

Dr. sc. **Zdenka Zenzerović**
Pomorski fakultet u Rijeci
Studentska 2, Rijeka, Hrvatska

Kvantitativne metode u funkciji optimalnog funkcioniranja sustava kontejnerskoga prijevoza morem

Sažetak

Tendencija povećanja količine tereta koji se prevozi kontejnerima zahtijeva daljnja istraživanja sustava kontejnerskoga prijevoza morem s ciljem postizanja optimalnog funkcioniranja promatranog sustava. U ovom je radu pokazano da se taj cilj može ostvariti primjenom odabranih kvantitativnih metoda, i to sa stajališta sudionika u kontejnerskom prometu: sa stajališta luke, tj. lučkoga kontejnerskog terminala te sa stajališta broдача, tj. kontejnerskog broда. Modeliranje lučkoga kontejnerskog terminala pretpostavlja određivanje optimalnog kapaciteta terminala, a sa stajališta broдача od velikog je značenja za uspješnost poslovanja programiranje prijevoza praznih kontejnera te određivanje optimalne strukture prijevoza tereta kontejnerskim brodom. U radu su korištene metode iz teorije sustava, statistike i operacijskih istraživanja. Prikazane metode i modeli su testirani na primjerima s realnim podacima.

Ključne riječi: kvantitativne metode, opća teorija sustava, teorija redova čekanja, linearno programiranje, lučki kontejnerski terminal, prijevoz kontejnera, kontejnerski brod

1. Uvod

Morem se u svijetu godišnje preveze više od šest milijardi tona tereta [15]. Činjenica, da se u ukupnom prometu prijevoz kontejnerima u razdoblju od 1990. do 1998. godine udvostručio i da je 1998. dostigao iznos od 175 milijuna TEU (uključivo 20 % praznih kontejnera) s prognozom povećanja prometa od 1998. do današnjih dana za više od 50 % [28], ukazuje na važnost i potrebu izučavanja sustava kontejnerskog prometa morem.

Cilj je ovog rada prikazati primjenu odabranih kvantitativnih metoda u procesu donošenja odgovarajućih poslovnih odluka koje omogućuju optimalno funkcioniranje sustava kontejnerskog prijevoza morem.

Sustav kontejnerskoga prijevoza morem sadrži tri komponente [7, p.13]: kontejner kao tehničko sredstvo za smještaj tereta, lučki kontejnerski terminal kao prostor u luci s izgrađenom specifičnom infrastrukturom radi obavljanja operacija ukrcaja, iskrcaja i prekrcaja kontejnera te kontejnerski brod kao plovno prijevozno sredstvo kojim se

kontejneri prevoze od ishodišne do odredišne luke.

Povećanje uspješnosti poslovanja sustava moguće je postići sagledavanjem cjelokupnog procesa, tj. svih komponenata sustava kontejnerskoga prijevoza morem. Zato je u ovom radu problematika morske kontejnerske tehnologije prikazana sa stajališta sudionika u kontejnerskom prometu i to sa stajališta luke, tj. lučkoga kontejnerskoga terminala te brodar, tj. kontejnerskoga broda.

Modeliranje lučkoga kontejnerskog terminala pretpostavlja određivanje optimalnoga kapaciteta terminala, a to je moguće učiniti na sljedeći način:

Definirati kontejnerski terminal kao sustav primjenom teorije općih sustava, a nakon toga kao sustav masovnoga opsluživanja. Koristeći teoriju redova čekanja odrediti parametre i pokazatelje funkcioniranja promatranoga procesa opsluživanja da bi se na kraju izračunao potreban, odnosno optimalan broj pristana za očekivani promet kontejnera ili broj kontejnerskih brodova koji će tijekom promatrane jedinice vremena stići na lučki kontejnerski terminal.

U procesu prijevoza kontejnera brodom izdvojeni su problemi koji, u velikoj mjeri, utječu na uspješnost poslovanja kontejnerskoga broda, odnosno brodar, a to su programiranje prijevoza praznih kontejnera iz više luka ukrcaja u više luka iskrcaja te određivanje optimalne strukture prijevoza tereta kontejnerskim brodom.

Da bi se ostvario postavljeni cilj, u radu je korišteno više metoda iz teorije sustava, statistike i operacijskih istraživanja. Međutim, s obzirom na obim rada, postupak primjene pojedine metode nije objašnjen, ali su zato, u popisu literature, navedeni objavljeni radovi¹ u kojima je detaljno prikazana primjena odgovarajuće metode, odnosno modela.

2. Sustavni pristup definiranju lučkoga kontejnerskog terminala

Lučki kontejnerski terminal dio je lučkog sustava namijenjen prekrcaju kontejnera izravnim ili posrednim rukovanjem između kontejnerskih brodova i kopnenih prijevoznih sredstava i obrnuto te ostalim djelatnostima vezanim za promet kontejnera [19], [22].

Lučki kontejnerski terminal je složen sustav sa sljedećim podsustavima kao svojim elementima [19]:

- podsustav **brod** predstavlja element na koji je usmjerena aktivnost, a obuhvaća brodove, odnosno kontejnere prema vrsti i količini,
- podsustav **operativna obala** uključuje pristane, obalne kontejnerske dizalice i krcalište (operativnu površinu namijenjenu operacijama s kontejnerima),
- podsustav **slagalište** je otvoreni prostor uređen za smještaj i čuvanje različitih vrsta kontejnera do njihovog ukrcaja na brod ili utovara na kopneno vozilo,

¹ Radovi autorice i koautora se kao separati mogu naći u biblioteci Pomorskoga fakulteta u Rijeci te Sveučilišnoj knjižnici u Rijeci.

- podstav **prometnica za unutarnji prijevoz** čine željeznički kolosijeci, željeznička postrojenja te cestovne prometnice,
- podstav **rukovanja kontejnerima** obuhvaća operacije s kontejnerima na sidrištu, pristanu i slagalištu,
- podstav **organizacije** je element terminala sa zadatkom planiranja, koordinacije, nadzora i kontrole prekrcajnog procesa, administrativnog praćenja kontejnera, fakturiranja usluga lučkoga kontejnerskog terminala, ...

Elementi lučkoga kontejnerskog terminala su tehničke, tehnološke, ekonomske, pravne, ekološke i organizacijske prirode i nalaze se u odnosima međusobne funkcionalne povezanosti.

Projektiranje svakog podstavu zasebno onemogućuje definiranje lučkoga kontejnerskog terminala kao cjeline, odnosno određivanje veza između navedenih podstavu. Stoga sustavni pristup nalaže da se svi elementi lučkoga kontejnerskog terminala trebaju razmatrati zajedno kao podstavu u međusobnoj interakciji da bi se moglo pratiti poslovanje lučkoga kontejnerskog terminala i postići njegovo optimalno funkcioniranje.

Prema teoriji općih sustava za svaki sustav, tako je i za lučki kontejnerski terminal potrebno definirati UC i SC-strukturu [19]. UC struktura je skup svih elemenata, veza između elemenata te skup veza između elemenata i okoline, a ST-struktura skup stanja i prijelaza između tih stanja, pri čemu je prijelaz sustava promjena iz jednog stanja sustava u drugo stanje.

Stanje lučkoga kontejnerskog terminala definirano je trenutnim vrijednostima svih veličina u sustavu. Promjenom ulazno-izlaznih veličina sustav prelazi iz jednog u drugo stanje. Na taj se način prati **ponašanje** lučkoga kontejnerskog terminala koje je predstavljeno brojnim stanjima kroz koja terminal prolazi u određenim vremenskim intervalima. Moguća stanja lučkoga kontejnerskog terminala su [19]: stanje mirovanja, stanje pripremnih radnji, stanje prekrcanja, stanje prijevoza, stanje skladištenja, stanje održavanja i stanje završnih radnji.

Nadalje je potrebno napomenuti, da lučki kontejnerski terminal kao sustav postoji, ako je brod dio UC-strukture tog sustava. Brod sudjeluje u ponašanju cijelog terminala; od trenutka dolaska na terminal, brod postaje njezin entitet i odlazak (isplovljavanje) broda predstavlja kraj životnog vijeka tog entiteta koji s nekim promijenjenim karakteristikama (brod je prekrcan) ponovno postaje realni entitet.

Koristeći metodologiju općih sustava, moguće je pratiti ponašanje lučkoga kontejnerskog terminala kao sustava u promatranom vremenu i odgovarajućim mjerama planiranja, organizacije, tehničkog i tehnološkog razvoja utjecati na ponašanje terminala i prelaskom iz jednog stanja u drugo voditi ga prema stanju koje je, sa stajališta postavljenog kriterija, optimalno s obzirom na zadane uvjete.

3. Model određivanja optimalnoga kapaciteta lučkoga kontejnerskog terminala

Lučki kontejnerski terminal je stohastički sustav u kojem su i dolasci brodova i trajanje lučke usluge slučajne varijable u statističkom smislu. Osim toga, lučki sustav je složen od više podsustava od kojih svaki djeluje i kao zasebna cjelina i kao element cijelog sustava, tako da izlazne veličine jednog podsustava predstavljaju ulazne veličine sljedećeg podsustava.

Zbog navedenog je vrlo teško uskladiti međusobno elemente proizvodnje lučke usluge (sredstva za rad, teret kao predmet rada i ljudski potencijal) promatrane s različitih stajališta: ekonomskog, tehničkog, tehnološkog, pravnog, ekološkog i organizacijskog te s elementima izvan lučkog sustava. Od navedenih elemenata od posebne je važnosti kapacitet lučkoga kontejnerskog terminala koji utječe na mogućnosti ostvarenja postavljenog plana proizvodnje, a time i plana realizacije lučkih usluga.

3.1. Definiranje optimalnog kapaciteta lučkoga kontejnerskog terminala

U praksi se najčešće rabi termin “kapacitet lučkoga kontejnerskog terminala” podrazumijevajući, pritom, prometni kapacitet lučkoga kontejnerskog terminala.

Propusna moć pristana kontejnerskog terminala [5, str.38] definirana je protokom kontejnera, odnosno tereta na pristanu i zavisi od tehničke opremljenosti i primijenjenog tehnološkog procesa na kontejnerskom terminalu. To je prekrcajni učinak izražen brojem ukrcanih/iskrcanih kontejnera ili količinom tereta u promatranoj jedinici vremena. Zbroj propusne moći pojedinih pristana na kontejnerskom terminalu je kapacitet lučkoga kontejnerskog terminala.

Optimalan kapacitet lučkoga kontejnerskog terminala pretpostavlja da su kapaciteti pojedinih elemenata sustava (infrastrukture, suprastrukture, ljudskog rada, itd.) usklađeni međusobno i s postojećom potražnjom za lučke operacije s kontejnerima i, kao takvi, čine funkcionalnu cjelinu koja korisnicima omogućuje pružanje lučkih usluga sa što manje zastoja, a kontejnerskom terminalu rentabilno poslovanje.

Problem određivanja optimalnog kapaciteta lučkoga kontejnerskog terminala svodi se na izračunavanje optimalnog broja pristana, budući da kapacitet pristana determinira potreban kapacitet ostalih podsustava lučkoga kontejnerskog terminala, a time i propusnu moć kontejnerskog terminala kao cjeline.

Međutim, u praksi je vrlo teško odrediti i dimenzionirati optimalan kapacitet lučkoga kontejnerskog terminala zbog oscilacija lučkog prekrcaja uvjetovanih neravnomjernim pristizanjem kontejnerskih brodova na terminal te nejednolikom trajanju operacija s kontejnerima. Kontejnerski terminal bi trebao raspolagati rezervnim kapacitetom za slučajeve dnevnog ili mjesečnog maksimalnog prometa da bi se u svakom trenutku mogao obaviti prekrcaj kontejnera, ali takve bi rezerve kapaciteta smanjile stupanj iskorištenja terminala, a također bi povećale udio fiksnih troškova u njegovom poslovanju.

Jedan od načina određivanja optimalnog kapaciteta lučkoga kontejnerskog terminala je primjena kvantitativnih metoda, i to teorije redova čekanja.

3.2. Definiranje lučkoga kontejnerskog terminala kao sustava opsluživanja

Lučki kontejnerski terminal se definira kao **sustav opsluživanja sa sljedećom strukturom**: ulazne jedinice su kontejnerski brodovi koji formiraju (ili ne) red čekanja (zavisno od trenutačne situacije) da bi bili opsluženi (iskrcaj kontejnera) na pristanu kontejnerskog terminala te nakon obavljene usluge izašli iz sustava. Vrijedi i obrnuto, u slučaju ukrcaja kontejnera na brod.

Statističkom analizom²² podataka o broju pristiglih brodova prema danima i mjesecima odabranog kontejnerskog terminala ustanovljeno je da ne postoji značajna zavisnost u redosljedu dnevnih dolazaka kontejnerskih brodova, tj. da su dolasci brodova u statističkom smislu slučajni. Analogan zaključak dobiva se statističkom analizom i duljine vremena opsluživanja kontejnerskih brodova.

Iz prethodnih zaključaka slijedi da se **broj dolazaka brodova i duljina vremena njihovog opsluživanja mogu uzeti kao slučajne varijable**, a zatim empirijske razdiobe tih varijabli aproksimirati s odgovarajućim teorijskim razdiobama. U tom se slučaju za izračunavanje pokazatelja funkcioniranja lučkoga kontejnerskog terminala može primijeniti analitički pristup pomoću teorije redova čekanja.

Operativna obala s određenim brojem pristana predstavlja sustav opsluživanja u kojem su ulazne jedinice brodovi, a usluge obavljaju kanali opsluživanja-pristani s odgovarajućim uređajima za obavljanje operacija s kontejnerima. Ako u trenutku pristizanja broda pristan nije slobodan, brod je prisiljen čekati dok se pristan ne oslobodi. Prema tome, operativna obala s pristanima je višekanalni sustav opsluživanja s čekanjem ispred svakog kanala.

Ostali podsustavi lučkoga kontejnerskog terminala mogu se, također, definirati kao sustavi opsluživanja.

Usklađivanjem kapaciteta pojedinih sustava na način da izlaz iz jednog podsustava predstavlja ulaz u sljedeći podsustav postiže se efikasno funkcioniranje lučkoga kontejnerskog terminala u cjelini.

3.3. Pokazatelji funkcioniranja lučkoga kontejnerskog terminala

Osnovni parametri lučkoga kontejnerskog terminala su **intenzitet toka dolazaka brodova i intenzitet opsluživanja**.

²² Jačina i oblik veze između promatranih pojava ispituje se statističkom metodom korelacije za grupirane podatke. O tomu detaljnije vidjeti u radu Z. Zenzerović (1995), Optimizacijski modeli planiranja kapaciteta morskih luka [16, str.47-53].

Za odabrani sustav kontejnerskog terminala parametar λ je prosječan broj kontejnerskih brodova, odnosno kontejnera koji pristižu na terminal tijekom promatrane vremenske jedinice (primjerice: tijekom godine, mjeseca ili dana).

Analogno se objašnjava i intenzitet opsluživanja. Za odabrani sustav kontejnerskog terminala μ je prosječan broj kontejnerskih brodova ili kontejnera koji se mogu opslužiti u jedinici vremena na pojedinom pristanu.

Parametar μ je, zapravo, propusna moć jednog pristana, a umnožak $S \times \mu$, gdje je S oznaka za broj pristana, je propusna moć, odnosno kapacitet kontejnerskog terminala.

Osnovni pokazatelj sustava opsluživanja je **stupanj opterećenja pristana ili intenzitet prometa** ρ koji predstavlja količnik intenziteta toka dolazaka i intenziteta opsluživanja:

$$\rho = \lambda/\mu . \quad (1)$$

Ako je $\lambda > \mu$, jedan pristan nije dovoljan jer je stupanj njegovog opterećenja veći od 100 %. U tom slučaju potrebno je povećavati broj pristana sve dotle dok se ne zadovolji uvjet stabilnosti sustava opsluživanja da je koeficijent iskorištenja sustava ρ/S , odnosno $\lambda/\mu \times S < 1$ [21, str.17].

U praksi se vrijednosti parametara λ i μ određuju na temelju empirijskih podataka ili procjenom, zavisno od cilja i predmeta istraživanja.

Vrijednost λ predstavlja stvarni promet ili očekivani promet kontejnerskog terminala, zavisno od vremena za koje se provodi istraživanje. Očekivani promet dobiva se primjenom metoda predviđanja prometne potražnje koje su detaljnije obrađene u radu [17],[25],[24, str.161-192].

Proračun intenziteta opsluživanja kontejnerskog pristana, koji zavisi od mnogih čimbenika, izrađen je na primjeru riječke luke i prikazan u odjeljku 3.5. ovog rada.

Ostali pokazatelji sustava opsluživanja na kontejnerskom terminalu su: vjerojatnost da se na terminalu ne nalazi niti jedan brod, tj. da je pristan nezauzet, vjerojatnost opsluživanja, tj. vjerojatnost da će brod koji pristiže na terminal biti opslužen, vjerojatnost da su svi pristani zauzeti, tj. da će brod čekati, prosječan broj brodova u redu čekanja, prosječan broj brodova na kontejnerskom terminalu, tj. broj brodova u redu čekanja i broj brodova koji se upravo opslužuju, prosječno vrijeme broda u redu čekanja, tj. vrijeme čekanja broda prije nego je opslužen, prosječno vrijeme boravka broda na terminalu, tj. vrijeme čekanja broda u redu i vrijeme opsluživanja, ...

Prema klasifikaciji problema redova čekanja, kontejnerski terminal je sustav s čekanjem koji dozvoljava beskonačni broj brodova u redu čekanja i najčešće s Poissonovom razdiobom za dolaske brodova i vrijeme njihovog opsluživanja, odnosno s oznakom $M/M/S/\infty$.

Pokazatelji funkcioniranja kontejnerskog terminala izračunavaju se prema odgovarajućim formulama teorije redova čekanja [21, str. 20-26].

Odluka o **optimalnom broju pristana** kontejnerskog terminala zavisi od postav-

ljenog kriterija optimizacije, primjerice: postotka iskorištenja pristana, duljine vremena čekanja broda u redu, broja brodova u redu čekanja ili troškova čekanja broda i nezauzetosti pristana, odnosno odabire se onaj kriterij koji se drži najvažnijim za efikasno funkcioniranje kontejnerskog terminala.

Efikasnost kontejnerskog terminala najčešće se u praksi određuje pomoću pokazatelja duljine vremena boravka broda na terminalu (vrijeme broda provedeno u redu čekanja i vrijeme opsluživanja broda) i ona se povećava ili povećanjem broja pristana ili skraćivanjem prosječnog vremena opsluživanja. Međutim, povećanjem broja pristana, povećat će se vjerojatnost da su pristani slobodni, a to znači da će se povećati nezauzetost pristana. Isto tako, skraćivanje vremena opsluživanja broda može utjecati na kvalitetu usluge te na smanjenje broja dolazaka brodova. Zato se efikasnost kontejnerskog terminala najbolje može odrediti uvođenjem vrijednosnih pokazatelja, tj. pomoću troškova, budući da se u praksi čekanje broda plaća, a nezauzetost pristana se, također, može vrijednosno izraziti.

3.4. Model troškova čekanja lučkoga kontejnerskog terminala

Na kontejnerskom terminalu pojavljuje se u određenim intervalima čekanje brodova prije nego započnu ukrcajne/iskrcajne operacije ili "čekanje", odnosno nezauzetost kontejnerskog pristana kad na terminalu nema brodova koje treba opslužiti.

Da bi se eliminiralo čekanje na lučkom kontejnerskom terminalu, bilo bi potrebno ili izgraditi vrlo velik broj pristana da brodovi uopće ne čekaju ili samo onoliki broj pristana koji će stalno biti zaposleni da pristani ne budu neiskorišteni. Naravno, da ta krajnja rješenja nisu racionalna, jer svako eliminiranje čekanja jednog sudionika dovodi do maksimalnog čekanja drugog sudionika u sustavu čekanja.

Budući da se u praksi čekanje broda i nezauzetost pristana ne mogu izbjeći u potpunosti³³, težnja je svakog terminala da se vrijeme čekanja što više skрати, odnosno troškovi oba sudionika u procesu opsluživanja na kontejnerskom terminalu svedu na minimum.

Ako se za kriterij optimizacije uzmu troškovi, onda će optimalno rješenje procesa opsluživanja na kontejnerskom terminalu predstavljati **broj pristana za koji je zbroj troškova čekanja brodova i troškova nezauzetosti pristana minimalna u promatranoj jedinici vremena.**

Ukupni troškovi čekanja broda i nezauzetosti pristana izračunavaju pomoću formule [21, str.47]:

³³ Zbog slučajnih dolazaka kontejnerskih brodova na terminal te duljine vremena opsluživanja broda koja je, također, slučajna varijabla, sa stajališta teorije redova čekanja nije moguće u praksi provesti takvu organizaciju rada na kontejnerskom terminalu da u bilo kojem trenutku pristani budu iskorišteni sa 100 % svog kapaciteta i da u bilo kojem trenutku prispjeli brod ne čeka na početak ukrcajno-iskrcajnih operacija.

$$C = c_w \cdot L_Q \cdot t + c_b \cdot (S - \rho) \cdot t$$

$$C = t \cdot [c_w \cdot L_Q + c_b (S - \rho)] \quad (2)$$

gdje je:

- C - iznos ukupnih troškova izražen u novčanim jedinicama za promatranu vremensku jedinicu (primjerice: u USD/satu)
- L_Q - prosječan broj kontejnerskih brodova u redu čekanja⁴⁴
- S - broj kontejnerskih pristana
- ρ - stupanj opterećenja pristana
- $S-\rho$ - broj nezauzetih pristana
- t - duljina vremenske jedinice za koju se izračunavaju troškovi (primjerice: dan, mjesec, godina)
- c_w - iznos troška prouzrokovanog čekanjem broda, izražen u novčanim jedinicama za promatranu vremensku jedinicu (primjerice: u USD/satu)
- c_b - iznos troška nastalog zbog neiskorištenosti (nezauzetosti) pristana, izražen u novčanim jedinicama za promatranu vremensku jedinicu (primjerice: u USD/satu) .

Prikazani model ukupnih troškova čekanja može poslužiti kao temelj za donošenje odgovarajućih poslovnih odluka pri analizi iskorištenja postojećeg kapaciteta ili planiranja razvoja budućeg kapaciteta lučkoga kontejnerskog terminala.

3.5. Primjer određivanja optimalnog broja pristana kontejnerskog terminala riječke luke

Izračunavanje optimalnog broja pristana prikazano je na primjeru kontejnerskog terminala riječke luke na temelju podataka o prometu iz 1996. godine te za promet od 50000 TEU godišnje.

Ostvareni promet na kontejnerskom terminalu riječke luke "Brajdica" iznosio je 1996. godine 28 800 TEU. Uz pretpostavku da je brod iskrcao u prosjeku 200 TEU, izlazi da je, u prosjeku, godišnje pristiglo 144 kontejnerskih brodova.

Statističkom je analizom ustanovljeno da je broj dolazaka brodova na terminal jednostavni tok jedinica raspoređen prema Poissonovoj razdiobi, a isti se zaključak odnosi i na broj opsluženih brodova, odnosno vrijeme trajanja ukrcajno-iskrcajnih operacija s kontejnerima.

⁴⁴ Budući da se kontejnerski promet izražava u TEU, a ne u broju brodova, a jedinični trošak c_w se odnosi na jedinični trošak čekanja kontejnerskog broda, potrebno je L_Q preračunati u broj brodova, uzevši u obzir broj kontejnera koji se u prosjeku iskrca/ukrca na terminalu.

Da bi se odredio optimalan broj pristana na kontejnerskom terminalu, osim podataka o količini kontejnerskog prometa u jedinici vremena, potreban je i podatak o propusnoj moći pristana, tj. broju kontejnera koje pristan može opslužiti u jedinici vremena.

Intenzitet opsluživanja kontejnerskog terminala zavisi od mnogih čimbenika. Iako se teoretski spominje produktivnost na kontejnerskom terminalu od 20 - 30 ciklusa na sat i na toj osnovi računa promet u 24 sata, stvarni su rezultati znatno niži. Treba spomenuti da se u prometu kontejnera na terminalu svaki prekid rada, odnosno neobavljanje prometa zbog kvara na opremi, uračunava u radno vrijeme od 24 sata. Mnogobrojni su razlozi koji onemogućavaju luku da postigne 100 %-tno iskorištenje radnog vremena, tako da ono obično varira između 95 % (što je vršno opterećenje) i 40 %.

Proračun kapaciteta kontejnerskog pristana se temelji na sljedećoj formuli [26, str.64]

$$K_{st} = K_t \times \varphi \times t, \quad (3)$$

gdje je:

- K_{st} - stvarni kapacitet kontejnerskog pristana s jednom obalnom kontejnerskom dizalicom (t/h)
- K_t - teorijski kapacitet obalne kontejnerske dizalice (t/h)
- φ - koeficijent iskorištenja nosivosti
- t - koeficijent iskorištenja vremena.

Teorijski kapacitet obalne kontejnerske dizalice iznosi $K_t = 20$ TEU/h ili 480 TEU/dan, odnosno 320 TEU/dan ako kontejnerski terminal radi dvije smjene po 8 sati. Vrijednost koeficijenta φ kreće se u praksi od 0,3 do 1, a vrijednost koeficijenta t od 0,5 do 0,9 (zbog mogućih zastoja u radu dizalice, kvarova, nestanka struje, čekanja na vagone i sl.).

Dakle, uzevši u obzir da je $K_t = 320$ TEU/dan, $\varphi = 0,75$ i $t = 0,5$, prema formuli (3) se dobiva **stvarni kapacitet kontejnerskog pristana** s jednom obalnom kontejnerskom dizalicom u iznosu od **$K_{st} = 120$ TEU/dan.**

Troškovi čekanja za kontejnerski brod od 2000 tona nosivosti su orijentacijski 3200 USD/dan, a troškovi čekanja pristana preračunati na temelju cijene najma luke po jednom metru duljine operativne obale iznose u prosjeku 2100 USD/dan.

Budući da je u ovom slučaju $\lambda = 96$ TEU/dan, a $\mu = 120$ TEU/dan, izračunati su pokazatelji funkcioniranja terminala riječke luke s jednim i više pristana i prikazani u tablici 1. U tablicu su, također, uneseni rezultati koji se odnose na promet kontejnerskog terminala od 50 000 TEU godišnje.

Tablica 1. *Pokazatelji funkcioniranja lučkoga kontejnerskog terminala "Brajdica"*
 $(\lambda_1=96$ TEU/dan, $\lambda_2=170$ TEU/dan, $\mu=120$ TEU/dan)

Pokazatelj	Jedinica mjere	$\lambda_1=96$ TEU/dan		$\lambda_2=170$ TEU/dan	
		$S=1$	$S=2$	$S=2$	$S=3$
λ	TEU/dan	96	96	170	170
μ	TEU/dan	120	120	120	120
ρ	-	0.800	0.800	1.180	1.180
ρ/S	-	0.800	0.400	0.575	0.382
P_0	%	20.000	42.857	17.073	23.159
P_W	%	80.000	22.857	58.740	20.793
L_Q	TEU	3.200	0.152	1.426	0.186
L	TEU	4.000	0.952	2.843	1.603
L_{serv}	TEU	0.800	0.800	1.417	1.417
W_Q	dan	0.033	0.002	0.008	0.001
W	dan	0.042	0.010	0.017	0.009
W_{serv}	dan	0.007	0.007	0.007	0.007
C_W	USD/dan	51.20	2.43	22.82	2.98
C_b	USD/dan	420.00	2.520.00	1.722.00	3.822.00
C	USD/dan	471.20	2.522.43	1.744.82	3.824.98

Napomena: Budući da su λ i μ te L_Q i L izraženi u TEU/dan, a c_W jedinični troškovi po brodu, bilo je potrebno iznos TEU preračunati u idealni dio broda.

Na temelju rezultata iz tablice 1. proizlazi:

- Povećanjem broja kontejnerskih pristana S smanjuje se broj kontejnera i duljina vremena u redu čekanja L_Q i W_Q , ali se povećava neiskorištenost pristana P_0 .
- Ako se za kriterij odlučivanja uzme duljina vremena boravka kontejnera na terminalu W , tada je optimalno rješenje $S=2$ pristana za $\lambda=96$ TEU/dan i $S=3$ pristana za $\lambda=170$ TEU/dan, iako kontejnerski terminal može stabilno funkcionirati i sa $S=1$, odnosno $S=2$ pristana.

- Ako se za kriterij odlučivanja uzmu ukupni troškovi čekanja broda i pristana C , tada za $\lambda=96$ TEU/dan optimalan broj pristana je $S=1$, a za $\lambda=170$ TEU/dan $S=2$ pristana.

Prema dobivenim rezultatima izlazi da je za postojeći godišnji iznos prometa lučkog kontejnerskog terminala "Brajdica" u 1996. godini bio dovoljan jedan pristan, ali uzevši u obzir navedenu propusnu moć, taj je pristan bio u prosjeku neiskorišten 20 %, a u slučaju povećanja prometa do 50 000 TEU godišnje potrebno je osposobiti dva pristana ili povećati intenzitet opsluživanja, tj. propusnu moć pristana povećanjem koeficijenta iskorištenja nosivosti kontejnerske dizalice ili koeficijenta iskorištenja vremena, što je, s obzirom na uzete vrijednosti, realno moguće.

3.6. Utjecaj kapaciteta lučkoga kontejnerskog terminala na ukupno vrijeme boravka kontejnera na terminalu

Promjena kapaciteta lučkoga kontejnerskog terminala utječe na duljinu vremena boravka kontejnera na terminalu. Budući da kapacitet lučkoga kontejnerskog terminala zavisi od intenziteta opsluživanja pojedinog pristana i broja pristana, potrebno je analizirati kako promjena svakog pojedinog parametra utječe na ukupno vrijeme boravka kontejnera na terminalu.

3.6.1. Utjecaj intenziteta opsluživanja na ukupno vrijeme boravka kontejnera na terminalu

Ako su broj pristana S i intenzitet toka dolazaka kontejnera λ konstantni, **povećanje intenziteta opsluživanja μ utječe na smanjenje prosječne duljine vremena opsluživanja W_{serv} i ukupnog vremena boravka kontejnera na terminalu W** . Primjerima se može pokazati da je smanjenje tih vremena progresivno.

Navedena tvrdnja dokazana je u radu [21],[16],[13] na temelju kojeg se razlika duljine vremena boravka kontejnera na terminalu, kada se stupanj opterećenja pristana ρ promijeni za iznos od h ($h \neq 0$), izračuna na sljedeći način [21, str.40],[16.str.140]:

$$\Delta_h W := W(\rho + h) - W(\rho) \quad , \text{odnosno} \quad \Delta_h W \cong h \cdot W' \left(\rho + \frac{h}{2} \right); \quad (4)$$

$$W'(\rho) = \frac{1}{\lambda} \left\{ 1 + \frac{\rho^S}{(S-1)!} \cdot \frac{P_0(\rho)}{(S-\rho)^2} \left[1 + (S-\rho) + \frac{2\rho}{S-\rho} - \frac{P_0(\rho)}{(S-\rho)^2} \cdot \frac{\rho^{S+1}}{(S-1)!} \right] \right\}, \quad (5)$$

gdje je:

$P_0(\rho)$ - vjerojatnost da na terminalu nema ni jednog kontejnera
 h - promjena stupnja opterećenja pristana ρ .

Radi lakšeg računanja razlike $\Delta_h W$, tabeliran je izraz $X = \lambda \cdot W'(\rho)$ prema broju i stupnju opterećenja pristana. Izvod tablice za broj pristana od 1 do 10 i za vrijednosti stupnja opterećenja pristana od 0.1 do 0.9 dan je u tablici 2.

Tablica 2. Vrijednosti u zavisnosti od broja i stupnja opterećenja pristana

$$X = \left\{ 1 + \frac{\rho^S}{(S-1)!} \cdot \frac{P_0(\rho)}{(S-\rho)^2} \left[1 + (S-\rho) + \frac{2\rho}{S-\rho} - \frac{P_0(\rho)}{(S-\rho)^2} \cdot \frac{\rho^{S+1}}{(S-1)!} \right] \right\}$$

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ										
0.1	1.235	1.008	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.2	1.563	1.036	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.3	2.041	1.086	1.007	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.4	2.778	1.163	1.018	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.5	4.000	1.269	1.037	1.004	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.6	6.250	1.406	1.065	1.009	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.7	11.111	1.581	1.106	1.017	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.8	25.000	1.801	1.160	1.029	1.004	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000
0.9	100.000	2.080	1.228	1.048	1.008	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000

Na temelju vrijednosti iz tablice 2. slijede ovi zaključci:

1) Vrijednosti $W'(\rho)$ su pozitivne za bilo koju vrijednost ρ , S i λ , međutim, vrijednost razlike $\Delta_h W$ bit će pozitivna ili negativna, zavisno od toga predstavlja li h porast ili pad stupnja opterećenja pristana.

2) Vrijednosti $W'(\rho)$ pokazuju različitu tendenciju kretanja s obzirom na promjene broja pristana S i stupnja opterećenja pristana ρ , i to: opadaju s povećanjem broja pristana za određeni ρ , a rastu s povećanjem ρ za određeni S .

Analizom utjecaja prekrcajnog učinka na vrijeme boravka kontejnera na terminalu utvrđene su funkcionalne međuzavisnosti između promatranih varijabli na temelju kojih se, u svezi s planiranjem broja pristana, mogu donijeti ovakve poslovne odluke:

a) Povećati prekrcajni učinak uz jednaki broj pristana - proporcionalno će se smanjiti duljina vremena opsluživanja kontejnera, ali će se progresivno smanjiti duljina vremena boravka kontejnera na terminalu.

b) Povećati prekrcajni učinak uz proporcionalno smanjenje broja pristana - proporcionalno će se smanjiti duljina vremena boravka kontejnera na terminalu.

Navedene varijante pretpostavljaju povećanje prekrcajnog učinka, budući da smanjenje prekrcajnog učinka produžuje vrijeme opsluživanja kontejnera, smanjuje intenzitet opsluživanja i negativno utječe na efikasnost terminala, pa iz tih razloga nije uzeto u obzir pri donošenju odluka.

Povećanje prekrcajnog učinka je najčešće rezultat uvođenja nove tehnologije u proces proizvodnje kontejnerske usluge, odnosno bolje organizacije rada. Uz jednaki broj pristana ukupna duljina vremena boravka kontejnera na terminalu će se progresivno smanjiti, a to će pozitivno djelovati na smanjenje troškova. Druga varijanta koja predviđa mogućnost smanjenja broja pristana vjerojatno se u praksi neće primijeniti doslovno, ali ona omogućava da se "višak" broja pristana namijeni za eventualno nove kontejnere pa je za očekivati da će se povećati prihodi od novih usluga. Usporedbom rezultata obiju varijanti, za konkretni primjer, moguće je donijeti konačnu odluku.

Utjecaj **promjene propusne moći pristana μ na ukupno vrijeme boravka kontejnera na terminalu** ilustriran je na temelju prethodnog primjera, uz promjenu koeficijenta iskorištenja nosivosti kontejnerskog mosta od 0.75 na 0.8 i promjenu koeficijenta iskorištenja vremena od 0.5 na 0.625. Prema (3) stvarni kapacitet kontejnerskog mosta iznositi će 160 TEU/dan, odnosno 48.000 TEU godišnje.

Uz nepromijenjeni broj od jednog pristana i intenzitet toka dolazaka od 28.800 TEU godišnje, navedeno povećanje prekrcajnog učinka kontejnerskog mosta utjecat će na smanjenje stupnja opterećenja pristana od $\rho = 0.8$ na $\rho = 0.6$. Iznos razlike $\Delta_h W$ će prema (4) iznositi $\Delta_h W \cong -0.2 \cdot W'(0.7)$; iz tablice 2. se očita vrijednost $W'(0.7) = 1/\lambda \cdot 11.111$ (za 1 pristan), pa je konačan iznos razlike $\Delta_h W \cong -0.023$ vremenskih jedinica, odnosno dana. Kontrolom se dobije: $W(\rho+h) - W(\rho) = W(0.6) - W(0.8) = -0.026$ dana, što je u prihvatljivim granicama.

3.6.2. Utjecaj broja pristana na ukupno vrijeme boravka kontejnera na terminalu

Uz pretpostavku da su intenzitet toka dolazaka kontejnera λ i vrijeme opsluživanja W_{serv} konstantni, **povećanje broja pristana S utječe na progresivno smanjenje prosječne duljine vremena čekanja kontejnera W_Q i ukupnog vremena boravka kontejnera na terminalu W .**

Dokaz prethodne tvrdnje dan je u radu [21],[16],[13] na temelju kojeg se razlika $W(S+1) - W(S)$ izračuna s pomoću razlike $L_Q(S+1) - L_Q(S)$, gdje je S broj pristana, W duljina vremena boravka kontejnera na terminalu, L_Q broj kontejnera u redu čekanja, i koja se izračuna iz izraza [21, str.43], [16, str.144].

$$\begin{aligned}
 L_Q(S+1) - L_Q(S) = & -\frac{\rho^{S+1}}{S!} P_0(S) \cdot P_0(S+1) \cdot \frac{1}{(S-\rho)^2(S-\rho+1)^2} \times \\
 & \times \left\{ \left[1 + \rho + \dots + \frac{\rho^S}{S!} \right] \left[(S-\rho)^3 + 2S(S-\rho) + S \right] + \right. \\
 & \left. + \frac{\rho^{S+1}}{(S+1)!} \left[\rho^2 + S(S-\rho+1)^2 \right] \right\} < 0 \quad . \quad (6)
 \end{aligned}$$

Vrijednosti razlike $[L_Q(S+1) - L_Q(S)]$ tabelirane su iz praktičnih razloga. Izvod tablice za broj pristana od 1 do 10 i za vrijednosti stupnja opterećenja pristana od 0.1 do 0.9 dan je u tablici 3.

Tablica 3. Vrijednosti razlike $[L_Q(S+1) - L_Q(S)]$ u zavisnosti od broja i stupnja opterećenja pristana

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ										
0.1	-0.011	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
0.2	-0.048	-0.002	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
0.3	-0.122	-0.006	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
0.4	-0.250	-0.015	-0.001	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
0.5	-0.467	-0.030	-0.003	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
0.6	-0.841	-0.053	-0.006	-0.001	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
0.7	-1.536	-0.086	-0.010	-0.001	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
0.8	-3.048	-0.133	-0.017	-0.002	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
0.9	-7.871	-0.199	-0.026	-0.004	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000

Na temelju vrijednosti iz tablice 3. slijede zaključci:

1) Razlike $[L_Q(S+1) - L_Q(S)]$ su negativne, a to ukazuje na činjenicu da će se povećanjem broja pristana smanjiti broj kontejnera u redu čekanja, bez obzira za koliko je povećan broj pristana i koliki je stupanj opterećenja pristana.

2) Apsolutne vrijednosti razlike $[L_Q(S+1) - L_Q(S)]$ smanjuju se s povećanjem broja pristana. Može se pokazati da je $\lim_{S \rightarrow \infty} [L_Q(S+1) - L_Q(S)] = 0$ [13]. To ukazuje na činjenicu da, iako L_Q pada s povećanjem broja pristana, to povećanje nema smisla kad razlika $[L_Q(S+1) - L_Q(S)]$ padne ispod 0.5 jer je tada prosječan broj kontejnera u redu čekanja jednak, bez obzira je li broj pristana $(S+1)$ ili S .

3) Međutim, apsolutna vrijednost razlike $[L_Q(S+1) - L_Q(S)]$ raste s povećanjem vrijednosti stupnja opterećenja pristana, što znači da na terminalu s većom vrijednosti intenziteta prometa ρ , a to je slučaj s većim intenzitetom dolazaka kontejnera λ , povećanjem broja pristana za jedan broj kontejnera se u redu čekanja progresivno smanjuje. Dakle, na terminalima s većim opterećenjem pristana, "korisnije" je povećavati broj pristana nego na terminalima s manjim opterećenjem pristana.

4) Analiza razlike $[L_Q(S+1) - L_Q(S)]$ pokazuje da se tablica 3. može koristiti u planiranju broja pristana na kontejnerskom terminalu. Dio tablice desno od označenih stepenastih crta sadrži razlike manje od 0.5, odnosno vrijednosti 0, pa se te kombinacije broja pristana ne preporučuju. Dakle, za donošenje odluke o broju pristana područje mogućih rješenja je dio tablice lijevo od stepenastih crta.

5) Kako je $W_Q = L_Q / \lambda$, a λ je konstantno, iz tablice 3. se zaključuje da se W_Q mijenja jednako kao i L_Q , pa se, prema tomu, spomenuta tablica može koristiti i u analizi vremena čekanja kontejnera. Jedino treba voditi računa da se vrijednost razlike $[L_Q(S+1) - L_Q(S)]$ mora podijeliti s λ da bi se dobila vrijednost razlike $[W_Q(S+1) - W_Q(S)]$ za konkretni primjer izražena u vremenskim jedinicama.

Utjecaj promjene broja pristana S na ukupno vrijeme boravka kontejnera na terminalu ilustriran je na temelju prethodnog primjera ovog rada uz promjenu broja pristana od jednog na dva pristana.

Uz nepromijenjeni intenzitet toka dolazaka od 28 800 TEU godišnje i vrijeme opsluživanja od 0.2 sata, iz čega slijedi i nepromijenjena vrijednost stupnja opterećenja pristana 0.8, povećanje broja pristana utjecat će na smanjenje broja kontejnera u redu čekanja za (prema tablici 3) 3.048 TEU, a vrijeme čekanja smanjit će se za 0.032 dana, odnosno približno 3/4 sata. Daljnjim povećanjem na tri pristana tendencija smanjenja reda čekanja bi se nastavila; broj kontejnera u redu čekanja bi se smanjio za "samo" 0.133 TEU u odnosu na dva pristana, odnosno za 3.181 TEU u odnosu na terminal s jednim pristanom. Svako daljnje povećanje broja pristana nije racionalno, jer ne utječe na smanjenje broja kontejnera u redu čekanja.

4. Modeliranje kontejnerskoga prijevoznog procesa

U morskoj kontejnerskoj tehnologiji od posebnog su značenja za uspješnost poslovanja brodara ovi problemi: na koji način organizirati prijevoz praznih kontejnera koji prouzrokuju troškove, a ne ostvaruju prihode te kako formirati «kontejnerske pošiljke» s odgovarajućim brojem kontejnera raznih vrsta i masa s kojima će se ostvariti maksimalna dobit od prijevoza, uzevši u obzir nosivost i prijevozni kapacitet broda.

U odjeljku 4.1. prikazan je matematički model za prijevoz praznih kontejnera, a u odjeljku 4.2. model određivanja optimalne strukture prijevoza tereta kontejnerskim brodom.

4.1. Programiranje prijevoza praznih kontejnera

Budući da troškovi prijevoza tereta od mjesta proizvođača do skladišta, prerađivača i konačno do potrošača utječu na povećanje cijene proizvoda, ekonomski je opravdano težiti što većem smanjenju troškova, ali, također, sa stajališta prijevoznika obaviti prijevoz uz ostvarenje što veće dobiti. U oba slučaja preporučuje se optimizacija prijevoza tereta, bez obzira jesu li kriterij optimalnosti troškovi prijevoza ili ostvarena dobit, odnosno prihodi.

Unaprjeđenje prijevoznog procesa morske kontejnerske tehnologije moguće je, između ostalog, postići optimizacijom plana prijevoza praznih kontejnera na određenom geografskom području do luke gdje će se obaviti «punjenje» kontejnera.

Naime, prijevoz praznih kontejnera nije samo tehnički i tehnološki, već i ekonomski problem jer takav prijevoz povećava troškove poslovanja brodarima, a neminovno se javlja u praksi, s obzirom da luka iskrcava tereta iz kontejnera ne mora biti i luka ukrcava istih kontejnera, ali s novim teretom.

Takav se problem može rješavati programiranjem plana prijevoza kontejnera od ukrcajnih do iskrcajnih luka, uzevši u obzir broj kontejnera koji se nalaze u ukrcajnim lukama (ishodištima) i broj kontejnera koji su potrebni u iskrcajnim lukama (odredištima) s ciljem da se taj prijevoz obavi uz minimalnu ukupnu udaljenost, odnosno minimalne troškove prijevoza.

U tu se svrhu polazi od matrice transporta i matrice troškova, udaljenosti, ... , ovisno o postavljenom kriteriju optimalnosti (tablice 4 i 5)

Tablica 4. Matrica transporta kontejnera

Ishodišna luka	Odredišna luka	Broj raspoloživih kontejnera
	$B_1 B_2 \dots B_n$	
A_1	$x_{11} x_{12} \dots x_{1n}$	a_1
A_2	$x_{21} x_{22} \dots x_{2n}$	a_2
\vdots	\vdots	\vdots
\vdots	\vdots	\vdots
A_m	$x_{m1} x_{m2} \dots x_{mn}$	a_m
Broj potrebnih kontejnera	$b_1 b_2 \dots b_n$	

Tablica 5. Matrica troškova ili udaljenosti morem ili ...

Ishodišna luka	Odredišna luka
	$B_1 B_2 \dots B_n$
A_1	$c_{11} c_{12} \dots c_{1n}$
A_2	$c_{21} c_{22} \dots c_{2n}$
\cdot	\cdot
\cdot	\cdot
\cdot	\cdot
A_m	$c_{m1} c_{m2} \dots c_{mn}$

gdje je:

A_i – ukrcajne luke (ishodišta), $i = 1, 2, \dots, m$

B_j – iskrcajne luke (odredišta), $j = 1, 2, \dots, n$

m – ukupan broj ishodišta

n – ukupan broj odredišta

c_{ij} – morska udaljenost (ili vrijeme u plovidbi), odnosno jedinični troškovi za prijevoz na relaciji između i -te luke ukrcaja i j -te luke iskrcaja, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$

x_{ij} – količina ISO kontejnera koji se prevoze na relaciji iz i -te luke ukrcaja u j -tu luku iskrcaja, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$

a_i – raspoložive količine ISO kontejnera u i -toj luci ukrcaja, $i = 1, 2, \dots, m$

b_j – potrebne količine ISO kontejnera j -te luke iskrcaja, $j = 1, 2, \dots, n$.

Matematički model za zadani problem definira se na sljedeći način :

$$\text{Funkcija cilja} \quad \text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

uz ograničenja

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$x_{ij} \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Da bi jednačbe (8) i (9) bile svrsishodno povezane, potrebno je ispuniti uvjet da je:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$$

Transportni problem morske kontejnerske tehnologije u kojem je ukupna količina otpreme ISO kontejnera jednaka ukupnoj količini primanja ISO kontejnera predstavlja zatvoreni transportni problem za razliku od otvorenog transportnog problema kada je broj kontejnera u lukama ukrcaja veći ili manji od potrebnog broja kontejnera u iskrcajnim (odredišnim) lukama.

Postavljeni je model linearan pa se optimalno rješenje dobiva primjenom metode linearnog programiranja⁵⁵.

Zahvaljujući razvoju računalnih programa rješavanje promatranog problema je olakšano; iz praktičnih razloga se preporuča korištenje programa za osobno računalo QSB[3] ili WinQSB[4].

Za ilustraciju navedenog matematičkog modela odabran je primjer s realnim podacima [7].

Na određenom geografskom području koje opslužuje pomorski brodar "X" potrebno je prevesti prazne kontejnere iz luka ukrcaja A_1 , A_2 , A_3 i A_4 do odredišnih luka B_1 , B_2 , B_3 i B_4 .

U lukama ukrcaja na raspolaganju za prijevoz nalaze se sljedeće količine kontejnera: 700, 500, 400 i 400 TEU, respektivno.

Potražnja u lukama iskrcaja je sljedeća: 560, 380, 620 i 440 TEU, respektivno.

Udaljenosti morskim rutama između luka ukrcaja i iskrcaja u nautičkim miljama dane su u tablici 6.

Tablica 6. Udaljenosti morem u NM između ishodišnih i odredišnih luka

Ishodišna luka	Odredišna luka			
	B_1	B_2	B_3	B_4
A_1	1368	2736	3648	4104
A_2	912	3192	2280	4560
A_3	456	5016	5472	5928
A_4	1824	6384	6840	7296

⁵⁵ Detaljnija objašnjenja u svezi načina rješavanja problema linearnog programiranja nalaze se u odgovarajućim udžbenicima iz operacijskih istraživanja [1],[11],[12],[2].

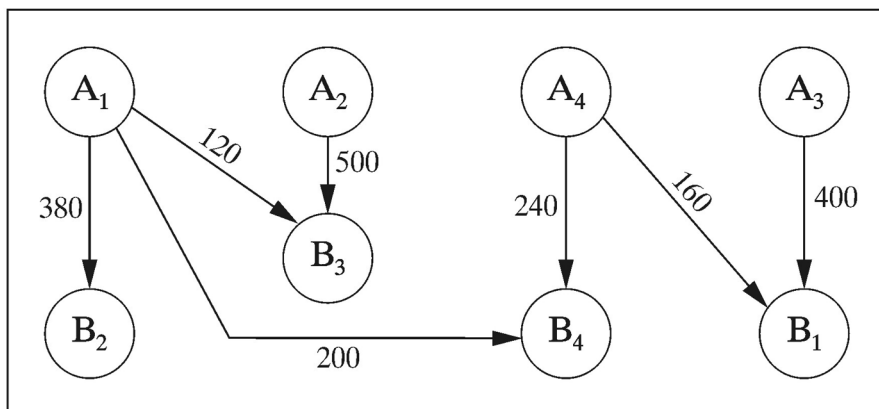
Brodar "X" posjeduje kontejnerski brod koji u navigaciji ostvaruje prosječnu putnu brzinu od 19 čvorova, pa vrijeme u plovidbi između luka, izraženo u danima, iznosi :

Tablica 7. Dani u plovidbi između ishodišnih i odredišnih luka

Ishodišna luka	Odredišna luka			
	B_1	B_2	B_3	B_4
A_1	3	6	8	9
A_2	2	7	5	10
A_3	1	11	12	13
A_4	4	14	15	16

Optimalno rješenje je plan prijevoza kontejnera iz ukrcajnih (ishodišnih) do iskrcajnih (odredišnih) luka s ciljem da ukupna udaljenost, odnosno vrijeme plovidbe bude minimalno.

Optimalno rješenje je zorno prikazano na slici 1⁶⁶.



Slika 1. Optimalan plan prijevoza kontejnera

Minimalni iznos udaljenosti, odnosno vremena plovidbe iznose: $\text{Min } Z = 5663520$ TEU-NM, odnosno $\text{Min } Z = 12\,420$ TEU-dana.

U analizi optimalnog rješenja transportnog problema treba uzeti u obzir:

- ukupan iznos NM ili TEU-dana pokazuje minimalnu vrijednost NM, odnosno TEU-dana za sve kontejnere koji su se prevozili, a ne za svaki pojedini; rezultat ima

⁶⁶ Postupak rješavanja promatranog problema prikazan je u radu [7, str.13-17]

ekonomskog smisla jer se trošak prijevoza računa po 1 NM ili 1 TEU-danu za svaki kontejner, bez obzira što se istovremeno prevozi veći broj kontejnera.

- ako broj kontejnera u ishodišnim lukama nije jednak broju kontejnera koji je potreban u odredišnim lukama, riječ je o otvorenom transportnom problemu koji zahtijeva posebnu ekonomsku interpretaciju.⁷

- optimalno rješenje daje vrijednosti dualnih varijabli na temelju kojih se izrađuju varijante promatranog problema kad dođe do promjene ponude ili potražnje za kontejnerima. Time je pokazano da je matematički model valjan i u promjenljivim uvjetima poslovanja broдача na tržištu.

4.2. Određivanje optimalne strukture tereta kontejnerskog broda

S obzirom da brod posluje na principu dobiti, važno je da se prijevoz kontejnerskim brodom organizira sa što manjim troškovima ili, pak, uz ostvarenje što veće dobiti, odnosno da se odredi takva struktura prijevoza kontejnerskim brodom prema tipovima ISO kontejnera kojom se ostvaruje najveći iznos dobiti, uzevši u obzir korisnu nosivost i prijevozni kapacitet kontejnerskoga broda.

Dobit koja se ostvaruje prijevozom tereta u kontejnerima flotom potpuno kontejnerskih brodova na određenoj morskoj liniji je izravno povezana sa strukturom tereta složenog u kontejnerima ukrcanih u lukama ukrcaja i prevezenih do odredišnih luka.

Teret koji se u lukama ukrcaja nudi za prijevoz u ISO kontejnerima pronalaze agenti, otpremnici i predstavnici broдача. Na temelju ukupne ponude tereta i broja kontejnera raspoloživih za ukrcaj formiraju se odgovarajuće "kontejnerske pošiljke" za ukrcaj na svaki konkretni kontejnerski brod iz flote brodova koji je uključen u redoviti servis na odnosnom morskome prometnom pravcu [7].

U komercijalnoj praksi kontejnerskih broдача takav se problem najčešće rješava intuitivno, a rješavaju ga pomorski kapetani s dugogodišnjom praksom u toj domeni.

Da bi se prethodno definirani problem mogao riješiti metodom operacijskoga istraživanja, potrebno je postaviti odgovarajući matematički model koji glasi:

$$\text{Funkcija kriterija} \quad \text{Max } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (10)$$

$$\text{s ograničenjima} \quad \sum_{j=1}^n a_j x_j \leq N_k, \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j \leq d_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (12)$$

⁷ O analizi optimalnog rješenja otvorenog transportnog problema vidjeti u udžbenicima iz operacijskih istraživanja [1],[11],[12],[2].

$$\sum_{j=1}^n x_j \leq g_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (13)$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (14)$$

gdje je :

- Z – funkcija kriterija
- c_j – koeficijent kriterija j -te varijable, odnosno iznos dobiti po jednom prevezenom kontejneru
- x_j – količina (iznos) j -te varijable, odnosno broj kontejnera za prijevoz prema dobivenom optimalnom rješenju
- N_k – korisna nosivost broda za odnosno putovanje izražena u tonama
- d_i – prijevozni TEU kapacitet broda, tj. broj slobodnih mjesta ili pozicija na brodu za ukrcaj kontejnera
- g_i – broj kontejnera raznih vrsta, veličina i masa koji su na raspolaganju za ukrcaj
- a_j – količina ograničenja potrebnog za jednu jedinicu j -te varijable, tj. jedinična masa kontejnera
- m – broj ograničenja, tj. korisna nosivost broda, TEU prijevozni kapacitet broda i raspoloživi broj kontejnera
- n – broj varijabli, tj. broj tipova kontejnera raznih veličina i masa.

Riješiti problem strukture prijevoza potpuno kontejnerskim brodom prema postavljenom matematičkom modelu znači odrediti vrijednosti strukturnih varijabli x_j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) koje će dati maksimalnu vrijednost funkcije kriterija Z , a ujedno zadovoljiti sve osnovne i dodatne uvjete, odnosno postavljena ograničenja.

Problem određivanja optimalne strukture prijevoza tereta kontejnerskim brodom pomoću predloženog matematičkog modela rješava se metodom linearnog programiranja. Radi pojednostavljenja umjesto ručnog rješavanja preporuča se primjena odgovarajućeg programa za osobna računala, primjerice QSB [3] ili WinQSB [4]. Također se preporuča da se nakon dobivenog optimalnog rješenja provede postoptimalna analiza pomoću koje se ispituje utjecaj promjena vrijednosti pojedinih elemenata matematičkoga modela na dobiveno optimalno rješenje te usporede varijante rješenja promatranog problema na temelju kojih se može donijeti odgovarajuća poslovna odluka.

Detaljnija objašnjenja u svezi primjene pojedinih metoda i načina rješavanja nalaze se u odgovarajućoj literaturi iz operacijskih istraživanja [1], [11] i [12].

Za ilustraciju postavljenog matematičkog modela odabran je primjer s realnim podacima [8]:

U lukama ukrcaja za prijevoz morskim putem nalazi se raznovrstan teret složen u kontejnerima.

Masa te iznos dobiti po pojedinom tipu kontejnera dani su u tablici 8.

Tablica 8. Masa i dnevni iznos dobiti u USD po jednom kontejneru

TIP I VELIČINA KONTEJNERA	20'DB	20'OT	20'RF	20'OS
Jedinična masa u tonama	11	15	13	12
Dobit po 1 kontejneru u USD	48	63	60	59
TIP I VELIČINA KONTEJNERA	20' TC	40' PL	40' RF	40'DB
Jedinična masa u tonama	16	23	25	21
Dobit po 1 kontejneru u USD	69	70	72	67

Za ukrcaj na brod spremna je sljedeća količina pojedinih vrsta, veličina i dozvoljena masa kontejnera:

160 x 20'DB à 11t, 400 x 20' TC à 16t,
 120 x 20'OT à 15t, 160 x 40' PL à 23t,
 200 x 20' RF à 13t, 82 x 40' RF à 25t,
 300 x 20' OS à 12t, 80 x 40' DB à 21t.

Prijevoz treba obaviti potpuno kontejnerskim brodom ukupne nosivosti 29434 tona, prijevoznog kapaciteta od 1762 TEU. Predviđeno trajanje putovanja broda je devet dana. Prosječni potrošak teškog goriva je 45 t/dan, a vode 15 t/dan. Plovi se u "winter zone". U tankovima na brodu nalazi se 300 tona lakog goriva, 150 tona mazivog ulja, 1100 tona teškog goriva, a posada i ostale zalihe čine 200 tona. U brod se može maksimalno ukrcati 77 x 40' RF kontejnera, odnosno ukupno složiti 1154 x 20' kontejnera te 304 x 40' kontejnera. Za balastiranje (odgovarajući stabilitet, trim i izravnjanje broda) potrebno je 1.600 tona balasta.

Optimalnim rješenjem će se dobiti struktura prijevoza kontejnerskog broda prema tipovima ISO kontejnera uz maksimalan ukupan iznos ostvarene dobiti.

U tablici 9. prikazana je struktura optimalnog programa prema tipu i veličini kontejnera.

Tablica 9. Struktura optimalnog programa prijevoza kontejnera

Tip i veličina kontejnera	Jedinična masa u tonama	Broj kontejnera	Iznos dobiti po kontejneru (USD/dan)	Ukupan iznos dobiti (USD/dan)
-	a_j	x_j	c_j	$c_j \cdot x_j$
20' DB	11	134	48	6432
20' OT	15	120	63	7560
20' RF	13	200	60	12000
20' OS	12	300	59	17700
20' TC	16	400	69	27600
40' PL	23	160	70	11200
40' RF	25	77	72	5544
40' DB	21	67	67	4489

Na temelju rezultata iz tablice 9. proizlazi:

- U optimalnom rješenju su zastupljeni svi tipovi ISO kontejnera.
- Vrijednost optimalnog programa $\text{Max } Z = \sum_{j=1}^8 c_j x_j = 92\,525 \text{ USD/day}$.
- Iskoristivost nosivosti broda $N_k = \sum_{j=1}^8 a_j x_j = 22\,886 \text{ tona}$; ukupna nosivost broda nije u potpunosti iskorištena (% neiskorištenosti 11,65).
- Iskoristivost prijevoznog kapaciteta broda $P_k = \sum_{j=1}^5 x_j + \sum_{j=6}^8 x_j = 1458$ kontejnera; prema optimalnom programu prijevozni je kapacitet u potpunosti iskorišten.

3. Zaključak

Količine tereta koje se prevoze kontejnerskim brodovima i tendencija porasta tog prometa, iz godine u godinu, ukazuje na potrebu proučavanja kontejnerskog prometa morem s ciljem da se ostvari optimalno funkcioniranje promatranog sustava.

Jedan od načina ostvarivanja postavljenog cilja je primjena kvantitativnih metoda prikazanih u ovom radu.

Budući da morska kontejnerska tehnologija sadrži tri komponente: kontejner, kontejnerski terminal te kontejnerski brod, taj sustav treba promatrati sa stajališta oba sudionika u procesu prijevoza, tj. sa stajališta luke i sa stajališta brodarara.

U radu su korištene metode iz teorije sustava, statistike i operacijskih istraživanja. Međutim, s obzirom na obim rada, postupci primjene pojedine metode nisu objašnjeni, ali su dani u objavljenim radovima autorice i koautora navedenim u popisu literature.

Modeliranje lučkoga kontejnerskog terminala pretpostavlja izračunavanje optimalnog broja pristana budući da kapacitet pristana determinira potreban kapacitet ostalih podsustava lučkoga kontejnerskog terminala, a time i propusnu moć kontejnerskog terminala kao cjeline.

U procesu prijevoza kontejnera brodom izdvojeni su problemi koji, u velikoj mjeri, utječu na uspješnost poslovanja kontejnerskoga broda, odnosno brodarara, a to su programiranje prijevoza praznih kontejnera iz više luka ukrcaja u više luka iskrcaja te određivanje optimalne strukture prijevoza tereta kontejnerskim brodom.

Prikazani modeli mogu biti vrlo korisni u operativnom planiranju postojećeg ili očekivanog stanja pri donošenju odgovarajućih poslovnih odluka, a s ciljem postizanja optimalnog funkcioniranja sustava kontejnerskog prijevoza morem. Od posebne je važnosti valjanost i primjenljivost modela u promjenljivim uvjetima poslovanja luke i brodarara na kontejnerskom tržištu; unošenjem promjene bilo kojeg elementa u matematički model dobiva se "novo" optimalno rješenje.

Literatura

- [1] Barković, D.: *Operacijska istraživanja*, Ekonomski fakultet Osijek, Osijek, 2001.
- [2] Bronson, R.: *Operations Research*, Mc Graw-Hill, 1982.
- [3] Chang, Y.L.- Sullivan, R.S.: *Quantitative Systems for Business Plus*, Version 1.0, Prentice-Hall, 1988.
- [4] Chang, Y.L.: *WinQSB, Decision Support Software for MS/OM*, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [5] Kirinčić, J.: *Luke i terminali*, Sveučilište u Rijeci, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
- [6] Kos, S.: *Prilog rješavanju problematike morske kontejnerske tehnologije*, magistarski rad, Fakultet za pomorstvo i saobraćaj, Rijeka, 1991.

- [7] S. Kos - Z. Zenzerović, *Modelling the Transport Process in Marine Container Technology*, Promet, Zagreb, Vol.15, 2003., No.1, Portorož-Trieste-Zagreb, 2003., pp. 13-17
- [8] S. Kos, Z. Zenzerović, *Model of Optimal Cargo Transport Structure by Full Container Ship on Predefined Sailing Route*, Promet, Vol.16, 2004., No.1, Portorož-Trieste-Zagreb, 2004., pp.15-20.
- [9] Mrnjavac, E., Zenzerović, Z.: *Model of Determining the Optimum Number of Berths of the Port Container Terminal*, Proceedings ISEP 97, str. 149-156, Ljubljana, 1997.
- [10] Newell, G. F.: *Application of Queueing Theory*, Chapman and Hall, London, Port Development, United Nations, TD/B/C.4/175/Rev.1, New York, 1985.
- [11] Pašagić, H.: *Matematičko modeliranje i teorija grafova*, Fakultet prometnih znanosti Zagreb, Zagreb, 1998.
- [12] Pašagić, H.: *Matematičke metode u prometu*, Fakultet prometnih znanosti Zagreb, Zagreb, 2003.
- [13] Pogány, T.: *On the Parameter Shift Influence to the Total Waiting Time in the M/M/S/∞ Queueing System*, I, Proceedings of the 16th International Conference on ITI 94 Pula, 1994.
- [14] Pogány, T., Zenzerović, Z.: *On the Parameter Shift Influence to the Total Waiting Time in the M/M/S/∞ Queueing System*, II, Proceedings of the 16th International Conference on ITI 94 Pula, 1994.
- [15] Shipping Statistics and Market Review, Institute of Shipping Economics and Logistics, No 1/2, Volume 50
- [16] Zenzerović, Z.: *Optimizacijski modeli planiranja kapaciteta morskih luka*, doktorska disertacija, Ekonomski fakultet Rijeka, Rijeka, 1995.
- [17] Zenzerović, Z.: *Mogućnosti i uvjeti primjene kvantitativnih metoda u tehnologiji prometa*, Zbornik radova Pomorskog fakulteta u Rijeci, god. 9, str. 37-53, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 1995.
- [18] Zenzerović, Z.: *Kapaciteti uslužnih mjesta u funkciji efikasnosti sustava masovnog opsluživanja*, Zbornik radova Ekonomskog fakulteta Rijeka, god. 14, sv. 2, str. 91-107, Rijeka, 1996.
- [19] Z. Zenzerović, *Definiranje lučkoga kontejnerskog terminala primjenom teorije općih sustava*, poglavlje 2. u knjizi Optimizacija sustava hrvatskih kontejnerskih luka u izdanju Visoke pomorske škole u Rijeci i Fakulteta za turistički i hotelski menadžment iz Opatije, Rijeka, 2001., str. 35-46.
- [20] Z. Zenzerović, *Model određivanja optimalnog kapaciteta lučkoga kontejnerskog terminala*, poglavlje 3. u knjizi Optimizacija sustava hrvatskih kontejnerskih luka u izdanju Visoke pomorske škole u Rijeci i Fakulteta za turistički i hotelski menadžment iz Opatije, Rijeka, 2001., str. 47-71.
- [21] Z. Zenzerović, *Teorija redova čekanja*, Stohastički procesi II. dio, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2003.

- [22] Z. Zenzerović - E. Mrnjavac, *System Approach to the Definition of the Port Container Terminal*, Promet, Portorož-Trieste-Zagreb, Fakultet prometnih znanosti, Vol.11, 1999., Supplement No. 4, pp. 35-39.
- [23] Z. Zenzerović - E. Mrnjavac, *Modelling of Port Container Terminal using the Queuing Theory*, Trasporti Europei, Trieste, Anno VI, Numero 15, agosto 2000., ISSN 1129-5627, pp. 54-58.
- [24] Z. Zenzerović - E. Mrnjavac, *Prognoza prometa kontejnerskih luka u Republici Hrvatskoj*, poglavlje 8. u knjizi Optimizacija sustava hrvatskih kontejnerskih luka u izdanju Visoke pomorske škole u Rijeci i Fakulteta za turistički i hotelski menadžment iz Opatije, Rijeka, 2001., str. 161-192.
- [25] Z. Zenzerović - S. Palarić, *Mogućnosti primjene modela u prognoziranju prometne potražnje*, Pomorstvo, Odjel za pomorstvo Sveučilišta u Rijeci i Visoka pomorska škola, Rijeka, ISSN 1332-0718, 14(2000.), str. 99-109.
- [26] Zenzerović, Z., Poletan, T. *Utjecaj propusne moći pristana na efikasnost lučkog kontejnerskog terminala*, Pomorski zbornik, knjiga 35, str. 57-72, DPUPRH, Rijeka, 1997.
- [27] Zenzerović, Z., T. Poletan, *Modeli planiranja optimalnog kapaciteta lučkih sredstava za rad*, Zbornik radova Pomorskog fakulteta, Godina 11, str. 9-22, Rijeka 1997.
- [28] http://www.worldbank.org/transport/ports_ss.htm

Zdenka Zenzerović

Quantitative Methods in the Function of Optimum Functioning of the Containerised Maritime Transport System

Summary

Growing trends in the containerised transport of goods call for further containerised maritime transport studies aimed at achieving an optimum functioning of the system observed. The paper shows that the aim may be achieved by implementation of selected quantitative methods from the point of view of each participant in the container carriage by sea: the port/port container terminal and the owner/container ship. While the port container terminal modelling requires the optimum terminal capacity to be determined in advance, the efficient operation on part of owners requires the carriage of empty containers to be programmed and the optimum structure of containerised cargoes carried by sea to be determined in advance. The study has implemented the system theory methods, statistical methods and operational research methods. The methods and models displayed have been tested on real data examples.

Key words: quantitative methods, the system general theory, the queuing theory, linear programming, port container terminal, container carriage, container ship

Metodi quantitativi per il funzionamento ottimale del sistema di trasporto container per mare

Sommario

La tendenza ad incrementare la quantità di merci trasportata dai container richiede un'accurata ricerca sul sistema di trasporto per mare avendo come obiettivo il massimo livello di funzionalità. Nel lavoro si dimostra come tale obiettivo può esser raggiunto grazie alla scelta dei metodi quantitativi applicati agli artefici del trasporto container studiando l'operazione sotto tutti gli aspetti: dall'aspetto del terminal portuale dei container e dall'aspetto dell'operatore marittimo (nave portacontainer). La creazione del modello di terminal portuale di container implica determinare la sua capacità ottimale. Per l'operatore marittimo, invece, di grande importanza per il buon esito dell'operazione è la programmazione del trasporto dei container vuoti ed organizzare la struttura ottimale del trasporto di merci con la nave portacontainer. Nel lavoro vengono impiegati i metodi della teoria dei sistemi, della statistica e delle ricerche operazionali. La validità dei metodi e dei modelli presentati è verificata su esempi basati su dati reali.

Parole chiave: metodi quantitativi, teoria generale dei sistemi, programmazione lineare, terminal portuale container, trasporto container, nave portacontainer.

