

MODELIRANJE OPSLUŽIVANJA KONTEJNERA U LUČKIM TERMINALIMA

Ivana VUKIĆEVIĆ BIŠEVAC, Miloš NIKOLIĆ
Saobraćajni fakultet u Beogradu
Dejana ĐORĐEVIĆ
Građevinski fakultet u Beogradu
Katarina VUKADINOVIC
Saobraćajni fakultet u Beogradu

REZIME

U radu je razmatran proces transporta i pretovara kontejnera dopremljenih drumskim teretnim vozilima u lučki kontejnerski terminal. Ulazno - izlazna kapija, inspekcijско mesto i skladišna dizalica mogu se posmatrati kao kanali sistema masovnog opsluživanja (SMO) koji redom opslužuju kontejnere. U analizi se primenjuje redna veza SMO. Cilj primene ovakve veze je određivanje intenziteta opsluživanja u pojedinačnim sistemima da bi se smanjilo vreme čekanja kontejnera unutar lučkog terminala i posledično vreme obrta drumskih teretnih vozila koja dopremaju izvozne kontejnere.

Opisan je simulacioni model redne veze SMO pod određenim pretpostavkama o raspodelama verovatnoća vremena opsluživanja. Rezultati pokazuju da se ovakva veza SMO može uspešno koristiti za modeliranje opsluživanja kontejnera.

Ključne reči: Sistem masovnog opsluživanja, Redna veza sistema masovnog opsluživanja, Lučki kontejnerski terminali

1. UVOD

Da bi se ubrzale manipulacije i smanjilo oštećenje tereta, kontejneri su postali osnovna tovarno manipulativna jedinica u pomorskom transportu. Poslednjih decenija promet u lučkim kontejnerskim terminalima (LKT) je u neprekidnom porastu. Tokom 2019. godine pomorskim transportom prevezeno je 151,9 miliona TEU (eng. Twenty foot equivalent unit), a ukupan promet kontejnera u LKT iznosio je 811,2 miliona TEU (UNCTAD, 2020). Pored toga, prisutni su i rast troškova transportnih sredstava, pretovarne mehanizacije i lučkih radnika (radne snage). Da bi privukao prevoznike, lučki

operater pokušava da skрати vreme zadržavanja svih korisnika terminala i da smanji troškove transporta i pretovara kontejnera unutar terminala poštujući ograničenja skladišnog prostora i površine terminala.

Mnogi autori su za modeliranje i analizu rada LKT koristili sisteme masovnog opsluživanja (SMO). To su jednostavni matematički modeli koji modeliraju nailazak i opsluživanje klijenata i objašnjavaju zagušenja odnosno postojanje redova čekanja. Legato i Mazza (2001) i (2019) i Canonaco i saradnici (2008) su procese opsluživanja kontejnerskih brodova i kontejnera transportno-pretovarnim sredstvima u LKT modelirali mrežom SMO u cilju usklađivanja intenziteta opsluživanja u pojedinačnim sistemima da bi se skratilo vreme opsluživanja brodova. Huynh (2005) je modelirao i analizirao proces opsluživanja drumskih teretnih vozila u LKT primenom mreže SMO u cilju smanjenja vremena obrta drumskih teretnih vozila. Yoon (2007) je primenio mrežu SMO da bi analizirao uticaj primene različitih nivoa bezbednosti na vreme obrta drumskih teretnih vozila.

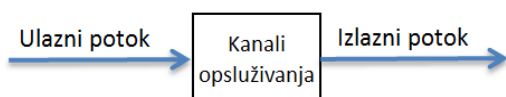
U ovom radu razmatra se proces transporta i pretovara kontejnera dopremljenih drumskim teretnim vozilima u LKT i predlaže rešenje kojim bi se smanjili ili eliminisali redovi čekanja unutar LKT. Pri tome se ulazno - izlazna kapija, mesto za pregled tereta i skladišna dizalica mogu posmatrati kao kanali SMO koji redom opslužuju kontejnere.

Stoga se u nastavku prvo daje opis SMO i navode pretpostavke o ulaznim i izlaznim potocima klijenata i karakteri-stike koje opisuju rad SMO. Potom se u tački tri izlaže predlog rešenja kojim bi se smanjili ili eliminisali redovi čekanja unutar LKT. U tački četiri opisan je simulacioni model redne veze SMO koji je razvijen u ovom radu. Zatim su upoređeni rezultati

dobijeni pojedinačnom analizom SMO korišćenjem analitičkih formula i simulacionih modela. Izračunate su i upoređene osnovne karakteristike koje opisuju rad SMO: srednji broj kontejnera u sistemu, srednje vreme koje kontejner provede u sistemu i srednje vreme koje kontejner provede u redu. Na kraju su izneti najznačajniji zaključci do kojih se došlo ovom analizom,

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE SISTEMA MASOVNOG OPSLUŽIVANJA¹

Teorija masovnog opsluživanja se već decenijama primenjuje u analizi i planiranju rada lučkih terminala. SMO obuhvata ulazni potok, opsluživanje i izlazni potok klijenata (slika 1). Brodovi, drumska teretna vozila, vagoni i tovarne jedinice predstavljaju klijente koji zahtevaju opsluživanje, dok pristajališta, pretovarna mesta, transportno-pretovarna sredstva, ulazno - izlazna kapija, rampe za merenje mase i dr. predstavljaju kanale u kojima se klijenti opslužuju.



Slika 1. Sistem masovnog opsluživanja

Događaji koji se realizuju na ulazu u SMO jedan za drugim u slučajno raspodeljenim vremenskim trenucima čine ulazni potok. Kako navodi Vukadinović (1988), mnogi proračuni i ogledi pokazali su da se dobijaju zadovoljavajući rezultati ako se pretpostavi da su ulazni potoci klijenata Poasonovi. Poasonovi potoci događaja koji poseduju osobine ordinarnosti, odsustva posledica i stacionarnosti nazivaju se prostim potocima. Ordinarnost je pojavljivanje jednog ili nijednog klijenta u kratkom vremenskom intervalu. Po odsustvu posledica, broj klijenata koji se pojavi u nekom vremenskom intervalu ne zavisi od broja prispelih klijenata u prethodnom intervalu (sadašnjost ne zavisi od prošlosti). Po stacionarnosti, srednji broj prispelih klijenata tokom nekog intervala ne zavisi od posmatranog vremenskog trenutka, već samo od dužine intervala.

Verovatnoća da se u proizvoljno izabranom intervalu vremena τ pojavi m događaja je:

$$P_{\tau}(X = m) = \frac{(\lambda \tau)^m}{m!} e^{-\lambda \tau} \quad (1)$$

a verovatnoća da se ne pojavi ni jedan događaj je:

$$P_{\tau}(X = 0) = e^{-\lambda \tau} \quad (2)$$

Vreme između susednih nailazaka klijenata, odnosno realizovanja događaja, smatra se slučajnom promenljivom. Ako se ova slučajna promenljiva označi sa T , onda je njena potpuna karakteristika funkcija raspodele:

$$F(t) = P(T < t), \quad t \geq 0 \quad (3)$$

Kako prost potok poseduje osobinu odsustva posledica, verovatnoća da se u intervalu t koji počinje posle pojave događaja, ne pojavi ni jedan drugi događaj može se računati koristeći formulu (2):

$$P(T \geq t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Odatle se dobija gustina raspodele verovatnoća slučajne promenljive T :

$$f(t) = F'(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0 \quad (5)$$

U prostom potoku intenziteta λ vreme između susednih nailazaka klijenata ima eksponencijalnu raspodelu sa parametrom λ .

Karakteristike eksponencijalne raspodele su:

$$M(T) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (6)$$

$$D(T) = M(T^2) - M^2(T) = \frac{2}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} \quad (7)$$

U ovom radu razmatrana je primena modela jednokanalnih SMO u LKT. Kendalova oznaka SMO sa jednim kanalom opsluživanja, sa prostim ulaznim potokom intenziteta λ , sa prostim potokom opsluživanja intenziteta μ i beskonačno mesta u redu je: $M(\lambda)/M(\mu)/1/\infty$, ili kraće $M/M/1/\infty$. Da bi ovaj SMO mogao da funkcioniše neophodno je da intenzitet

¹ Ovo poglavlje je napisano na osnovu Vukadinović (1988), Winston i Goldberg (1994) i Taha (1982).

ulaznog potoka bude manji od intenziteta opsluživanja ($\lambda < \mu$). U suprotnom bi došlo do nagomilavanja klijenata u redu. Osnovne karakteristike koje opisuju rad SMO su: srednji broj klijenata u sistemu, L , srednje vreme koje klijent provede u sistemu, W , srednje vreme koje klijent provede u redu, W_q :

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} n p_n = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (8)$$

U SMO se može naći n klijenata sa verovatnoćom p_n . Parametar ρ jednak je λ/μ i predstavlja srednji broj klijenata koji pristupe u SMO tokom srednjeg vremena opsluživanja jednog klijenta. S obzirom na to da vreme opsluživanja ima eksponencijalnu raspodelu, srednje vreme opsluživanja klijenta prema formuli (6) jednako je $1/\mu$.

U stacionarnom režimu rada važi Litlova formula:

$$W = \frac{L}{\lambda} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (9)$$

Srednje vreme čekanja u redu jednako je razlici srednjeg vremena provedenog u SMO i srednjeg vremena opsluživanja.

$$W_q = W - \frac{1}{\mu} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)} \quad (10)$$

U literaturi se u više radova (Kim i Kim 2002, Huynh 2005, Chen i ostali 2011) navodi da je za modeliranje nekih procesa opsluživanja drumskih teretnih vozila bolje koristiti SMO u oznaci $M/G/1/\infty$ umesto $M/M/1/\infty$.

U SMO označenom kao $M/G/1/\infty$ neophodno je da intenzitet prostog ulaznog potoka, λ , bude manji od intenziteta opsluživanja. Simbol G je simbol raspodele verovatnoća opšteg oblika. Slučajna promenljiva vreme opsluživanja, T , može da ima bilo koju raspodelu sa matematičkim očekivanjem $E\{t\}$ i standardnim odstupanjem σ . Srednji broj klijenata u sistemu određuje se po Poláček-Hinčinovoj formuli:



Slika 3. Redna veza tri jednokanalna SMO ($\lambda_1 > \mu_1$; $\lambda_2 > \mu_2$; $\lambda_3 > \mu_3$)

$$L = \lambda E\{t\} + \frac{\lambda^2 (E^2\{t\} + \sigma^2)}{2(1 - \lambda E\{t\})}, \quad \lambda E\{t\} < 1 \quad (11)$$

Na osnovu Litlove formule dobija se da je srednje vreme provedeno u sistemu, W , jednako:

$$W = \frac{L}{\lambda} \quad (12)$$

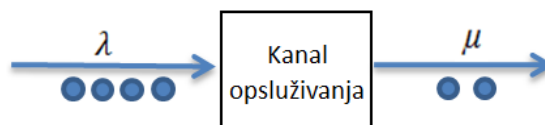
Srednji broj klijenata u redu, L_q , izračunava se po formuli:

$$L_q = L - \rho = L - \lambda E\{t\} \quad (13)$$

Srednje vreme čekanja u redu, W_q , izračunava se po Litlovoj formuli:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (14)$$

U praksi se često dešava da je intenzitet ulaznog potoka klijenata veći od intenziteta opsluživanja (slika 2).



Slika 2. Jednokanalni SMO pod pretpostavkom da je intenzitet ulaznog potoka λ veći od intenziteta opsluživanja μ

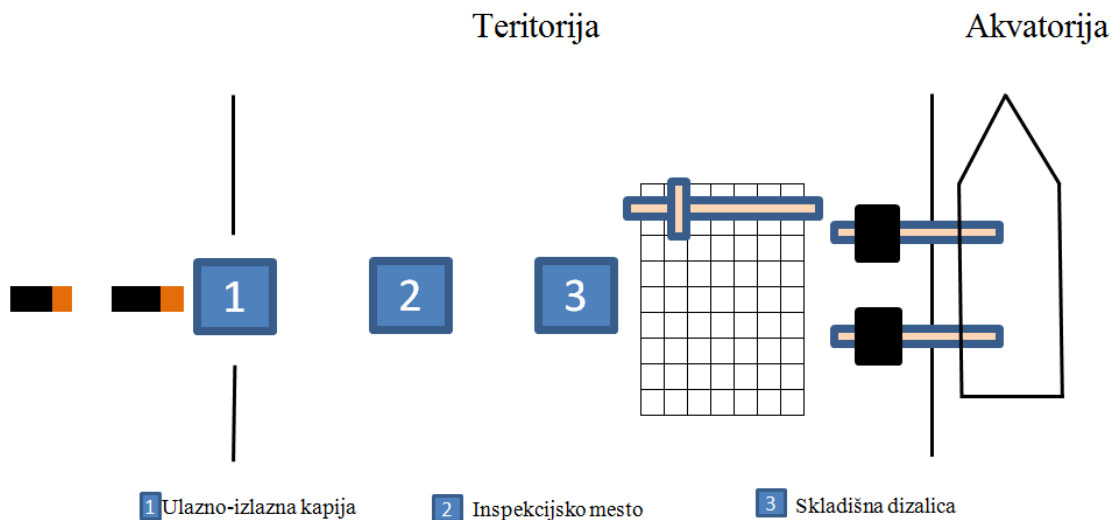
Cilj primene redne veze SMO (eng. Queuing network, a serial system of queuing systems) prikazane na slici 3 je izbor / određivanje intenziteta opsluživanja u pojedinačnim SMO da bi se smanjilo vreme čekanja kontejnera unutar lučkog terminala i posledično, vreme obrta drumskih teretnih vozila koja dopremaju ili otpremaju kontejnere.

3. PRIMER PROCESA TRANSPORTA I PRETOVARA IZVOZNIH KONTEJNERA U LUČKOM KONTEJNERSKOM TERMINALU

Kontejneri koji se u LKT dopremaju kopnenim vidovima saobraćaja u cilju utovara na brodove i otpremaju vodnim saobraćajem zovu se izvozni kontejneri, dok se kontejneri dopremljeni vodnim saobraćajem u cilju dalje otpreme kopnenim vidovima saobraćaja zovu uvozni kontejneri.

U nastavku je opisan i šematski prikazan (slika 4) jedan primer toka izvoznih kontejnera u LKT. Pri kretanju izvoznih kontejnera kroz terminal od ulazno - izlazne kapije do broda obavlja se niz operacija koje su prikazane na slici 4.

Posle prolaska ulazno - izlazne kapije na kojoj se proverava dokumentacija (1), drumsko teretno vozilo sa kontejnerom upućuje se na inspeksijsko mesto na kojem se obavlja kontrola tereta, tj. pregled tereta, merenje mase tereta, uzorkovanje i dr. (2). Zatim se upućuje na otvoreno skladište u kojem se kontejner skladišnom dizalicom istovaruje sa vozila i postavlja na odgovarajuću, unapred određenu poziciju (3). Kada naiđe brod uskladišteni izvozni kontejneri utovaruju se skladišnom dizalicom na transportna sredstva i voze na operativnu obalu gde se obalskim kranovima utovaruju u brod. S obzirom na to da je ovo poslednja aktivnost koja počinje kada su svi izvozni kontejneri pozicionirani u skladište, ona se u ovom radu ne razmatra.



Slika 4. Šematski prikaz toka izvoznih kontejnera u lučkom kontejnerskom terminalu

Na slici 5 prikazan je kumulativni broj prispelih i kumulativni broj opsluženih kontejnera na ulazno - izlaznoj kapiji, na inspeksijskom mestu i kumulativni broj kontejnera opsluženih skladišnom dizalicom u zavisnosti od vremena t . Sa N je označen ukupan broj prispelih izvoznih kontejnera u LKT. Pretpostavljeno je da su tokom intervala $[t_1, t_2]$ stigli svi izvozni kontejneri koji se utovaruju u jedan brod. Kumulativna stepenasta funkcija nailaska kontejnera tokom vremena aproksimirana je krivom. Kumulativne stepenaste funkcije opsluženih klijenata tokom vremena aproksimirane su pravim linijama.

Ulazno - izlazna kapija, inspeksijsko mesto i skladišna dizalica mogu se posmatrati kao kanali redno vezanih SMO koji opslužuju kontejnere određenim konstantnim intenzitetima opsluživanja. Na slici 5 prikazane su hipotetička kriva i prave:

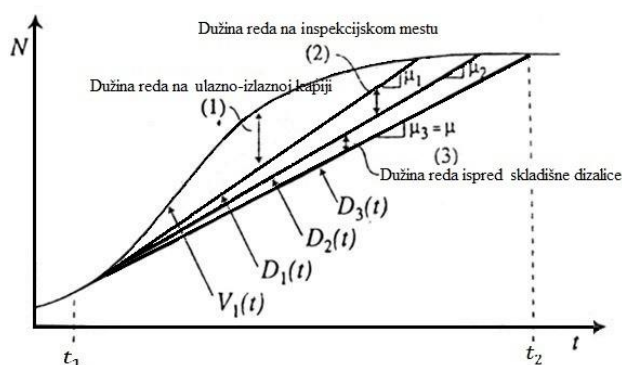
$V_1(t)$ – ukupan broj prispelih kontejnera u LKT u zavisnosti od vremena t

$D_1(t)$ – ukupan broj kontejnera opsluženih na ulazno - izlaznoj kapiji u zavisnosti od vremena t

$D_2(t)$ – ukupan broj kontejnera opsluženih na inspekcij-
skom mestu u zavisnosti od vremena t

$D_3(t)$ – ukupan broj kontejnera opsluženih skladišnom
dizalicom u zavisnosti od vremena t

Pošto se svi kontejneri opsluženi na ulazno - izlaznoj
kapiji upućuju na inspekcijsko mesto, izlazni potok
kontejnera sa ulazno - izlazne kapije ujedno je i ulazni
potok kontejnera na inspekcijsko mesto. Takođe, izlazni
potok kontejnera sa inspekcijskog mesta smatra se
ulaznim potokom kontejnera na otvoreno skladište.



Slika 5. Kumulativni dijagram prispelih i opsluženih
kontejnera u lučkom kontejnerskom terminalu,
(Daganzo, 1997)

Na slici 5 može se videti da je najduži red kontejnera
ispred ulazno - izlazne kapije označen sa (1). Parametri
prvog jednokanalnog SMO su intenzitet ulaznog potoka
drumskih teretnih vozila koja dovoze izvozne
kontejnere (λ_1) i intenzitet opsluživanja (μ_1) pod
pretpostavkom da je $\lambda_1 > \mu_1$. Povećanjem intenziteta
opsluživanja μ_1 na ulazno - izlaznoj rampi, može se
smanjiti dužina reda ispred prvog SMO. To bi
prouzrokovalo dugačak red (2) drumskih teretnih vozila
sa kontejnerima ispred drugog SMO na kome se obavlja
inspekcija. To nije u interesu lučkog operatera. Na slici
5 prikazana je dužina reda ispred skladišne dizalice (3).
Međutim, ako se ne promeni intenzitet opsluživanja
skladišne dizalice, μ_3 , ukupno vreme koje kontejneri
provedu u sva tri SMO će ostati nepromenjeno.
Pojedinačno povećanje intenziteta opsluživanja u
nekom SMO dovodi do produženja redova ispred
narednih SMO. Može se zaključiti da bi bilo najbolje da
intenziteti opsluživanja u svim SMO budu jednaki
($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$) odnosno da nagibi pravih $D_1(t)$ i $D_2(t)$
budu jednaki nagibu prave $D_3(t)$. To bi sprečilo
pojavljivanje reda unutar kontejnerskog terminala.

Vreme koje protekne od prispeća kontejnera k ,
 $k=1, 2, \dots, N$ na ulazno - izlaznu kapiju do njegovog
pozicioniranja u skladištu (ukupno vreme koje kontejner
 k provede čekajući u redovima i tokom opsluživanja u
sva tri SMO) može da se očitava sa slike 5 tako što se od
kontejnera k na ordinati povuče vodoravna linija i
izmeri dužina duži od preseka sa $V_1(t)$ i $D_3(t)$.

Površina koju formiraju kriva $V_1(t)$, prava $D_3(t)$ i
vertikale $t = t_1$ i $t = t_2$ predstavlja ukupno vreme koje
kontejneri provedu u sva tri SMO:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} [V_1(t) - D_3(t)] dt \quad (15)$$

dok je prosečno vreme koje kontejneri provedu u sva tri
SMO:

$$\bar{T}_s = \frac{A}{V_1(t_2) - V_1(t_1)} \quad (16)$$

Kumulativni dijagrami mogu se koristiti i pri projekto-
vanju LKT, a naročito pri izboru i donošenju odluka o
broju transportno-pretovarnih sredstava, njihovoj proiz-
vodnosti i propusnoj sposobnosti LKT.

4. PRIMENA SIMULACIJE NA MODELIRANJE FUNKCIONISANJA TRI REDNO VEZANA SISTEMA MASOVNOG OPSLUŽIVANJA

Modeliranje opsluživanja drumskih teretnih vozila koja
dovoze kontejnere u LKT može da se opiše kao mreža
tri redno vezana SMO, pri čemu prva dva SMO mogu
da se opišu Kendallovom oznakom $M/M/1/\infty$, a treći
može da se označi kao $M/G/1/\infty$.

Za razmatrani hipotetički primer uzete su sledeće
vrednosti ulaznih parametara:

Intenzitet ulaznog potoka: $\lambda = 3$ [vozila/h]

Prvi SMO: $M(\lambda)/M(\mu_1)/1/\infty$, ili $M/M/1/\infty$, Intenzitet
opsluživanja: $\mu_1 = 12$ [vozila/h]

Drugi SMO: $M(\lambda)/M(\mu_2)/1/\infty$, ili $M/M/1/\infty$, Intenzitet
opsluživanja: $\mu_2 = 6$ [vozila/h]

Treći SMO: $M/G/1/\infty$, Parametri vremena opsluživanja:

$$E(T) = 15 \text{ min} = 0,25 \text{ h}, \quad \sigma = 2 \text{ min} = 0,03333 \text{ h}$$

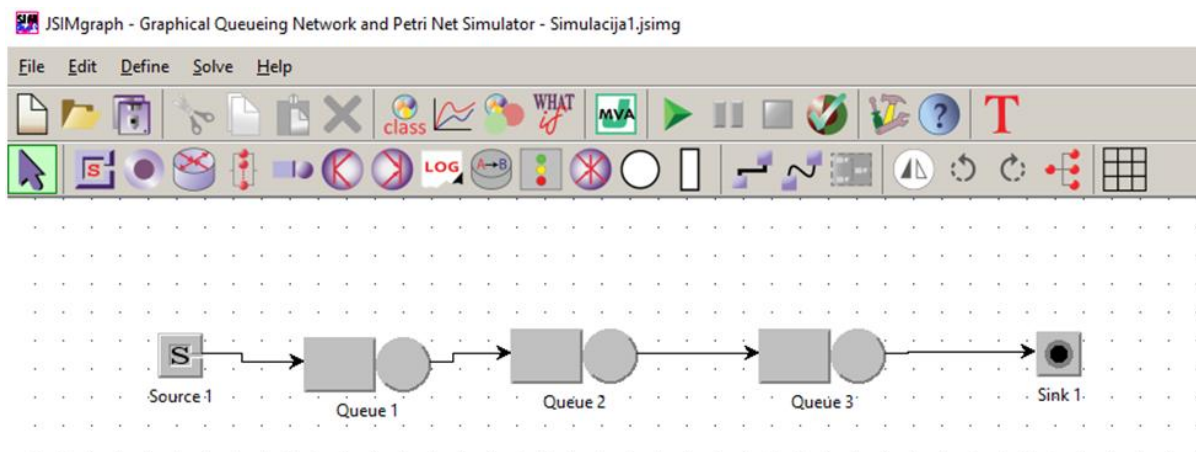
U prvom jednokanalnom SMO sa neograničenom dužinom reda, ako vreme između susednih nailazaka klijenata ima eksponencijalnu raspodelu sa parametrom λ i ako vreme opsluživanja ima eksponencijalnu raspodelu sa parametrom μ_1 , tada vreme između susednih nailazaka klijenata u drugi SMO ima eksponencijalnu raspodelu sa parametrom λ . Teorema važi kada je intenzitet ulaznog potoka manji od intenziteta opsluživanja $\lambda < \mu_1$ (Winston i Goldberg, 1994).

Kada se proces opsluživanja kontejnera modelira rednom vezom SMO, ova teorema važi kada svaki SMO ima veći intenzitet opsluživanja od intenziteta ulaznog potoka λ , odnosno može da opsluži sve kontejnere koji traže opsluživanje. Samim tim, ulazni potok u treći SMO će biti intenziteta λ ($\lambda < \mu_2$).

U tabeli 1 dato je poređenje rezultata koji bi se dobili pojedinačnom analizom SMO korišćenjem analitičkih formula i simulacionih rezultata dobijenih simuliranjem celog posmatranog sistema. Za simulaciju je korišćen softver Java Modelling Tools 1.2.1. Izgled redne veze SMO u ovom softveru dat je na slici 6.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da su vrednosti koje se dobijaju simulacijom skoro identične vrednostima koje se dobijaju na osnovu analitičkih formula. Iz tog razloga za ovakvu vezu SMO nema potrebe da se koriste softveri za simulaciju, već karakteristike sistema treba utvrditi pojedinačnom analizom i primenom analitičkih formula.

U slučaju drugačijih raspodela verovatnoća slučajnih promenljivih, primena analitičkih formula verovatno ne bi bila moguća, pa bi bilo neophodno koristiti simulacione softvere.



Slika 6. Izgled redno vezanih SMO u Java Modelling Tools softveru

Tabela 1. Poređenje rezultata dobijenih analitički i primenom simulacije

Karakteristike	SMO 1		SMO 2		SMO 3	
	Analitički	Simulacija	Analitički	Simulacija	Analitički	Simulacija
W_q [min]	1,668	1,662	10,002	9,954	22,902	22,476
W [min]	6,666	6,654	19,998	19,974	37,902	37,476
L [vozila]	0,3333	0,3309	1	0,9953	1,895	1,8584

U drugom primeru data je uporedna analiza rezultata koji se dobijaju primenom simulacije pri različitim raspodelama verovatnoća vremena opsluživanja kod prva dva SMO. Izvršeno je 5 testiranja sa različitim parametrima raspodela verovatnoća vremena

opsluživanja koji su dati u tabeli 2. Prva od pet simulacija zapravo predstavlja simulaciju koja je već data kao prvi primer. Rezultati simulacija prikazani su u tabeli 3. Vremenske karakteristike date su u minutima.

Tabela 2. Raspodele verovatnoća i parametri raspodele verovatnoća vremena opsluživanja

Simulacija	SMO	Raspodela verovatnoća vremena opsluživanja	Parametri raspodele verovatnoća
1	SMO 1	Eksponecijalna	$\mu_1 = 12$ vozila/h
	SMO 2	Eksponecijalna	$\mu_2 = 6$ vozila/h
	SMO 3	Normalna	$E\{t\} = 15$ min, $\sigma = 2$ min
2	SMO 1	Eksponecijalna	$\mu_1 = 12$ vozila/h
	SMO 2	Normalna	$E\{t\} = 10$ min, $\sigma = 1$ min
	SMO 3	Normalna	$E\{t\} = 15$ min, $\sigma = 2$ min
3	SMO 1	Eksponecijalna	$\mu_1 = 12$ vozila/h
	SMO 2	Ravnomerna	$a = 5$ min, $b = 15$ min
	SMO 3	Normalna	$E\{t\} = 15$ min, $\sigma = 2$ min
4	SMO 1	Normalna	$E\{t\} = 5$ min, $\sigma = 0,5$ min
	SMO 2	Normalna	$E\{t\} = 10$ min, $\sigma = 1$ min
	SMO 3	Normalna	$E\{t\} = 15$ min, $\sigma = 2$ min
5	SMO 1	Ravnomerna	$a = 3$ min, $b = 7$ min
	SMO 2	Ravnomerna	$a = 5$ min, $b = 15$ min
	SMO 3	Normalna	$E\{t\} = 15$ min, $\sigma = 2$ min

Na osnovu dobijenih rezultata prikazanih u tabeli 3 mogu se uporediti karakteristike pojedinačnih SMO. Poredeći rezultate koji su dobijeni za SMO 1 u prvoj i drugoj simulaciji može se uočiti da su dobijene vrednosti približno jednake. Ovakav rezultat se i mogao očekivati s obzirom na to da su karakteristike ulaznog potoka i vremena opsluživanja ovog SMO identične u obe simulacije (vreme između susednih nailazaka klijenata ima ekspancijalnu raspodelu sa parametrom $\lambda = 3$ vozila/h, a vreme opsluživanja ima ekspancijalnu raspodelu sa parametrom $\mu_1 = 12$ vozila/h). Međutim, kod trećeg SMO bez obzira na to što je vreme opsluživanja ostalo isto rezultati se dosta razlikuju. Razlog za ovo odstupanje je činjenica da u drugoj simulaciji vreme opsluživanja kod SMO 2 nema ekspancijalnu raspodelu (već normalnu) tako da ni vreme između susednih nailazaka klijenata kod ulaza u SMO 3 nema istu raspodelu kao kod SMO 1 i SMO 2. Iz sličnih razloga odstupanja se javljaju i u drugim simulacijama koje su izvršene.

Najbolje, najlošije i srednje vrednosti karakteristika SMO 1, SMO 2 i SMO 3 prikazane su u tabeli 4. Ove vrednosti su preuzete iz tabele 3, pri čemu su iskošenim

(*Italic*) brojevima označene najlošije vrednosti, a podebljanim (**Bold**) najbolje. Prosečne vrednosti su izračunate kao srednja vrednost vrednosti dobijenih tokom svih pet simulacija. Može se uočiti da su najbolje (najmanje) vrednosti karakteristika uglavnom dobijene u četvrtoj simulaciji, a najlošije vrednosti karakteristika dobijene su u većini slučajeva u prvoj simulaciji. Grafički prikaz odstupanja najboljih i najlošijih vrednosti u odnosu na srednje prikazan je na slici 7.

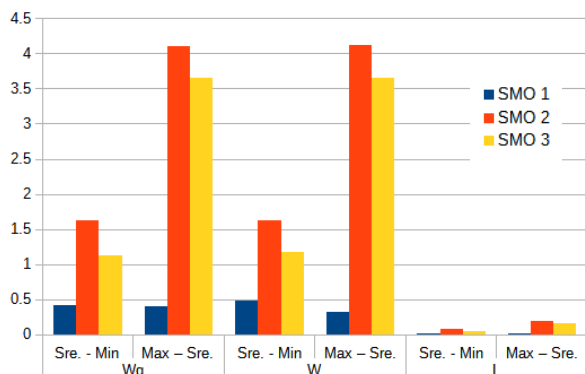
Sa slike 7 može se uočiti da se najmanja odstupanja javljaju kod SMO 1, a najveća kod SMO 2. Na primer, kod SMO 1 maksimalna odstupanja po vremenima čekanja i opsluživanja iznose do 0,5 minuta, a po srednjem broju vozila u sistemu maksimalno odstupanje je približno jednako nuli (manje je od 0,02). Odstupanja kod SMO 2 i SMO 3 su nešto veća nego kod SMO 1. Najveća odstupanja od prosečnih vrednosti pri čekanju i opsluzi kod SMO 2 su neznatno veća od 4 minuta, a kod SMO 3 su nešto veća od 3,5 minuta. Po karakteristici srednji broj vozila u sistemu najveće odstupanje od srednje vrednosti dobijeno je za SMO 2 i iznosi 0,2 vozila.

Tabela 3. Rezultati simulacija

Simulacija	Karakteristike	SMO 1	SMO 2	SMO 3
1	W_q [min]	1,662	9,954	22,476
	W [min]	6,654	19,974	37,476
	L [vozila]	0,3309	0,9953	1,8584
2	W_q [min]	1,65	5,01	17,682
	W [min]	6,642	15,018	32,628
	L [vozila]	0,3311	0,7512	1,641
3	W_q [min]	1,662	5,376	18,012
	W [min]	6,66	15,378	33,012
	L [vozila]	0,3332	0,7696	1,6561
4	W_q [min]	0,84	4,218	17,802
	W [min]	5,844	14,226	32,862
	L [vozila]	0,2923	0,7111	1,6398
5	W_q [min]	0,882	4,674	18,12
	W [min]	5,88	14,652	33,072
	L [vozila]	0,2946	0,735	1,6632

Tabela 4. Najbolje, najlošije i srednje vrednosti karakteristika SMO

		SMO 1	SMO 2	SMO 3
W_q [min]	Min	0,84	4,218	17,682
	Max	1,662	9,954	22,476
	Srednje	1,2615	5,8464	18,8184
W [min]	Min	5,844	14,226	32,628
	Max	6,66	19,974	37,476
	Srednje	6,336	15,8496	33,81
L [vozila]	Min	0,2923	0,7111	1,6398
	Max	0,3332	0,9953	1,8584
	Srednje	0,31642	0,79244	1,6917



Slika 7. Odstupanja minimalnih i maksimalnih vrednosti karakteristika od njihovih srednjih vrednosti

5. ZAKLJUČAK

U radu su razmatrani procesi transporta i pretovara kontejnera dopremljenih drumskim teretnim vozilima u LKT. Ulazno - izlazna kapija, inspekcijско mesto i skladišna dizalica mogu se posmatrati kao kanali redno vezanih SMO koji opslužuju vozila. Predloženo je rešenje kojim bi se eliminisali redovi čekanja unutar LKT.

Uvođenjem određenih pretpostavki, za potrebe ove analize razvijen je simulacioni model redne veze SMO. Rezultati simulacionog modela upoređeni su sa rezultatima dobijenim pojedinačnom analizom SMO korišćenjem analitičkih formula. Izračunate su i upoređene osnovne karakteristike koje opisuju rad SMO: srednji broj vozila u sistemu, srednje vreme koje vozilo provede u sistemu, srednje vreme koje vozilo provede u redu.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da su u slučaju redne veze u SMO kod kojih vreme između susednih nailazaka vozila u LKT i vreme opsluživanja imaju eksponencialnu raspodelu (ili eventualno poslednji SMO ima raspodelu opšteg karaktera) vrednosti koje se dobijaju simulacijom skoro identične vrednostima koje se dobijaju na osnovu analitičkih formula. Iz tog razloga za ovakve pretpostavke o raspodelama slučajnih promenljivih nema potrebe koristiti softvere za simulaciju već bi karakteristike trebalo utvrditi pojedinačnom analizom svakog SMO primenom analitičkih formula.

U slučaju drugačijih raspodela verovatnoća slučajnih promenljivih, primena analitičkih formula verovatno ne bi bila moguća pa bi bilo neophodno koristiti simulacione softvere. Međutim, ukoliko je potrebno brzo doći do procene karakteristika rada nekog sistema može se

ipak razmotriti upotreba analitičkih modela pri čemu bi se umesto raspodela verovatnoća koje najviše odgovaraju stvarnom stanju rada sistema koristile one koje omogućavaju primenu odabranog analitičkog pristupa. Na taj način došlo bi se do rezultata koji mogu da predstavljaju u manjoj ili većoj meri dobru aproksimaciju. Ove rezultate bi kasnije svakako bilo dobro proveriti razvojem i testiranjem odgovarajućih simulacionih modela. U ovom radu je na jednom hipotetičkom primeru pokazano kako se vrednosti karakteristika rada sistema mogu menjati u zavisnosti od odabranih raspodela verovatnoća i njihovih procenjenih karakteristika. Kod većeg broja razmatranih karakteristika SMO nije došlo do promena njihovih vrednosti koje bi imale veliki značaj u praksi.

U okviru budućih istraživanja mogu se porediti rezultati u slučaju postojanja redne veze SMO sa više kanala i beskonačno mesta u redu. Takođe, mogu se ispitati određene zakonitosti koja bi se javile u sistemima koji se sastoje iz više SMO koji ne bi bili redno povezani.

LITERATURA

- [1] Canonaco, P., Legato, P., Mazza, R.M. and Musmanno, R. A queuing network model for the management of berth crane operations, *Computers & Operations Research*, 35 (8), 2432- 2446, 2008.
- [2] Chen, X., Zhou, X., and List, G.F. Using time-varying tools to optimize truck arrivals as port, *Transportation Research Part E*, 47, 965-982, 2011.
- [3] Daganzo, C. *Fundamentals of transportation and traffic operations*. Oxford: Pergamon, 1997.
- [4] Huynh, N. *Methodologies for Reducing Truck Turn Time at Marine Container Terminals*, Ph.D. Dissertation, The University of Texas, Austin, 2005.
- [5] Kim, K.H. and Kim, H.B. The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers, *Transportation Research Part B*, 36 (9), 821-835, 2002.
- [6] Legato, P. and Mazza, R.M. Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation, *European Journal of Operational Research*, 133 (3), 537-547, 2001.
- [7] Legato, P. and Mazza, R.M. Queueing analysis for operations modeling in port logistics, *Maritime Business Review*, 5 (1), 67-83, 2019.

- [8] United Nations Conference on Trade and Development. Review of Maritime Transport 2020 UNCTAD. United Nations Publications, 2020. <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2020>.
- [9] Vukadinović, S. Masovno opsluživanje. Naučna knjiga, Beograd, 1988.
- [10] Taha, H., Operations Research, MacMillan Publishing Co., Inc., New York, 1982.
- [11] Winston, W. L. and Goldberg, J. B. Operations research: Applications and algorithms. Belmont, CA: Thomson/Brooks/Cole, 1994.
- [12] Yoon, D.-G. Analysis of truck delays at container terminal security inspection station, Ph.D. Dissertation, New Jersey Institute of Technology, 2007.

MODELLING OF CONTAINER SERVICE AT PORT TERMINALS

by

Ivana VUKIĆEVIĆ BIŠEVAC, Miloš NIKOLIĆ
Faculty of Transport and Traffic Engineering, Belgrade
Dejana ĐORĐEVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade
Katarina VUKADINOVIĆ
Faculty of Transport and Traffic Engineering, Belgrade

Summary

A serial system for handling export containers at a port terminal is considered in this paper. The steps that a container must follow in passing through the various port control points are: an entry gate where some paperwork is done, another control point such as weighting/inspection station, and a bridge-type yard crane that lifts containers onto a storage area. An entry gate, weighting/inspection station and a yard crane can be considered as service channels of queuing systems that operate in series.

The goal of implementation of serial queuing systems is to determine the intensity of service in an individual

queuing system to reduce the waiting time of containers inside the port terminal, as well as the turnaround time of road freight vehicles that deliver export containers.

Under the specified assumptions related to probability distributions for service time, the simulation model of a serial system of queuing systems is developed. It has been shown that modeling of container service at port terminals can be carried out successfully by applying serial queuing systems.

Keywords: queuing systems, A serial system of queuing systems, Port container terminal

Redigovano 4.9.2021.