	19.23	9.64	9.62	6.68	6.68	6.68	6.68	6.68	6.68
82	0.995	0.995	0.992	0.994	0.954	0.954	0.716	0.716	0.573	0.573
	1691.08	1788.39	852.81	896.4	692.44	710.19	688.69	704.06	688.69	702.34
	1683	1683	843.1	841.5	685.2	685.2	684.4	685.2	684.4	685.2
	28.05	28.05	14.05	14.03	11.42	11.42	11.41	11.42	11.41	11.42
	0.995	0.995	0.993	0.995	0.815	0.815	0.612	0.611	0.49	0.489
83	2927.96	3031.8	1545.37	1515.09	1030.35	1057.38	1028.33	1046.45	1028.33	1043.51
	2917.9	2917.9	1535.7	1458.9	1023	1023	1023	1022	1023	1022
	48.63	48.63	25.6	24.32	17.05	17.05	17.05	17.03	17.05	17.03
	0.997	0.997	0.947	0.997	0.948	0.948	0.711	0.711	0.569	0.569
	2192	2295.02	1126.37	1148.38	781.5	773.25	670.69	690.29	670.69	660.29
84	2184.4	2184.4	1117.6	1092.2	774.1	728.1	666.2	666.2	666.2	666.2
	36.41	36.41	18.63	18.2	12.9	12.14	11.1	11.1	11.1	11.1
	0.997	0.997	0.974	0.997	0.937	0.997	0.817	0.817	0.654	0.654
	3062.38	3194.28	1578.74	1591.83	1477.56	1503.1	1475.82	1494.07	1474.38	1494.07
	3052.6	3052.6	1568.1	1526.3	1470.4	1470.4	1470.4	1469.7	1470.4	1469.7
85	50.88	50.88	26.14	25.44	24.51	24.51	24.51	24.5	24.51	24.5
	0.997	0.997	0.97	0.997	0.69	0.69	0.517	0.518	0.414	0.414
	576.67	588.57	331.55	336.92	331.55	336.92	331.55	336.92	331.55	336.92
	573.1	573.1	328.4	328.4	328.4	328.4	328.4	328.4	328.4	328.4
	9.55	9.55	5.47	5.47	5.47	5.47	5.47	5.47	5.47	5.47
86	0.995	0.995	0.868	0.868	0.579	0.579	0.434	4.434	0.347	0.347
	3098.94	3225.59	1604.71	1617.09	1292.68	1323.26	1290.25	1312.75	1289.38	1309.83
	3090.3	3090.3	1596.9	1547.3	1285.5	1286.1	1286.1	1286.1	1286.1	1286.1
	51.51	51.51	26.62	25.79	21.43	21.44	21.44	21.44	21.44	21.44
	0.997	0.997	0.965	0.996	0.799	0.799	0.599	0.599	0.479	0.479
87	704.32	725.54	427.13	435.75	427.13	433.85	427.13	433.85	427.13	433.85
	701.1	701.1	423.4	424.3	423.4	423.7	423.4	423.7	423.4	423.7
	11.69	11.69	7.06	7.07	7.06	7.06	7.06	7.06	7.06	7.06
	0.996	0.996	0.824	0.823	0.549	0.549	0.412	0.412	0.33	0.329
	3086.67	3182.84	1649.38	1596.86	1058.18	1064.95	10303.52	1042.01	1028.93	1037.09
88	3076.6	3076.6	1639.9	1541	1046.5	1026.1	1024	1024	1024	1024
	51.28	51.28	27.33	25.68	17.44	17.1	17.07	17.07	17.07	17.07
	0.997	0.997	0.935	0.995	0.977	0.996	0.749	0.749	0.599	0.599
	576.24	580.31	408.57	408.57	408.57	408.57	408.57	408.57	408.57	408.57
	573.2	573.2	407	407	407	407	407	407	407	407
89	9.55	9.55	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78
	0.996	0.996	0.701	0.701	0.468	0.468	0.351	0.351	0.281	0.281
	2295.23	2418.92	1159.94	1209.86	829.47	809.66	730.84	754.11	730.26	745.65
	2286.6	2286.6	1151.9	1144.1	817	763	725.2	725.2	725.2	725.2
	38.11	38.11	19.2	19.07	13.62	12.72	12.09	12.09	12.09	12.09
90	0.996	0.996	0.989	0.996	0.929	0.995	0.785	0.785	0.628	0.628

92	2779.52	2904.98	1394.51	1436.92	980.28	1007.88	978.4	994.19	976.81	990.29
	2770.1	2770.1	1385.7	1385.7	973.5	973.5	973.5	973.5	973.5	973.5
	46.17	46.17	23.1	23.1	16.23	16.23	16.23	16.23	16.23	16.23
	0.997	0.997	0.996	0.996	0.945	0.945	0.709	0.709	0.567	0.567
93	601.89	617.73	419.17	422.52	419.17	422.4	419.17	422.4	419.17	422.4
	598.4	598.4	416.1	416.1	416.1	416.1	416.1	416.1	416.1	416.1
	9.97	9.97	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94	6.94
	0.994	0.994	0.715	0.715	0.477	0.477	0.357	0.357	0.286	0.286
94	3435.12	3602.51	1807.57	1803.6	1246.16	1230.14	1182.64	1212.19	1180.91	1201.69
	3423	3423	1793.6	1712.7	1232.5	1174.7	1174.9	1173.6	1174.9	1173.6
	57.05	57.05	29.89	28.55	20.54	19.58	19.58	19.56	19.58	19.56
	0.996	0.996	0.951	0.996	0.923	0.968	0.726	0.727	0.581	0.581
95	604.38	608.76	511.77	512.7	511.77	512.7	511.77	512.7	511.77	512.7
	601.9	601.9	507	507	507	507	507	507	507	507
	10.03	10.03	8.45	8.45	8.45	8.45	8.45	8.45	8.45	8.45
	0.997	0.997	0.592	0.592	0.394	0.394	0.296	0.296	0.237	0.237
96	1152.98	1186.66	702.7	595.92	542.6	549.21	541.73	549.21	541.73	549.21
	1147.4	1147.4	693.9	573.7	539	538.4	539	538.4	539	538.4
	19.12	19.12	11.57	9.56	8.98	8.97	8.98	8.97	8.98	8.97
	0.995	0.995	0.823	0.995	0.706	0.707	0.53	0.53	0.424	0.424
97	623.03	636.06	447.73	451.8	447.73	451.8	447.73	451.8	447.73	451.8
	619.9	619.9	444	444.6	444	444.6	444	444.6	444	444.6
	10.33	10.33	7.4	7.41	7.4	7.41	7.4	7.41	7.4	7.41
	0.995	0.995	0.695	0.694	0.463	0.463	0.347	0.347	0.278	0.278
98	2200.15	2288.61	1121.71	1150.39	1016.32	1035.28	1016.31	1029.58	1016.31	1029.58
	2192.5	2192.5	1114.6	1096.6	1012.3	1012.3	1012.3	1012.3	1012.3	1012.3
	36.54	36.54	18.58	18.28	16.87	16.87	16.87	16.87	16.87	16.87
	0.997	0.997	0.98	0.996	0.719	0.719	0.54	0.54	0.432	0.432
99	1656.65	1745.09	866.79	871.5	597.63	585.41	519.48	531.24	519.48	531.24
	1648.3	1648.3	859.3	824.1	591.4	549.6	514.4	514.4	514.4	514.4
	27.47	27.47	14.32	13.74	9.86	9.16	8.57	8.57	8.57	8.57
	0.995	0.995	0.954	0.995	0.924	0.995	0.797	0.797	0.638	0.638
100	1845.52	1923.72	958.8	967.98	652.39	644.43	501.49	518.53	501.49	514.74
	1836.7	1836.7	944.9	920.1	642.3	612.2	495.3	495.3	495.3	494.3
	30.61	30.61	15.75	15.34	10.71	10.2	8.26	8.26	8.26	8.24
	0.995	0.995	0.967	0.993	0.949	0.995	0.923	0.923	0.738	0.74

Rješenje integralnog BAP i QCAP modela za $\lambda=3.2$ seed 400

N10-1

		Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu																ObjFun = 133	
		Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
										Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	5	12				12	22	1		16	2		11	3	1	10	4		x
2	6	26				26	42	9		43	1		22	2	1	16	3		x
3	6	29				29	43	10		24	2		16	3	1	14	4	x	
4	3	38				38	47	1	1	9	1		7	2		1000	100	x	
5	4	39				39	52	5		24	1	1	13	2		1000	100		x
6	4	39			3	42	51	1		22	1		11	2	1	9	3		x
7	4	45				45	56	12		28	1		14	2	1	11	3	x	
8	4	51				51	61	12		22	1		11	2	1	10	3		x
9	5	70				70	79	4		15	2		10	3	1	9	4		x
10	6	71				71	90	4		46	1		23	2	1	19	3	x	

N10-2

		Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu																ObjFun = 150	
		Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
										Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	4	4				4	16	7		20	1	1	12	2		1000	100		x
2	3	6				6	14	1	1	8	1		100	100		100	100	x	
3	5	10				10	20	11		27	1		14	2	1	10	3		x
4	3	18				18	28	13		13	1	1	10	2		1000	100	x	
5	7	24				24	45	6		32	2	1	21	3		19	4	x	
6	6	26				26	43	10		28	2		19	3	1	17	4		x
7	4	40				40	50	1		19	1	1	10	2		7	3	x	
8	6	42			1	43	58	1		23	2	1	15	3		12	4		x
9	5	43				43	58	11		29	1	1	15	2		14	3		x
10	7	46			4	50	67	9		25	3		19	4	1	17	5	x	

N10-3

		Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu																ObjFun = 146	
		Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
										Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	6	20				20	35	1		23	2	1	15	3		14	4		x
2	6	20				20	33	10		21	2		14	3	1	13	4	x	
3	5	25				25	37	11	1	12	2		8	3		7	4		x
4	4	30			3	33	41	12		24	1		12	2	1	8	3	x	
5	6	37				37	54	1		33	1	1	17	2		13	3	x	
6	6	40				40	52	10		21	2		14	3	1	12	4		x
7	7	43				43	63	9		26	2	1	20	3		1000	100	x	
8	6	55				55	71	1		22	2	1	16	3		1000	100		x
9	4	58				58	68	12		19	1	1	10	2		8	3		x
10	4	98				98	108	1		25	1		13	2	1	10	3	x	

N10-4

		Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu														ObjFun = 127	
	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	X 1 2
1	6	6			6	20	1		23	2		16	3	1	14	4	x
2	5	15			15	29	11		31	1		15	2	1	14	3	x
3	3	22			22	32	1		13	1	1	10	2		1000	100	x
4	4	25			25	32	1		16	1		8	2	1	7	3	x
5	6	32			32	45	1		21	2		14	3	1	13	4	x
6	6	34			34	53	10		24	2	1	19	3		1000	100	x
7	3	41			41	46	1		10	1	1	5	2		1000	100	x
8	6	44		1	45	59	1		24	2		16	3	1	14	4	x
9	5	53			53	60	5		13	2		9	3	1	7	4	x
10	6	61			61	74	10		22	2		15	3	1	13	4	x

N10-5

		Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu														ObjFun = 123	
	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	X 1 2
1	3	20			20	26	1		10	1	1	6	2		1000	100	x
2	5	30			30	43	1		30	1		15	2	1	13	3	x
3	5	37			37	53	8		33	1		17	2	1	16	3	x
4	3	40			40	48	13		11	1	1	8	2		1000	100	x
5	3	50			50	60	1		13	1	1	10	2		1000	100	x
6	5	52			52	61	4		27	1		14	2	1	9	3	x
7	6	53			53	68	1		25	2		17	3	1	15	4	x
8	4	59		2	61	71	9		23	1		11	2	1	10	3	x
9	3	66			66	72	13		11	1	1	6	2		1000	100	x
10	6	77			77	95	1		42	1		21	2	1	18	3	x

N10-6

		Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu														ObjFun = 112	
	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	X 1 2
1	3	6			20	28	13		12	1	1	8	2		1000	100	x
2	5	13			26	37	5		17	2		12	3	1	11	4	x
3	7	21			33	55	6		33	2	1	22	3		1000	100	x
4	4	28			39	49	1		24	1		12	2	1	10	3	x
5	3	34			44	52	13		13	1	1	8	2		1000	100	x
6	3	47			56	61	1		7	1	1	5	2		1000	100	x
7	5	48			57	65	11		24	1		12	2	1	8	3	x
8	3	50			59	66	1		12	1	1	7	2		1000	100	x
9	5	62			70	83	5		38	1		19	2	1	13	3	x
10	6	78			84	94	10		20	2		13	3	1	10	4	x

N10-7



Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 122

	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
									Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	5	9			9	23	1		28	1	1	14	2		1000	100	x	
2	5	21			21	34	11		28	1		14	2	1	13	3	x	
3	3	45			45	54	1		12	1	1	9	2		1000	100		x
4	4	47			47	59	1		17	1	1	12	2		1000	100	x	
5	6	49			49	65	10		44	1		22	2	1	16	3	x	
6	4	69			69	80	1		22	1	1	11	2		1000	100	x	
7	5	80			80	91	1		31	1		16	2	1	11	3	x	
8	5	82			82	92	1		17	2		11	3	1	10	4		x
9	3	118			118	125	1		12	1	1	7	2		1000	100	x	
10	5	128			128	137	1		22	1		11	2	1	9	3	x	

N10-8



Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 141

	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
									Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	6	16			16	30	1		22	2		15	3	1	14	4	x	
2	5	18			18	32	1		35	1		18	2	1	14	3		x
3	6	32			32	53	1		25	2	1	21	3		1000	100	x	
4	4	47			47	57	1		25	1		12	2	1	10	3		x
5	5	61			61	74	1		31	1		16	2	1	13	3	x	
6	4	75			75	83	1		22	1		11	2	1	8	3	x	
7	7	87			87	100	1		25	2		17	3	1	13	4		x
8	4	88			88	98	1		20	1	1	10	2		9	3	x	
9	5	91			91	104	5		37	1		18	2	1	13	3	x	
10	5	99		1	100	114	11		40	1		20	2	1	14	3		x

N10-9



Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 144

	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
									Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	4	8			8	15	12		19	1		10	2	1	7	3		x
2	5	11			11	25	1		28	1	1	14	2		12	3	x	
3	6	11			11	28	10		49	1		24	2	1	17	3	x	
4	5	21			21	32	1		18	2		12	3	1	11	4		x
5	6	26			26	52	1	1	26	2		25	3		1000	100	x	
6	3	34			34	40	13		10	1	1	6	2		1000	100		x
7	6	42			42	64	10		26	2	1	22	3		1000	100	x	
8	3	54			54	61	7		12	1	1	7	2		1000	100		x
9	6	81			81	98	1		26	2	1	17	3		1000	100		x
10	3	107			107	114	1		10	1	1	7	2		1000	100		x

N10-10



Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun

= 129

	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
									Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	6	23			23	35	1		19	2		13	3	1	12	4	x	
2	6	35			35	51	1		46	1		23	2	1	16	3	x	
3	3	53			53	60	1		10	1	1	7	2		1000	100		x
4	7	60			60	80	9		29	2	1	20	3		1000	100		x
5	3	64			64	73	1		10	1	1	9	2		1000	100		x
6	4	71			71	81	4		19	1	1	10	2		9	3	x	
7	3	75			75	83	1		10	1	1	8	2		1000	100		x
8	5	76			76	93	11		37	1		18	2	1	17	3	x	
9	5	77		3	80	89	4		28	1		14	2	1	9	3		x
10	5	105			105	113	11		15	2		10	3	1	8	4	x	

N15-1

Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 197

																				X	
		Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	1			2			3					1	2
									opt	Trajanje	BrojDiz	opt	Trajanje	BrojDiz	opt	Trajanje	BrojDiz				
1	5	12				12	22	1		16	2		11	3	1	10	4			x	
2	6	26				26	42	10		43	1		22	2	1	16	3			x	
3	6	29				29	45	10		24	2	1	16	3		14	4		x		
4	3	38				38	45	1		9	1	1	7	2		1000	100			x	
5	4	39				39	52	6		24	1	1	13	2		1000	100		x		
6	4	39			3	42	51	9		22	1		11	2	1	9	3			x	
7	4	45				45	56	12		28	1		14	2	1	11	3		x		
8	4	51				51	61	5		22	1		11	2	1	10	3			x	
9	5	70				70	79	1		15	2		10	3	1	9	4			x	
10	6	71				71	90	10		46	1		23	2	1	19	3		x		
11	4	76				76	88	1		20	1	1	12	2		1000	100		x		
12	3	78				78	86	13	1	8	1		1000	100		1000	100			x	
13	5	82				82	92	1		27	1		14	2	1	10	3			x	
14	3	90				90	100	13		13	1	1	10	2		1000	100		x		
15	7	96				96	115	9		32	2		21	3	1	19	4			x	

N15-2

Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 224

	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	X 1 2
1	6	2			2	19	1		28	2		19	3	1	17	4	x
2	4	16			16	23	12		19	1		10	2	1	7	3	x
3	6	18		1	19	34	10		23	2	1	15	3		12	4	x
4	5	19			19	34	1		29	1	1	15	2		14	3	x
5	7	22		1	23	40	1		25	3		19	4	1	17	5	x
6	6	44			44	59	10		23	2	1	15	3		14	4	x
7	6	44			44	57	6		21	2		14	3	1	13	4	x
8	5	49			49	61	5	1	12	2		8	3		7	4	x
9	4	54		3	57	65	1		24	1		12	2	1	8	3	x
10	6	61			61	78	10		33	1	1	17	2		13	3	x
11	6	64			64	76	8		21	2		14	3	1	12	4	x
12	7	67			67	87	1		26	2	1	20	3		1000	100	x
13	6	79			79	95	1		22	2	1	16	3		1000	100	x
14	4	82			82	92	12		19	1	1	10	2		8	3	x
15	4	122			122	132	1		25	1		13	2	1	10	3	x

N15-3

		Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu															ObjFun = 185	
	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
									Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	6	6			6	20	1		23	2		16	3	1	14	4		x
2	5	15			15	29	11		31	1		15	2	1	14	3	x	
3	3	22			22	32	1		13	1	1	10	2		1000	100	x	
4	4	25			25	32	1		16	1		8	2	1	7	3		x
5	6	32			32	45	1		21	2		14	3	1	13	4	x	
6	6	34			34	53	7		24	2	1	19	3		1000	100		x
7	3	41			41	46	13		10	1	1	5	2		1000	100		x
8	6	44		1	45	59	1		24	2		16	3	1	14	4	x	
9	5	53			53	60	1		13	2		9	3	1	7	4		x
10	6	61			61	74	10		22	2		15	3	1	13	4	x	
11	3	68			68	74	1		10	1	1	6	2		1000	100		x
12	5	78			78	91	1		30	1		15	2	1	13	3	x	
13	5	85			85	101	1		33	1		17	2	1	16	3		x
14	3	88			88	96	10		11	1	1	8	2		1000	100		x
15	3	98			98	108	1		13	1	1	10	2		1000	100	x	

N15-4

		Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu															ObjFun = 178	
	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1		opt	2		opt	3		X	
									Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz		Trajanje	BrojDiz	1	2
1	5	4			4	13	11		27	1		14	2	1	9	3		x
2	6	5			5	20	10		25	2		17	3	1	15	4	x	
3	4	11			11	22	1		23	1	1	11	2		10	3		x
4	3	18			18	24	8		11	1	1	6	2		1000	100		x
5	6	29			29	47	7		42	1		21	2	1	18	3	x	
6	3	30			30	38	13		12	1	1	8	2		1000	100	x	
7	5	37			37	48	1		17	2		12	3	1	11	4		x
8	7	45		2	47	69	1		33	2	1	22	3		1000	100	x	
9	4	52			52	62	1		24	1		12	2	1	10	3		x
10	3	58			58	66	13		13	1	1	8	2		1000	100	x	
11	3	71			71	76	1		7	1	1	5	2		1000	100		x
12	5	72			72	80	1		24	1		12	2	1	8	3	x	
13	3	74			74	81	13		12	1	1	7	2		1000	100		x
14	5	86			86	99	1		38	1		19	2	1	13	3	x	
15	6	102			102	112	1		20	2		13	3	1	10	4		x

N15-5

Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 199

	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	X 1 2
1	5	9			9	23	1		28	1	1	14	2		1000	100	x
2	5	21			21	34	1		28	1		14	2	1	13	3	x
3	3	45			45	54	1		12	1	1	9	2		1000	100	x
4	4	47			47	59	12		17	1	1	12	2		1000	100	x
5	6	49			49	65	1		44	1		22	2	1	16	3	x
6	4	69			69	80	1		22	1	1	11	2		1000	100	x
7	5	80			80	91	1		31	1		16	2	1	11	3	x
8	5	82			82	92	1		17	2		11	3	1	10	4	x
9	3	118			118	125	1		12	1	1	7	2		1000	100	x
10	5	128			128	137	1		22	1		11	2	1	9	3	x
11	6	136			136	150	1		22	2		15	3	1	14	4	x
12	5	138			138	152	1		35	1		18	2	1	14	3	x
13	6	152			152	173	1		25	2	1	21	3		1000	100	x
14	4	167			167	177	1		25	1		12	2	1	10	3	x
15	5	181			181	194	1		31	1		16	2	1	13	3	x

N15-6

Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 211

	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	X 1 2
1	4	3			3	11	1		22	1		11	2	1	8	3	x
2	7	15			15	28	1		25	2		17	3	1	13	4	x
3	4	16			16	26	1		20	1	1	10	2		9	3	x
4	5	19			19	32	11		37	1		18	2	1	13	3	x
5	5	27		1	28	42	1		40	1		20	2	1	14	3	x
6	4	32			32	42	12		19	1	1	10	2		7	3	x
7	5	35			35	49	11		28	1	1	14	2		12	3	x
8	6	35			35	52	1		49	1		24	2	1	17	3	x
9	5	45			45	56	1		18	2		12	3	1	11	4	x
10	6	50			50	76	10	1	26	2		25	3		1000	100	x
11	3	58			58	64	1		10	1	1	6	2		1000	100	x
12	6	66			66	88	1		26	2	1	22	3		1000	100	x
13	3	78			78	85	1		12	1	1	7	2		1000	100	x
14	6	105			105	122	1		26	2	1	17	3		1000	100	x
15	3	131			131	138	1		10	1	1	7	2		1000	100	x

N20-1

		Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu														ObjFun = 283	
	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	X 1 2
1	5	12			12	22	1		16	2		11	3	1	10	4	x
2	6	26			26	42	1		43	1		22	2	1	16	3	x
3	6	29			29	45	1		24	2	1	16	3		14	4	x
4	3	38			38	45	7		9	1	1	7	2		1000	100	x
5	4	39			39	52	8		24	1	1	13	2		1000	100	x
6	4	39		3	42	51	12		22	1		11	2	1	9	3	x
7	4	45			45	56	12		28	1		14	2	1	11	3	x
8	4	51			51	61	1		22	1		11	2	1	10	3	x
9	5	70			70	79	1		15	2		10	3	1	9	4	x
10	6	71			71	90	5		46	1		23	2	1	19	3	x
11	4	76			76	88	1		20	1	1	12	2		1000	100	x
12	3	78			78	86	6	1	8	1		1000	100		1000	100	x
13	5	82			82	92	11		27	1		14	2	1	10	3	x
14	3	90			90	100	1		13	1	1	10	2		1000	100	x
15	7	96			96	115	1		32	2		21	3	1	19	4	x
16	6	98			98	117	5		28	2	1	19	3		17	4	x
17	4	112			112	122	1		19	1	1	10	2		7	3	x
18	6	114		1	115	130	10		23	2	1	15	3		12	4	x
19	5	115			115	130	5		29	1	1	15	2		14	3	x
20	7	118		4	122	139	9		25	3		19	4	1	17	5	x

N20-2

		Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu														ObjFun = 273	
	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	X 1 2
1	6	20			20	35	1		23	2	1	15	3		14	4	x
2	6	20			20	33	5		21	2		14	3	1	13	4	x
3	5	25			25	37	7	1	12	2		8	3		7	4	x
4	4	30		3	33	41	1		24	1		12	2	1	8	3	x
5	6	37			37	54	10		33	1	1	17	2		13	3	x
6	6	40			40	52	5		21	2		14	3	1	12	4	x
7	7	43			43	63	1		26	2	1	20	3		1000	100	x
8	6	55			55	71	1		22	2	1	16	3		1000	100	x
9	4	58			58	68	8		19	1	1	10	2		8	3	x
10	4	98			98	108	6		25	1		13	2	1	10	3	x
11	6	102			102	116	10		23	2		16	3	1	14	4	x
12	5	111			111	125	8		31	1		15	2	1	14	3	x
13	3	118			118	128	13		13	1	1	10	2		1000	100	x
14	4	121			121	128	1		16	1		8	2	1	7	3	x
15	6	128			128	141	1		21	2		14	3	1	13	4	x
16	6	130			130	149	1		24	2	1	19	3		1000	100	x
17	3	137			137	142	7		10	1	1	5	2		1000	100	x
18	6	140		1	141	155	1		24	2		16	3	1	14	4	x
19	5	149			149	156	1		13	2		9	3	1	7	4	x
20	6	157			157	170	1		22	2		15	3	1	13	4	x

N20-3

Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 237

	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	X 1 2
1	3	20			20	26	1		10	1	1	6	2		1000	100	x
2	5	30			30	43	11		30	1		15	2	1	13	3	x
3	5	37			37	53	1		33	1		17	2	1	16	3	x
4	3	40			40	48	1		11	1	1	8	2		1000	100	x
5	3	50			50	60	6		13	1	1	10	2		1000	100	x
6	5	52			52	61	11		27	1		14	2	1	9	3	x
7	6	53			53	68	10		25	2		17	3	1	15	4	x
8	4	59		2	61	71	1		23	1		11	2	1	10	3	x
9	3	66			66	72	13		11	1	1	6	2		1000	100	x
10	6	77			77	95	1		42	1		21	2	1	18	3	x
11	3	78			78	86	7		12	1	1	8	2		1000	100	x
12	5	85			85	96	11		17	2		12	3	1	11	4	x
13	7	93		2	95	117	9		33	2	1	22	3		1000	100	x
14	4	100			100	110	12		24	1		12	2	1	10	3	x
15	3	106			106	114	1		13	1	1	8	2		1000	100	x
16	3	119			119	124	1		7	1	1	5	2		1000	100	x
17	5	120			120	128	1		24	1		12	2	1	8	3	x
18	3	122			122	129	13		12	1	1	7	2		1000	100	x
19	5	134			134	147	1		38	1		19	2	1	13	3	x
20	6	150			150	160	1		20	2		13	3	1	10	4	x

N20-4

Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 263

	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	opt	1 Trajanje	BrojDiz	opt	2 Trajanje	BrojDiz	opt	3 Trajanje	BrojDiz	1	X 2
1	5	9			9	23	1		28	1	1	14	2		1000	100		x
2	5	21			21	34	1		28	1		14	2	1	13	3	x	
3	3	45			45	54	1		12	1	1	9	2		1000	100		x
4	4	47			47	59	12		17	1	1	12	2		1000	100	x	
5	6	49			49	65	1		44	1		22	2	1	16	3	x	
6	4	69			69	80	1		22	1	1	11	2		1000	100	x	
7	5	80			80	91	1		31	1		16	2	1	11	3		x
8	5	82			82	92	1		17	2		11	3	1	10	4	x	
9	3	118			118	125	1		12	1	1	7	2		1000	100	x	
10	5	128			128	137	1		22	1		11	2	1	9	3	x	
11	6	136			136	150	1		22	2		15	3	1	14	4		x
12	5	138			138	152	1		35	1		18	2	1	14	3	x	
13	6	152			152	173	1		25	2	1	21	3		1000	100		x
14	4	167			167	177	1		25	1		12	2	1	10	3	x	
15	5	181			181	194	1		31	1		16	2	1	13	3	x	
16	4	195			195	203	1		22	1		11	2	1	8	3	x	
17	7	207			207	220	1		25	2		17	3	1	13	4		x
18	4	208			208	218	1		20	1	1	10	2		9	3	x	
19	5	211			211	224	11		37	1		18	2	1	13	3	x	
20	5	219		1	220	234	11		40	1		20	2	1	14	3		x



Operativni plan dodjele vezova i dizalica po brodu

ObjFun = 270

	Duljina	Dolazak	Ubrzanje	Cekanje	Pocetak	Zavrsetak	Vez	1			2			3			X	
								opt	Trajanje	BrojDiz	opt	Trajanje	BrojDiz	opt	Trajanje	BrojDiz	1	2
1	4	8			8	15	6		19	1		10	2	1	7	3		x
2	5	11			11	25	1		28	1	1	14	2		12	3	x	
3	6	11			11	28	10		49	1		24	2	1	17	3	x	
4	5	21			21	32	1		18	2		12	3	1	11	4		x
5	6	26			26	52	4	1	26	2		25	3		1000	100	x	
6	3	34			34	40	1		10	1	1	6	2		1000	100		x
7	6	42			42	64	7		26	2	1	22	3		1000	100		x
8	3	54			54	61	13		12	1	1	7	2		1000	100		x
9	6	81			81	98	1		26	2	1	17	3		1000	100		x
10	3	107			107	114	1		10	1	1	7	2		1000	100		x
11	6	119			119	131	1		19	2		13	3	1	12	4		x
12	6	137			137	153	7		46	1		23	2	1	16	3		x
13	3	144			144	151	13		10	1	1	7	2		1000	100		x
14	7	148			148	168	4		29	2	1	20	3		1000	100	x	
15	3	160			160	169	1		10	1	1	9	2		1000	100	x	
16	4	167			167	177	7		19	1	1	10	2		9	3		x
17	3	171			171	179	1		10	1	1	8	2		1000	100	x	
18	5	172			172	189	11		37	1		18	2	1	17	3	x	
19	5	173			173	182	11		28	1		14	2	1	9	3		x
20	5	201			201	209	1		15	2		10	3	1	8	4		x