

UNIVERZITET U BEOGRADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

# PLOVNI PUTEVI I PRISTANIŠTA

## KROZ REŠENE PRIMERE

Miodrag Jovanović  
Dejana Đorđević  
Nikola Rosić



Beograd, 2023.

UNIVERZITET U BEOGRADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

**PLOVNI PUŤEVI I  
PRISTANIŠTA**

**KROZ REŠENE PRAKTIČNE PRIMERE**

**Miodrag Jovanović  
Dejana Đorđević  
Nikola Rosić**

**oktobar, 2023. godine**

dr Miodrag Jovanović, dipl.građ.inž  
redovni profesor u penziji  
dr Dejana Đorđević, dipl.građ.inž  
vanredni profesor  
dr Nikola Rosić, dipl.građ.inž  
docent

## **PLOVNI PUTEVI I PRISTANIŠTA kroz rešene praktične primere**

Recenzenti:

dr Ljubodrag Savić, redovni profesor  
dr Katarina Vukadinović, redovni profesor  
dr Đula Fabijan, redovni profesor

Odobreno za štampu odlukom Nastavno-naučnog veća  
Univerziteta u Beogradu, Građevinskog fakulteta 22.4.2021. godine.

Izdavač:

Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet  
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Glavni i odgovorni urednik:

dr Vladan Kuzmanović, redovni profesor

Prelom teksta i crteži: autori

Naslovna strana: autori

Elektronsko izdanje

© 2023 Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet  
Sva prava zadržavaju izdavač i autori.

ISBN 978-86-7518-238-2

# Predgovor

Ovaj udžbenik namenjen je studentima modula za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Udžbenik je nastao kao rezultat višedecenijskog rada na unapređivanju nastave iz obaveznog predmeta Plovni putevi i pristaništa na osnovnim, a potom i na master akademskim studijama.

Zašto je važno da se Plovni putevi i pristaništa izučavaju kao obavezan predmet? Važno je, pre svega, zbog činjenice da kroz Srbiju protiču tri reke duž kojih se prostiru međunarodni plovni putevi – Dunav, Sava i Tisa i međunarodnih obaveza koje Srbija ima kao članica Dunavske i Savske komisije. Rekom Dunav prolazi Panevropski transportni koridor VII – koridor Rajna-Dunav u koji, zbog njegovog velikog značaja u kargo i teretnom saobraćaju, Evropska komisija ulaže velika finansijska sredstva kroz brojne programe (CEF, Horizon, IPA, Interreg). Sredstva su namenjena: 1) primeni savremenih tehnologija u cilju stvaranja uslova za bezbednu plovidbu, praćenja plovila, prenosa informacija, boljeg planiranja i organizacije rada brodskih prevodnica; 2) efikasnom prevazilaženju smetnji duž kritičnih sektora, 3) za pravljenje digitalnih dvojnika – „digital twins“, koji omogućavaju upravljanje vodnim saobraćajem na osnovu informacija prikupljenih u realnom vremenu, 4) korišćenju savremenih antikorozivnih, visoko otpornih materijala za rekonstrukciju postojećih objekata na plovnim putevima i 5) primeni konstruktivnih prirodno inspirisanih rešenja tokom izgradnje novih objekata. Plovni put rekom Savom obezbeđuje povezivanje regiona zapadnog Balkana sa koridorom Rajna-Dunav, dok je reka Tisa važna za regionalnu saradnju sa Mađarskom. Osim međunarodnih plovnih puteva, tu je i mreža nacionalnih plovnih puteva u okviru hidromelioracionog i plovidbenog sistema Dunav-Tisa-Dunav, kojom se skraćuje plovidba Dunavom za 400 km. Na mreži kanala izgrađene su 24 regulacione i 5 sigurnosnih ustava, 16 brodskih prevodnica i 6 crpnih stanica. Objekti su izgrađeni pre više od 50 godina i zahtevaju temeljnu rekonstrukciju. Sve to zahteva postojanje obrazovanih kadrova sposobnih da kombinuju osnovna teorijska znanja sa novim tehnologijama u održavanju i upravljanju ovakvim složenim sistemom.

Udžbenik je dobio pozitivnu recenziju i odobrenje za štampu u aprilu 2021. godine, u trenutku kada nas je napustio profesor Dragutin Muškatirović, utemeljivač Plovnih puteva i pristaništa kao zasebnog, obaveznog predmeta i dugogodišnji profesor na komplementarnim predmetima Regulacija reka i Plovni putevi i pristaništa. Ovaj udžbenik posvećujemo sećanju na profesora Muškatirovića koji je shvatio značaj geopolitičkog položaja tadašnje Jugoslavije u evropskim robnim tokovima i aktivno pratio i učestvovao u stvaranju uslova za nesmetanu i bezbednu plovidbu rekom Dunav kroz učešće u brojnim studijama, projektima ili njihovim revizijama, ali i kao državni predstavnik u međunarodnom udruženju za plovidbu PIANC (Permanent International Association of Navigation Congresses) iz kojeg je prenosio najnovija naučna i stručna saznanja i iskustva budućim stručnjacima u ovoj oblasti. Za razliku od današnjih autora, profesor Muškatirović se nije ograničavao samo na hidrotehnički aspekt objekata na unutrašnjim plovnim putevima (npr. objekata za savlađivanje denivelacije), već je svaki hidrotehnički objekat posmatrao kao jedinstvenu celinu razmatrajući konstruktivna rešenja, statički sistem, opremu itd.. Isti pristup imao je i u razmatranju rečnih teretnih pristaništa, a u druženju sa kolegama sa Saobraćajnog fakulteta, na kojem je držao predmet Plovni putevi, usvajao je i nove pristupe izučavanju vodnog saobraćaja – teoriju masovnog opsluživanja i polako je uvodio u program predmeta za građevinske inženjere.

Posebnu zahvalnost dugujemo našem recenzentu, profesorki Katarini Vukadinović i njenom saradniku Milošu Nikoliću, koji su nam ukazali na ograničenja i uslove o kojima treba voditi računa kada se primenjuje teorija masovnog opsluživanja u projektovanju brodskih prevodnica i rečnih teretnih pristaništa. Ovaj udžbenik posvećujemo i sećanju na profesorku Vukadinović, posvećenog nastavnika i istraživača, neumornog borca za istinu, velikog pregaoca, a pre svega dobrog i poštenog čoveka spremnog da svakoga sasluša i da svakome pomogne u okviru svojih mogućnosti. Profesorka Vukadinović je imala visoku svest o značaju saradnje Saobraćajnog i Građevinskog fakulteta i rezultatima koji mogu da proisteknu iz sinergije njihovih inženjera i istraživača. Draga profesorka Kaća nas je iznenada napustila kada smo proletoš pripremali ovaj predgovor i spremali se da joj uručimo njen primerak koji je željno čekala. Primerak sa ovim sećanjem stavićemo na njen sto na početku školske godine.

Veliku zahvalnost dugujemo i ostalim recenzentima, profesorima Ljubodragu Saviću i Đuli Fabijanu, na pažljivom pregledu rukopisa.

U Beogradu,  
avgust 2023. godine

Autori

## Sadržaj

<b>1</b>	<b>Brodsko prevodnica</b>	<b>1</b>
1.1	Dimenzionisanje komore . . . . .	1
1.1.1	Dužina . . . . .	1
1.1.2	Širina . . . . .	1
1.1.3	Najmanja dubina . . . . .	1
1.2	Dimenzionisanje gornje glave čeonih sistema . . . . .	2
1.3	Hidraulički proračun punjenja komore . . . . .	2
1.3.1	Koeficijent protoka sistema . . . . .	2
1.3.2	Numerički model . . . . .	4
1.4	Intenzitet sila u pričvrstnim užadima . . . . .	9
1.5	Propusna moć brodske prevodnice . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Plovni kanal</b>	<b>13</b>
2.1	Najmanje dimenzije poprečnog preseka . . . . .	13
2.2	Otpor broda u plovnom kanalu . . . . .	15
2.2.1	Ulazni podaci . . . . .	16
2.2.2	Konstantne veličine . . . . .	16
2.2.3	Hidraulički elementi poprečnih preseka . . . . .	17
2.2.4	Brzina povratnog toka . . . . .	17
2.2.5	Bilans sila . . . . .	17
2.2.6	Pogonska snaga . . . . .	18
2.2.7	Ukupni otpor broda. Razdvajanje otpora . . . . .	19
2.2.8	Podешavanje vrednosti parametara modela . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Pristanište</b>	<b>21</b>
3.1	Matematički model opsluživanja plovila . . . . .	21
3.1.1	Parametri sistema opsluživanja . . . . .	21
3.1.2	Verovatnoće stanja sistema . . . . .	23

3.2	Dužina operativne obale . . . . .	24
3.3	Određivanje broja pretovarnih mesta i dužine kejskog zida . . .	24
3.3.1	Troškovi pretovara . . . . .	26
3.3.2	Prihod od pretovara (dobit) . . . . .	28
3.3.3	Vrednovanje varijanti na osnovu dobiti i troškova . . .	28
3.4	Dimenzionisanje skladišta . . . . .	30
3.5	Suvozemni transport u pristaništu . . . . .	31
3.6	Dimenzionisanje akvatorije pristaništa . . . . .	32
	<b>Literatura</b>	<b>33</b>
	<b>Dodataci</b>	<b>35</b>
	Dodatak 1 . . . . .	35
	Dodatak 2 . . . . .	36
	Dodatak 3 . . . . .	37
	Dodatak 4 . . . . .	38

# 1

## Brodska prevodnica

### 1.1 Dimenzionisanje komore

#### 1.1.1 Dužina

$$L_{kp} = \begin{cases} L_p + \sum_{i=1}^{n_L} (L_{pl})_i + 2\Delta L = L_{sas} + 2\Delta L & \text{– potiskivani sastav} \\ L_t + \sum_{i=1}^{n_L} (L_{pl})_i + (n_L + 1)\Delta L = L_{sas} + 2\Delta L & \text{– tegljeni sastav} \end{cases} \quad (1.1)$$

gde je  $L_{kp}$  - korisna dužina komore [m],  $n_L$  - broj plovila u sastavu po dužini komore,  $L_p$  - dužina potiskivača [m],  $L_t$  - dužina broda-tegljača [m],  $L_{pl}$  - dužina jednog plovila u sastavu [m],  $\Delta L = 0.015L_{mp} + 1$  - sigurnosni razmak [m], a  $L_{mp}$  - dužina merodavnog plovila [m], koje je za samohodno plovilo jednaka dužini plovila ( $L_{pl}$ ), a za sastav, dužini sastava ( $L_{sas}$ ).

#### 1.1.2 Širina

$$B_{kp} = (1.08 \div 1.10) \sum_{i=1}^{n_B} B_{pl} \quad (1.2)$$

gde je  $B_{kp}$  - širina komore prevodnice [m],  $B_{pl}$  - širina merodavnog plovila [m],  $n_B$  - broj plovila po širini komore.

#### 1.1.3 Najmanja dubina

$$H_{kp} = (1.20 \div 1.25) h_g \quad (1.3)$$

gde je  $H_{kp}$  - početna (minimalna) dubina u komori [m],  $h_g$  - maksimalni gaz merodavnog plovila [m].



## 1.2 Dimenzionisanje gornje glave čeonih sistema

Sistem punjenja kroz kratke galerije prikazan je na slici 1.1a.

Karakteristične dužine: Dimenzije dvokrilne kapije i njene niše:

$$\begin{array}{ll}
 l_1 \approx (2/3)H_p & d_n \approx (1/10)B_{kp} \\
 l_2 \approx H_p (\geq 5 \text{ m}) & D_n \approx (0.5-1.20) \text{ ctg } \alpha_s \\
 l_3 \approx 3b_g + d_n & B_v = (B_{kp} + 2d_n)/(2\cos \alpha_k) \\
 l_4 \approx D_n + d_p & l_n \approx (1.10-1.20)B_v
 \end{array}$$

U navedenim izrazima je  $\alpha_s$  - ugao kosine prilaznog kanala,  $\alpha_k$  - ugao otklona kapije ( $20-22^\circ$ ), a  $d_p$  - debljina donje ploče. Konstruktivna visina glave, odnosno zida komore je:  $H_{zk} = H_{kp} + H_p + 1$  m, a dužina krila na spoju sa prilaznim kanalom:  $l_5 \approx H_{zk} \text{ ctg } \alpha_s + 1$  m.

Sistem punjenja isticanjem ispod ustave prikazan je na slici 1.1b.

Radi smanjenja visine ustave, gornja glava kod ovih sistema ima prag čija je visina jednaka početnoj denivelaciji  $p = H_p$ .

## 1.3 Hidraulički proračun punjenja komore

### 1.3.1 Koeficijent protoka sistema

Ovaj koeficijent je definisan izrazom:

$$C_Q(t) = \frac{1}{\sqrt{\xi_s + \xi_z(t)}} \quad (1.4)$$

gde je  $\xi_s$  - koeficijent otpora sistema pri potpuno otvorenom zatvaraču, a  $\xi_z(t)$  - koeficijent otpora na zatvaraču.

Koeficijent sistema  $\xi_s$  obuhvata ove gubitke:

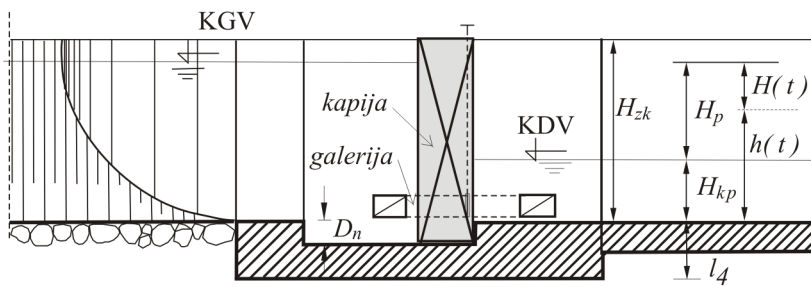
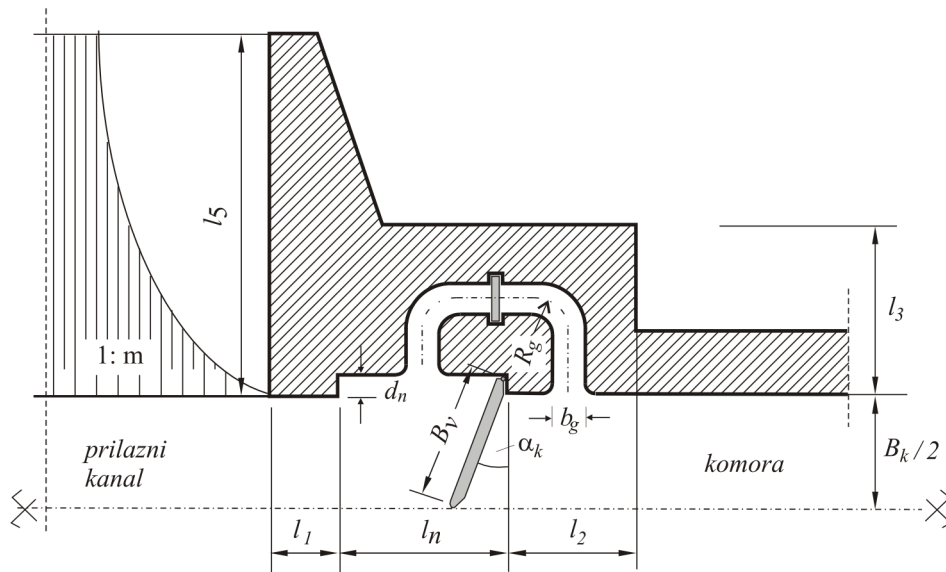
(1) Ulaz:  $\xi_{ul} = 0.25 - 0.50$ .

(2) Rešetka:  $\xi_r = \beta \cdot \sin \alpha_r (d_r/b_r)^{4/3}$ , gde je  $\beta$  - koeficijent oblika šipki (2.42),  $\alpha_r$  - ugao nagiba rešetke ( $90^\circ$ ),  $d_r$  - prečnik šipki (0.03 m),  $b_r$  - razmak šipki (0.20 m).

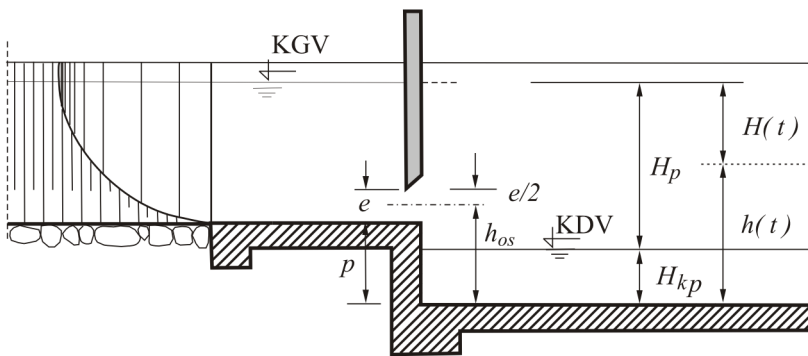
(3) Linijski gubici (trenje):  $\xi_t = \lambda \cdot L/(4R)$ , gde je  $\lambda$  - koeficijent trenja,  $L$  - dužina galerije po osovini [m],  $R$  - hidraulički radijus galerije [m]. Veza koeficijenta  $\lambda$  i Manningovog koeficijenta  $n$  je:  $\lambda = 125 n^2(4R)^{-1/3}$ , gde je za beton:  $n = 0.013-0.014 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ .

(4) Krivina:  $\xi_k = 0.124 + 3.1 [b_g/(2R_g)]^{3.5}$ , gde je  $b_g$  - širina galerije (pravougaoni presek), a  $R_g$  - poluprečnik krivine čiji je centralni ugao  $90^\circ$ .

(5) Izlaz:  $\xi_{iz} = 1.0$  (potopljeno isticanje).



(a)



(b)

Slika 1.1: Shematski prikaz gornje glave prevodnice sa čeonim sistemom punjenja: (a) isticanjem kroz kratke galerije i (b) isticanjem ispod ustave

Suma gubitaka u sistemu koji se ne menjaju po vremenu:

$$\xi_s = \xi_{ul} + 2\xi_r + 2\xi_k + \xi_t + \xi_{iz}. \quad (1.5)$$

Zavisnost  $\xi_z(t)$  se određuje na osnovu usvojenog zakona otvaranja zatvarača  $n_o(t)$  i zavisnosti  $\xi_z(n_o)$ , gde je  $n_o$  - stepen otvorenosti zatvarača. Za tablaste zatvarače se mogu koristiti vrednosti iz tabele 1.1.

Tabela 1.1: Vrednosti koeficijenta lokalnog gubitka na tablastom zatvaraču

$n_o$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\xi_z$	193.25	44.75	18.05	8.37	4.27	2.23	1.10	0.64	0.34	0.25

### 1.3.2 Numerički model

Ovaj model čine jednačina održanja mase:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q(t)}{\Omega_{kp}} = F(t) \quad (1.6)$$

i početni uslov:  $h(0) = H_{kp}$ .

Oblik funkcije  $F$  zavisi od tipa hidrauličkog sistema punjenja/praznjenja.

(a) Sistem sa kratkim galerijama:

$$\begin{aligned} F &= C \cdot C_Q (H_o - h)^{1/2} \quad (\text{potopljeno isticanje}) \\ C &= 2A_g \sqrt{2g} / \Omega_{kp} \end{aligned} \quad (1.7)$$

(b) Sistem isticanja ispod ustave:

$$F = \begin{cases} C \cdot e \cdot (H_o - p - e/2)^{1/2} & \text{za } h < h_{os} \quad (\text{nepotop. isticanje}) \\ C \cdot e \cdot (H_o - h)^{1/2} & \text{za } h \geq h_{os} \quad (\text{potopljeno isticanje}) \end{cases} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} C &= C_Q \cdot B_{kp} \cdot \sqrt{2g} / \Omega_{kp} = C_Q \cdot \sqrt{2g} / L_{kp} \\ h_{os} &= p + e/2, \end{aligned}$$

gde je  $H_o = H_p + H_{kp}$ ,  $h$  - trenutna dubina u komori,  $Q$  - trenutni protok,  $A_g$  - površina preseka galerije,  $\Omega_{kp} = B_{kp} \cdot L_{kp}$  - površina vodenog ogledala u komori<sup>1</sup>,  $p$  - visina praga,  $e$  - trenutna visina isticajnog otvora ispod ustave,  $h_{os}$  - trenutni položaj osovine otvora.

<sup>1</sup>Kod sistema isticanja ispod ustave, dužina  $L_{kp}$  obuhvata i komoru za umirenje neposredno iza praga.

Za numeričko rešavanje obične diferencijalne jednačine prvog reda (1.6), sa odgovarajućim početnim uslovima, može se koristiti poboljšana Ojlerova metoda, prema algoritmu:

- |     |  |  |
|-----|--|--|
| 1.  | u datom trenutku poznata je dubina:        | $t_i : h_i$                                      |
| 2.  | računanje vrednosti funkcije $F$ :         | $F_i = F(h_i)$                                   |
| 3.  | prelazak na novi vremenski trenutak:       | $t_{i+1} = t_i + \Delta t$                       |
| 4.  | računanje nove dubine ("prediktor"):       | $h'_{i+1} = h_i + F_i \Delta t$                  |
| 5.  | računanje nove vrednosti funkcije $F$ :    | $F'_{i+1} = F(h'_{i+1})$                         |
| 6.  | računanje srednje vrednosti funkcije $F$ : | $\bar{F} = (F_i + F'_{i+1})/2$                   |
| 7.  | računanje priraštaja dubine:               | $\Delta h = \bar{F} \Delta t$                    |
| 8.  | korigovanje vrednosti dubine ("korektor"): | $h_{i+1} = h_i + \Delta h$                       |
| 9.  | provera da li je punjenje završeno:        | $ h_{i+1} - H_o  \leq \epsilon = 1 \text{ mm}$   |
| 10. | ako je punjenje završeno:                  | $\rightarrow$ kraj                               |
| 11. | ako punjenje nije završeno:                | $t_i \leftarrow t_{i+1}; h_i \leftarrow h_{i+1}$ |
| 12. | povratak na korak 2                        |  |

Napomena: U toku proračuna se u koraku 4 ispituje uslov:  $h' > H_o$ ; svaki put kada je taj uslov ispunjen, vremenski korak se prepolovi kako se u izrazu  $F$  ne bi javio koren negativnog broja.

■ **Primer 1.1.** Obaviti proračun punjenja prevodnice sa čela, kroz kratke galerije, ako su poznati sledeći podaci:

- dimenzije komore: 180/13/2.8 m, početna denivelacija:  $H_p=5$  m;
- površina preseka obe galerije:  $2A_g=6.4 \text{ m}^2$ ;
- vrednost zbira konstantnih koeficijenata gubitaka u sistemu:  $\xi_s=4.53$ ;
- zatvarač tablasti, zakon otvaranja linearan:  $t_z=630$  s; korak  $\Delta t=63$  s;
- dva čeonno spojena plovila u komori, nosivost plovila  $G_{pl}=1000$  t, širina  $B_{pl}=12$  m, maksimalni gaz  $h_g=2.2$  m.

**Rešenje:**

Rezultati, dati u tabeli 1.2, prikazani su na slici 1.2.

■ **Primer 1.2.** Obaviti proračun punjenja prevodnice sa čela, isticanjem ispod kapije, ako su poznati sledeći podaci:

- dimenzije komore: 75/13.5/2.6; m
- početna denivelacija  $H_p=7$  m, visina praga  $p=7$  m;
- koeficijent isticanja  $C_Q=0.61$ ;
- zakon podizanja kapije-ustave linearan,  $t_z=270$  s; korak  $\Delta t=45$  s;
- maksimalna visina isticajnog otvora ispod ustave  $e=0.756$  m;
- nosivost plovila  $G_{pl}=1000$  t, širina  $B_{pl}=10$  m, maksimalni gaz  $h_g=2.1$  m.

**Rešenje:**

Rezultati, dati u tabeli 1.3, prikazani su na slici 1.3.

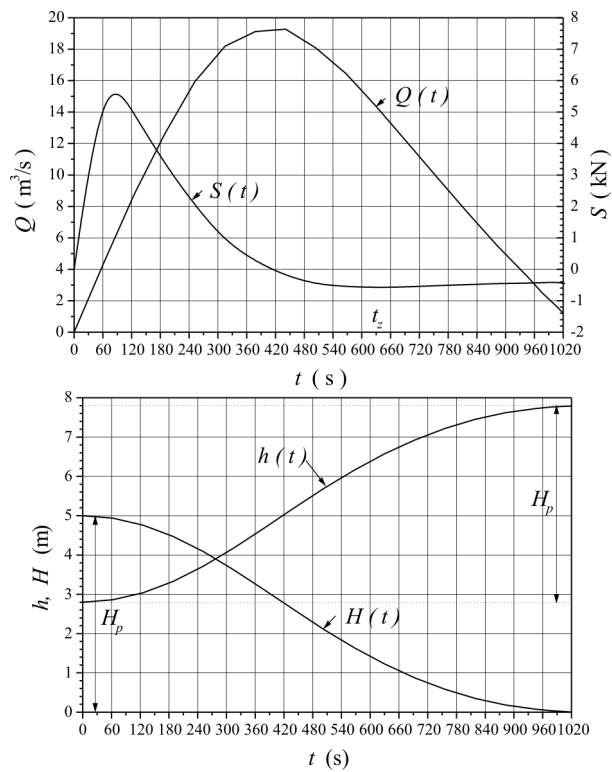


Tabela 1.3: Proračun punjenja komore isticanjem ispod kapije

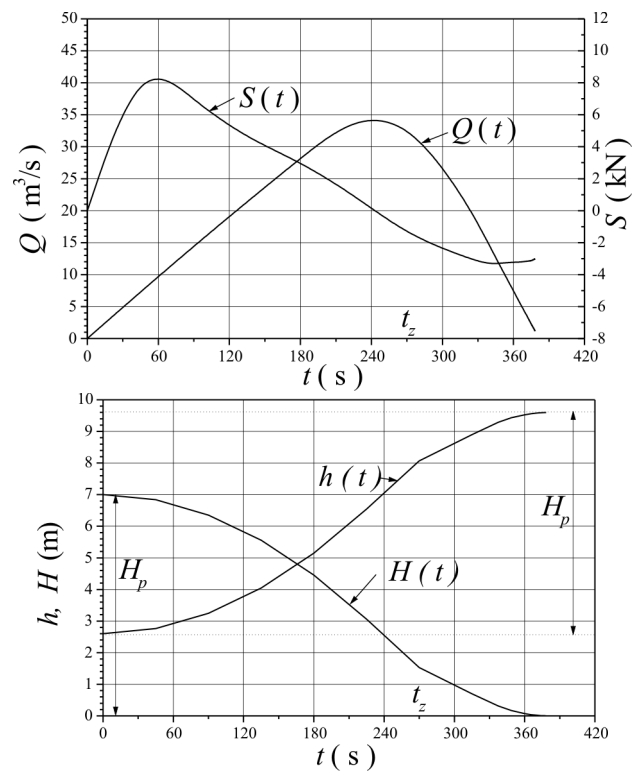
$i$	$t$ [s]	$e$ [m]	$e/2$ [m]	$h_{os}$ [m]
1	45.00	0.13	0.06	7.063
2	90.00	0.25	0.13	7.126
3	135.00	0.38	0.19	7.189
4	180.00	0.50	0.25	7.252
5	225.00	0.63	0.31	7.315
6	270.00	0.76	0.38	7.378

$i$	$t_i$ [s]	$h_i$ [m]	$F_i$ [m/s]	$Q_i$ [m <sup>3</sup> /s]	$dt$ [s]	$t_{i+1}$ [s]	$h'_{i+1}$ [m]	$F'_{i+1}$ [m/s]	$dh$ [m]
0	0.00	2.600	0.0000	0.000	45.00	45.00	2.600	0.0072	0.163
1	45.00	2.763	0.0072	7.321	45.00	90.00	3.088	0.0143	0.484
2	90.00	3.247	0.0143	14.460	45.00	135.00	3.889	0.0211	0.797
3	135.00	4.044	0.0211	21.412	45.00	180.00	4.996	0.0278	1.102
4	180.00	5.146	0.0278	28.174	45.00	225.00	6.398	0.0343	1.398
5	225.00	6.544	0.0343	34.742	45.00	270.00	8.088	0.0335	1.526
6	270.00	8.070	0.0337	34.119	45.00	315.00	9.586	0.0032	0.831
7	315.00	8.900	0.0228	23.069	22.50	337.50	9.413	0.0118	0.389
8	337.50	9.289	0.0152	15.376	11.25	348.75	9.460	0.0102	0.143
9	348.75	9.432	0.0112	11.306	11.25	360.00	9.558	0.0056	0.094
10	360.00	9.526	0.0074	7.486	5.63	365.63	9.568	0.0049	0.035
11	365.63	9.561	0.0054	5.458	5.63	371.25	9.591	0.0026	0.022
12	371.25	9.583	0.0035	3.575	2.81	374.06	9.593	0.0023	0.008
13	374.06	9.591	0.0025	2.566	2.81	376.88	9.598	0.0011	0.005
14	376.88	9.596	0.0016	1.654	1.41	378.28	9.599	0.0010	0.002
15	378.28	9.598	0.0011	1.156	1.41	379.69	9.600	0.0003	0.001

$t$ [s]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$S$ [kN]	$h$ [m]	$dh/dt$ [m/min]	$H$ [m]
0.0	0.000	0.000	2.600	0.000	7.000
45.0	7.321	9.859	2.763	0.217	6.837
90.0	14.460	6.857	3.247	0.645	6.353
135.0	21.412	4.536	4.044	1.063	5.556
180.0	28.174	3.056	5.146	1.469	4.454
225.0	34.742	0.981	6.544	1.864	3.056
270.0	34.119	-1.475	8.070	2.034	1.530
315.0	23.069	-2.800	8.900	1.108	0.700
337.5	15.376	-3.338	9.289	1.037	0.311
348.8	11.306	-3.297	9.432	0.761	0.168
360.0	7.486	-3.221	9.526	0.503	0.074
365.6	5.458	-3.218	9.561	0.368	0.039
371.3	3.575	-3.162	9.583	0.239	0.017
374.1	2.566	-3.148	9.591	0.174	0.009
376.9	1.654	-3.079	9.596	0.108	0.004
378.3	1.156	0.000	9.598	0.078	0.002



Slika 1.2: Punjenje komore kroz kratke galerije



Slika 1.3: Punjenje komore isticanjem ispod ustave

## 1.4 Intenzitet sila u pričvrstnim užadima

Primenjuje se izraz:

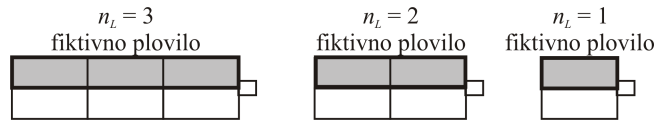
$$S_1(t) = \frac{dQ}{dt} \frac{G_{pl}}{A_{kp} - A_{pl}} \quad [\text{kN}], \quad (1.9)$$

gde je  $dQ/dt$  - nagib tangente na hidrogram punjenja,  $G_{pl}$  - nosivost plovila [t],  $A_{kp}(t) = B_{kp} \cdot h(t)$  - površina poprečnog preseka komore [ $\text{m}^2$ ],  $A_{pl} = B_{pl} \cdot h_g$  - površina uronjenog dela plovila [ $\text{m}^2$ ]. Izvod se numerički računa primenom centralne razlike:  $dQ/dt \approx (Q_{i+1} - Q_{i-1})/(2\Delta t)$ . Izraz (1.9) važi kada se u komori prevodnice nalazi jedno plovilo.

U slučaju kada se u komori nalazi sastav, intenzitet sile računa se korišćenjem sledećeg izraza:

$$S_{sas}(t) = 0.5 \cdot [S_1(t) + S_{n_L}(t)] \quad (1.10)$$

gde je  $S_1(t)$  sila u užadima kada se u komori nalazi samo jedno plovilo, a  $S_{n_L}(t)$  sila u užadima za fiktivno plovilo koje je predstavljeno jednim redom čeonu spojenih plovila iz tog sastava (slika 1.4). Sila u užadima fiktivnog plovila računa se kao  $S_{n_L}(t) = n_L \cdot S_1(t)$ , gde je  $n_L$  broj čeonu spojenih plovila u jednom redu sastava.



Slika 1.4: Fiktivno plovilo (osenčena površina) kod određivanja sile u užadima sastava

## 1.5 Propusna moć brodske prevodnice

Primenjuje se teorija masovnog opsluživanja, pri čemu se rad prevodnice modelira jednokanalnim sistemom masovnog opsluživanja sa beskonačno mesta u redu čekanja, bez otkaza. Sistem masovnog opsluživanja (SMO) obuhvata ulazni potok brodova i kanale opsluživanja. U ovom sistemu, komora prevodnice predstavlja kanal opsluživanja. Kod prevodnica sa jednom komorom, brodovi se prvođe pomoću jednog kanala. Broj pristiglih brodova ima Poasonovu raspodelu. Vremenski intervali između susednih nailazaka brodova raspodeljeni su po eksponencijalnoj raspodeli. Vreme opsluživanja raspodeljeno je po eksponencijalnoj raspodeli. Proračun se obavlja pomoću izraza datih u Dodatku 2.



■ **Primer 1.3.** Analizirati funkcionisanje brodske prevodnice kao kanala opsluživanja, ako su dati ovi ulazni podaci:

- merodano plovilo je sastav od dve čeono spojene potisnice dunavskog tipa ( $i_{pl} = 2$ );
- nosivost jedne potisnice dunavskog tipa je  $G_{pl} = 1000$  t;
- prosečni mesečni promet  $Q_{mes} = 200000$  t/mes;
- navigacioni period  $T_{nav} = 300$  dana/god;
- broj radnih dana u mesecu  $T_{mes} = 25$  dana;
- prosečno trajanje prevođenja  $\bar{t}_o = 1.5$  sat.

**Rešenje:**

Za usvojenu vremensku jedinicu od jednog dana, biće:

- prosečno (ili srednje) vreme između susednih nailazaka brodova:

$$\bar{t}_d = n_{pl} \cdot G_{pl} / (Q_{mes} / T_{mes}) = 2000 / 200000 / 25 = 0.25 \text{ dan}$$

- prosečan broj merodavnih plovila prispelih u jedinici vremena:

$$\lambda = 1 / \bar{t}_d = 1 / 0.25 = 4 \text{ [1/dan]}$$

- prosečno (ili srednje) vreme opsluživanja (prevođenja):

$$\bar{t}_o = 1.5 \text{ h} = 0.063 \text{ dan}$$

- prosečan broj opsluženih merodavnih plovila u jedinici vremena:

$$\mu = 1 / \bar{t}_o = 1 / 0.063 = 16 \text{ [1/dan]}$$

- faktor opterećenja sistema:

$$\rho = \lambda / \mu = 4 / 16 = 0.25$$

- faktor opterećenja kanala opsluživanja:

$$\alpha = \rho / n = 0.25 < 1$$

- verovatnoća da je u trenutku nailaska merodavnog plovila prevodnica slobodna:

$$P_o = [1 + 0.25 + 0.25 (0.25 / (1 - 0.25))]^{-1} = 0.75 \text{ (75\%)}$$

- verovatnoća da je u trenutku nailaska merodavnog plovila prevodnica zauzeta:

$$P_z = 0.25 \cdot 0.75 \cdot (1 - 0.25)^{-1} = 0.25 \text{ (25\%)}$$

- srednji broj merodavnih plovila u redu čekanja na prevođenje:

$$-0.1 \bar{k}_r = 0.25 \cdot 0.75 \cdot 0.25 \cdot (1 - 0.25)^{-2} = 0.083$$

- srednje vreme čekanja:

$$\bar{t}_r = k_r / \lambda = 0.083 / 4 = 0.021 \text{ dan (0.5 sati)}$$

- srednji broj merodavnih plovila u sistemu (u prevodnici i u redu čekanja):

$$\bar{k} = \bar{k}_r + \rho = 0.083 + 0.25 = 0.33$$

- srednje trajanje boravka merodavnog plovila u sistemu:

$$\bar{t}_s = \bar{k} / \lambda = 0.33 / 4 = 0.083 \text{ dana } (\approx 2 \text{ sata})$$

- srednja propusna moć prevodnice:

$$\bar{Q}_{pr} = (T_{nav} / \bar{t}_s) \cdot i_{pl} \cdot G_{pl} = (300 / 0.083) \cdot 2 \cdot 1000 = 7.2 \times 10^6 \text{ t/god.}$$



## 2

# Plovni kanal

Dimenzionisanje plovnog kanala je složen zadatak koji obuhvata niz inženjersko-ekonomskih analiza (robni tokovi i promet, gravitaciono područje, veze sa postojećom infrastrukturom, izbor flote, topografski uslovi, geološki uslovi itd.).

### 2.1 Najmanje dimenzije poprečnog preseka

Najmanje dimenzije poprečnog preseka određuju se na osnovu toga da li je kanal predviđen za jednosmerni ili dvosmerni saobraćaj i na osnovu veličine merodavnog plovila. Na slici 2.1 prikazan je najmanji poprečni presek kanala za dvosmernu plovidbu na pravolinijskoj deonici, kao i proširenje istog kanala u krivini (poluprečnika  $R_k$ ), čija se veličina može izračunati pomoću jednog od ova dva izraza<sup>1</sup>:

$$\Delta B_k = \begin{cases} 2 \left[ R_k - \sqrt{R_k^2 - (L_{mp}/2)^2} \right] \\ 0.35 \cdot L_{mp}^2 / R_k. \end{cases} \quad (2.1)$$

■ **Primer 2.1.** Projektovati najmanji poprečni presek plovnog kanala za dvosmerni saobraćaj sastava dimenzija: 160/10/2.0 m.

**Rešenje:**

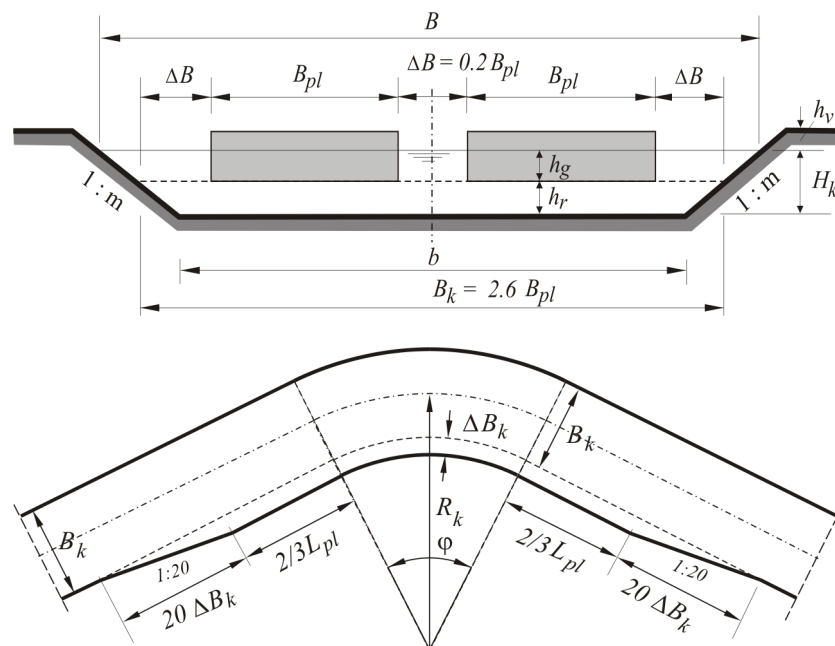
Najmanja širina plovnog kanala na nivou gaza iznosi:

$$B_k = 2.6 \cdot B_{pl} = 2.6 \cdot 10 = 26 \text{ m.}$$

Usvajaju se vrednosti širine  $B_k=32$  m i rezervne dubine  $h_r=1$  m, tako da dubina plovnog kanala bude  $H_k = 3$  m, a širina u dnu  $b=26$  m, pri nagibu kosina 1:3.

---

<sup>1</sup>Dužina merodavnog plovila ( $L_{mp}$ ) je ( $L_{pl}$ ) za samohodno plovilo ili ( $L_{sas}$ ) za sastav.

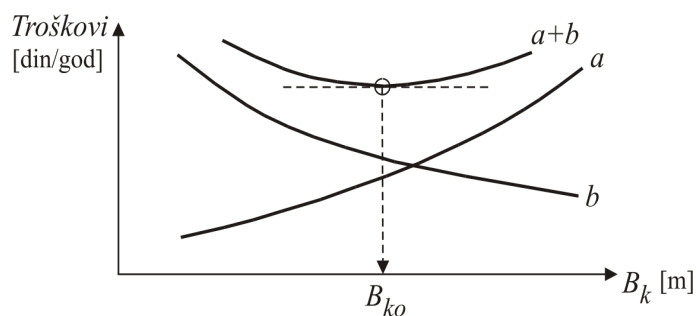


Slika 2.1: Kanal za dvosmerni saobraćaj: minimalne dimenzije i proširenje u krivini

Proširenje u krivini zavisi od širine kanala, dužine plovila/sastava i poluprečnika krivine. Na primer, za poluprečnik  $R_k=1000$  m, prema obrascima (2.1) dobija se  $\Delta B_k=6.41$  m, odnosno 8.96 m, što pokazuje da se rezultati razlikuju za oko 40%.

\* \* \*

Optimalne dimenzije poprečnog preseka određuju se ekonomskom analizom godišnjih troškova kanala i eksploatacionih troškova plovidbe, kao što je prikazano na slici 2.2.

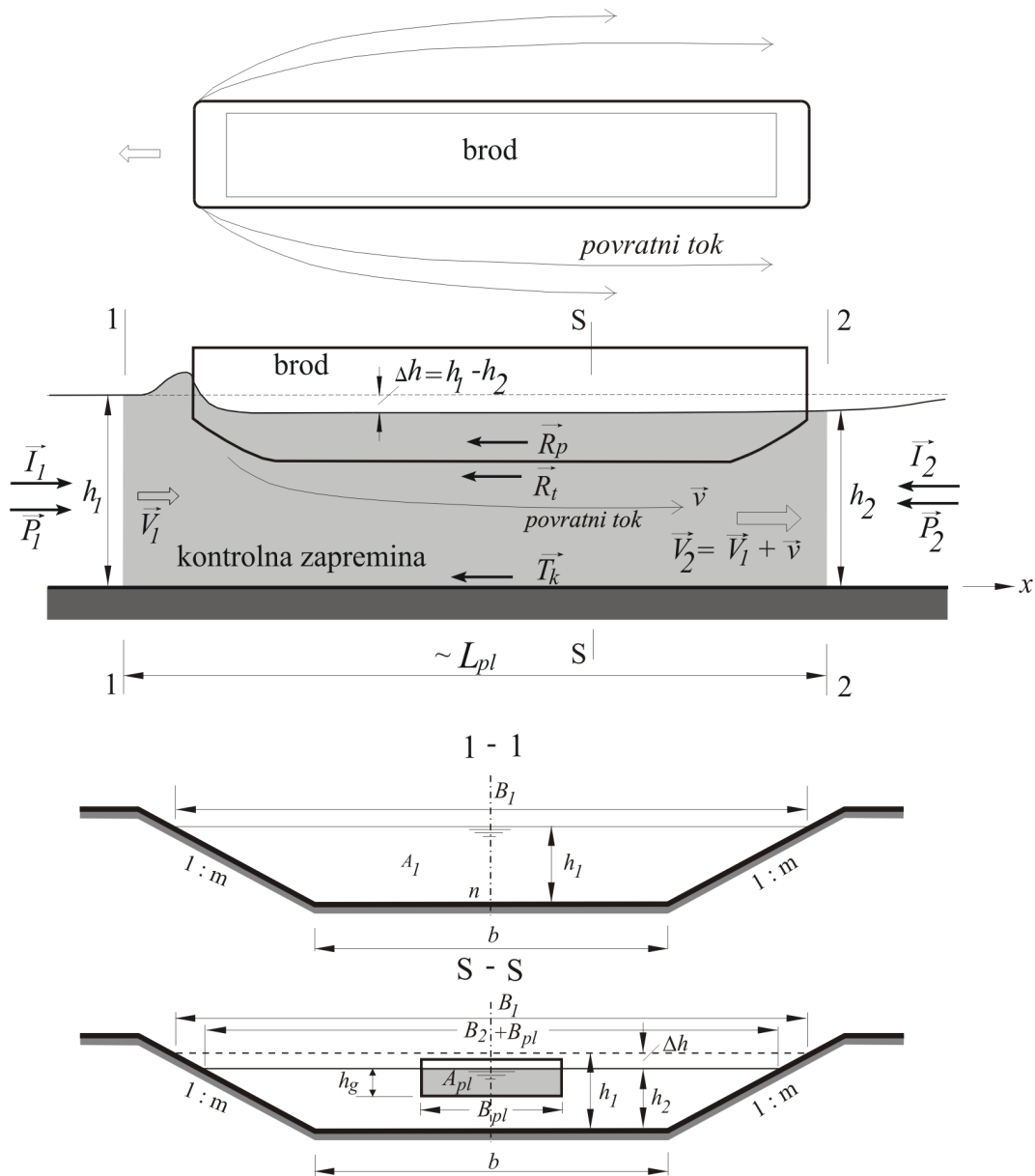


Slika 2.2: Optimalna širina plovnog kanala ( $B_{ko}$ ) zavisi od troškova izgradnje kanala ( $a$ ) i eksploatacionih troškova flote ( $b$ ); ovi drugi obuhvataju troškove goriva, koji su srazmerni pogonskoj snazi broda, odnosno sili otpora.

## 2.2 Otpor broda u plovnom kanalu

Pojam „otpor broda” označava intenzitet sile koja se suprotstavlja kretanju broda. Približno određivanje intenziteta ove sile zasnovano je na nekoliko pretpostavki:

(1) Brod miruje, a voda u kanalu teče brzinom koja je u neporemećenom preseku 1-1 (slika 2.3) jednaka brzini plovidbe:  $V_1 = V_{pl}$ .



Slika 2.3: Kontrolna zapremina i sile u analizi otpora broda

Ukoliko u kanalu već postoji određena brzina toka  $v_o$ , u proračunu se koristi relativna brzina:

$$V_1 = \begin{cases} V_{pl} + v_o & - \text{ uzvodna plovidba;} \\ V_{pl} - v_o & - \text{ nizvodna plovidba;} \end{cases} \quad (2.2)$$

- (2) Kanal je prizmatičan, a tečenje ustaljeno, jednoliko;  
 (3) Uzdužna osovina sastava poklapa se sa uzdužnom osovinom kanala;  
 (4) Poremećaj nivoa u zoni broda/sastava aproksimira se kao na slici 2.3, pri čemu je sniženje nivoa  $\Delta h = \text{const}$ .

### 2.2.1 Ulazni podaci

- (a) Kanal: širina u dnu  $b$ , nagib kosina 1:m, Manningov koeficijent  $n$ , normalna dubina  $h_1$ , osnovna brzina toka  $v_o$ .  
 (b) Brod: dužina  $L_{pl}$ , širina  $B_{pl}$ , gaz  $h_g$ , koeficijent punoće trupa  $\delta$  i nagib pramca  $1 : m_{pl}$ .  
 (c) Brzina plovidbe  $V_{pl} = V_1$ , a ako je  $v_o > 0$ , definiše se i smer plovidbe (uzvodno/nizvodno).

### 2.2.2 Konstantne veličine

- (a) Kanal:  $C_1 = \sqrt{1 + m^2}$ ;  $C_2 = 2g \cdot n^2$ .  
 (b) Brod:  $A_{pl} = B_{pl} \cdot h_g$ ;  $C_m = \sqrt{1 + m_{pl}^2}$ .

- okvašena površina brodske oplata:

$$A_o = \begin{cases} 0.9 \cdot L_{pl} (2h_g + \delta \cdot B_{pl}) & - \text{ samohodni brod} \\ 0.9 (2a_1 + 2a_2 + a_3) & - \text{ simetrina potisnica} \\ 0.9 (a_1 + 2a_2 + a_3 + a_4) & - \text{ asimetrina potisnica,} \end{cases} \quad (2.3)$$

gde su izrazi za parcijalne površine:

Simetrične potisnice:

$$\begin{aligned} a_1 &= B_{pl} h_g C_m \\ a_2 &= h_g (L_{pl} - m_{pl} h_g) \\ a_3 &= B_{pl} (L_{pl} - 2m_{pl} h_g) \end{aligned}$$

Asimetrične potisnice:

$$\begin{aligned} a_1 &= B_{pl} h_g C_m \\ a_2 &= h_g (L_{pl} - 0.5 m_{pl} h_g) \\ a_3 &= B_{pl} (L_{pl} - m_{pl} h_g) \\ a_4 &= B_{pl} \cdot h_g \end{aligned}$$

### 2.2.3 Hidraulički elementi poprečnih preseka

Na osnovu slike 2.3 sledi:

<u>Veličina</u>	<u>Presek 1-1</u>	<u>Presek 2-2</u>
Dubina:	$h_1$	$h_2 = h_1 - \Delta h$
Širina:	$B_1 = b + 2 m h_1$	$B_2 = b + 2 m h_2 - B_{pl}$
Površina:	$A_1 = h_1 (b + m h_1)$	$A_2 = A_1 - A_{pl} - \Delta h (B_1 + B_2 + B_{pl})/2$
Okv. obim:	$O_1 = b + 2 h_1 C_1$	$O_2 = b + 2 h_2 C_1$
Hid. radijus:	$R_1 = A_1/O_1$	$R_2 = A_2/O_2$

Na osnovu navedenih veličina može se izračunati vrednost „koeficijenta plovnosti“  $A_1/A_{pl}$ , kao i koeficijenta trenja za kanal:

$$C_{\tau k} = C_2/R_2^{1/3}. \quad (2.4)$$

### 2.2.4 Brzina povratnog toka

Svojim kretanjem brod izaziva sekundarno strujanje koje se zove „povratno strujanje“ (slika 2.3). Srednja profilska brzina povratnog strujanja dobija se na osnovu jednačine kontinuiteta, napisane za presek 1-1 i bilo koji suženi presek S-S, uključujući presek 2-2:

$$v = V_1 \frac{A_{pl} + \bar{B} \cdot \Delta h}{A_2}, \quad (2.5)$$

gde je  $\bar{B} = 0.5 (B_1 + B_2 + B_{pl})$ . Srednja profilska brzina u suženom preseku iznosi:  $V_2 = V_1 + v$ . Brzina kretanja broda  $V_1$ , brzina povratnog toka  $v$  i sniženje nivoa  $\Delta h$  su uzajamno zavisne veličine; povećanjem brzine  $V_1$ , povećavaju se brzine  $v$  i  $V_2$ , kao i veličina  $\Delta h$ , a smanjuje se dubina  $h_2^2$ .

### 2.2.5 Bilans sila

Primenjujući Dalamberov princip po kojem se uvođenjem sila inercije, dinamički problem može razmatrati kao statički problem, napisaće se jednačina ravnoteže sila koje deluju na fluid unutar posmatrane kontrolne zapremine u pravcu strujanja (slika 2.3):

<sup>2</sup>Teorijski, granični slučaj nastaje kada se dubina  $h_2$  približi kritičnoj dubini, kojoj odgovara kritična brzina  $V_1 = V_{1k}$ . U praksi ovaj slučaj nije moguć, a najveća brzina kojom brod može da se kreće u plovnom putu ograničene dubine i širine (bez obzira na snagu motora) iznosi oko polovine kritične brzine:  $V_1 \approx 0.5 V_{1k}$ .



$$I_1 - I_2 + P_1 - P_2 - T_k - R_t - R_o = 0, \quad (2.6)$$

gde je:

$$I_1 - I_2 = \rho V_1^2 A_1 - \rho V_2^2 A_2 \quad (2.7)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho g b (h_1^2 - h_2^2) + \frac{1}{3} \rho g m (h_1^3 - h_2^3) \quad (2.8)$$

$$T_k = \frac{1}{2} \rho C_{\tau k} O_2 L_{mp} v^2 \quad (2.9)$$

$$R_t = \frac{1}{2} \rho C_{\tau b} A_o V_2^2 \quad (2.10)$$

$$R_o = \frac{1}{2} \rho C_o A_{pl} V_1^2. \quad (2.11)$$

Izraz (2.7) predstavlja zbir sila inercije, a izraz (2.8), zbir sila pritiska. Izrazi (2.9) i (2.10) predstavljaju sile trenja po okvašenoj površini kanala i okvašenom trupu broda, dok izraz (2.11) predstavlja zbir otpora usled razlike pritiska na pramcu i na krmi broda i otpora talasa koje brod stvara svojim kretanjem (otpori oblika).

Navedene sile implicitno sadrže nepoznate veličine  $\Delta h$  i  $v$ , koje se određuju iterativnim rešavanjem sistema jednačina (2.5) i (2.6). Međutim, da bi se ovaj sistem mogao rešavati, neophodno je definisati vrednosti parametara  $C_{\tau k}$ ,  $C_{\tau b}$  i  $C_o$ , o čemu će kasnije biti reči.

### 2.2.6 Pogonska snaga

Neto snaga broda može se približno odrediti pomoću izraza:

$$P_b = \rho \cdot g \cdot V_1 \cdot A_{pl} \cdot \Delta h \quad [\text{kW}], \quad (2.12)$$

koji je formulisan po analogiji sa izrazom za snagu pumpe; veličina  $V_1 \cdot A_{pl}$  predstavlja zamišljeni protok vode koju brod svojim kretanjem potiskuje unazad iz depresije  $\Delta h$ .

Bruto pogonska snaga je:

$$P_{bb} = P_b / \eta_b \quad [\text{kW}], \quad (2.13)$$

gde je  $\eta_b \approx 0.5$  - koeficijent korisnog dejstva brodskog motora i prenosnih komponenti.

### 2.2.7 Ukupan otpor broda. Razdvajanje otpora

Ukupan otpor broda:

$$R_u = \frac{P_b}{V_1} \quad [\text{kN}] \quad (2.14)$$

može se predstaviti kao zbir otpora trenja i otpora oblika:

$$R_u = R_t + R_o. \quad (2.15)$$

### 2.2.8 Podešavanje vrednosti parametara modela

Sistem jednačina (2.6), (2.12), (2.14) i (2.15) čini matematički model otpora broda u plovnom putu ograničene dubine i širine. To je troparametarski model, sa parametrima  $C_{\tau k}$ ,  $C_{\tau b}$  i  $C_o$ .

Vrednost parametra  $C_{\tau k}$  zavisi od rapavosti i elemenata preseka 2-2 i određuje se pomoću izraza (2.4).

Vrednost parametra  $C_{\tau b}$  zavisi od brzine toka  $V_2$  i može se izračunati pomoću empirijskog obrasca ITTC (engl. „International Towing Tank Conference”):

$$C_{\tau b} = 0.075 (\log \text{Re} - 2)^{-2} + \Delta C_{\tau b}, \quad (2.16)$$

gde je  $\text{Re} = V_2 L_{mp} / \nu$  - Reynoldsov broj,  $\nu$  - kinematička viskoznost [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], a  $\Delta C_{\tau b} \approx 0.0007$  - koeficijent dopunskog trenja zbog spojnica na brodskoj oplati.

Kako vrednosti sva tri parametara zavise od nepoznatih veličina u preseku 2-2 (dubine i brzine), mora se primeniti iterativno rešavanje. Početne vrednosti parametara  $C_{\tau k}$  i  $C_{\tau b}$  računaju se na osnovu dubine i brzine u preseku 1-1, a vrednost parametra  $C_o$  se pretpostavlja (na primer  $C_o = 0.3$ ), ili se usvaja na osnovu podataka iz literature. Zatim se u iterativnom procesu istovremeno koriguju vrednosti parametara, sniženja nivoa  $\Delta h$  i svih navedenih sila, sve dok njihov zbir ne bude blizak nuli<sup>3</sup>.

Rezultati proračuna pokazuju da se već nakon 1-2 iteracije, vrednosti parametara  $C_{\tau k}$  i  $C_{\tau b}$  neznatno menjaju, praktično postaju konstantne, tako da ostaje da se podese samo vrednost parametra  $C_o$  i vrednost odgovarajuće sile  $R_o = R_u - R_t$ . Iterativni ciklus (podešavanje vrednosti  $C_o$ ) obustavlja se kada razlika vrednosti sile  $R_o$  u dve uzastopne iteracije postane dovoljno mala ( $\pm 0.1$  kN) i, istovremeno, suma sila postane približno jednaka nuli, što znači da je uslov (2.6) zadovoljen.

<sup>3</sup>U programu MS Excel<sup>©</sup> nelinearna algebarska jednačina rešava se pomoću procedure: „Tools/Goal Seek...”, uz definisanje dozvoljene greške, na primer,  $\pm 1 \times 10^{-3}$ .

■ **Primer 2.2.** Izračunati otpor kretanju sastava iz prethodnog primera. Sastav čine dve čeonu spojene asimetrične potisnice, sa potiskivačem („poluintegrirani sastav”). Dimenzije sastava su: dužina 160 m, širina 10 m, maksimalni gaz 2.0 m. Nagib pramca potisnica je  $m_{pl} = 1$ , a vrednost koeficijenta punoće trupa,  $\delta = 0.85$ .

Kanal je neobložen, sa nagibom kosina 1:3. Brzina vode u kanalu ( $v_o$ ) se može zanemariti. Merodavna brzina plovidbe iznosi  $V_{pl} = V_1 = 6$  km/h. Vrednost Manningovog koeficijenta je  $n = 0.020$  m<sup>-1/3</sup>s, a koeficijenta kinematičke viskoznosti  $\nu = 1.1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

### Rešenje:

Konstantne vrednosti:

(a) Kanal:  $C_1 = \sqrt{1 + m^2} = 3.162$  i  $C_2 = 2gn^2 = 0.00785$ .

U tabeli 2.1 date su vrednosti hidrauličkih parametara preseka 1-1 u kome nema poremećaj usled prisustva broda.

(b) Sastav: površina brodske oplata po kojoj se razvija sila trenja iznosi:  $A_o = 2037.86$  m<sup>2</sup>, a najveća površina poprečnog preseka pod vodom:  $A_{pl} = 20$  m<sup>2</sup>. To znači da je vrednost koeficijenta plovnosti:  $A_1/A_{pl} = 105/20 = 5.25$ .

Konačni rezultati iterativnog proračuna otpora broda dati su u tabeli 2.1.

Tabela 2.1: Proračun otpora broda pri brzini kretanja od 6 km/h

$$\Delta h = \boxed{0.123} \text{ m:}$$

Presek 1-1		Presek 2-2		Brzine / Fr broj		Sile [kN]	
$h_1 =$	3.00 m	$h_2 =$	2.877 m	$v$	= 0.53 m/s	$\Delta I$	= -92.92
$B_1 =$	44.00 m	$B_2 =$	33.26 m	$v + v_o$	= 0.53 m/s	$\Delta P$	= 123.48
$A_1 =$	105.00 m <sup>2</sup>	$A_2 =$	79.63 m <sup>2</sup>	$V_2$	= 2.20 m/s	$T_k$	= 6.43
$O_1 =$	44.97 m	$O_2 =$	44.20 m	$Fr_2$	= 0.41	$R_t$	= 12.17
$R_1 =$	2.33 m	$R_2 =$	1.80 m	$Fr_1$	= 0.31	$R_o$	= 11.97

$$\Delta I + \Delta P - T_k - R_t - R_p = \boxed{-0.0007}$$

$R_2$ m	$C_{\tau k}$ [-]	Re [-]	$C_{\tau b}$ [-]	$C_o$ [-]
1.80	0.0064	$3.196 \times 10^8$	0.00247	0.43

$P_b$ [kW]	$R_u$ [kN]	$R'_o = R_u - R_t$ [kN]	$ R'_o - R_o $ [kN]
40.23	24.14	11.97	0.0101

## 3

# Pristanište

Projektuje se teretno pristanište. Radi pojednostavljenja proračuna, uvode se sledeće pretpostavke:

1. Teret u pristanište dolazi isključivo vodnim putem - brodovima, a odlazi iz pristaništa isključivo kopnenim putem (železnicom).
2. Za pretovar na operativnoj obali koriste se portalne dizalice jednakih nosivosti, pri čemu jedna dizalica opslužuje jedno pretovarno mesto; nije predviđena međusobna ispomoć dizalica.
3. Pretpostavlja se da se istovareni teret u celosti otprema u skladište.
4. U analizi se, kao merodavno, koristi plovilo usvojenih dimenzija i nosivosti.

### 3.1 Matematički model opsluživanja plovila

Dolazak plovila u pristanište razmatra se kao slučajni proces, definisan Poasonovom raspodelom verovatnoće. Pristanište predstavlja višefazni sistem masovnog opsluživanja (SMO). U ovom zadatku razmatraju se dve faze - istovar plovila i uskladištenje tereta. Elementi sistema su: 1) kanal opsluživanja - pretovarno mesto u prvoj, a skladište, u drugoj fazi; 2) jedinica opsluživanja - plovilo u prvoj, i teret u drugoj fazi i 3) red čekanja - sidrište. U datom slučaju, pristanište se može smatrati višekanalnim sistemom masovnog opsluživanja, sa neograničenim redom čekanja, bez otkaza.

#### 3.1.1 Parametri sistema masovnog opsluživanja

Broj plovila koji se može očekivati u pristaništu u toku jednog meseca ( $n_{pl}$ ) određuje se generisanjem slučajnih brojeva po Poasonovoj raspodeli,

za zadatu vrednost parametra raspodele  $\lambda$ . Ovaj parametar, koji se u teoriji masovnog opsluživanja zove „intenzitet toka dolazaka”, predstavlja *prosečan broj* prispelih plovila u jedinici vremena (mesec dana),  $\lambda = \bar{n}_{pl}$  [1/mes]. Nailazak plovila je slučajnog karaktera, jer ona dolaze sa raznih strana, prevaljuju različita odstojanja, a na brzinu plovidbe utiče niz faktora, kao što su vetrovi, magla, niski vodostaji, usputno zadržavanje itd.

Vreme istovara svakog plovila takođe je slučajna promenljiva koja zavisi od nosivosti plovila, vrste tereta, vrste i kapaciteta pretovarne mehanizacije na pretovarnom mestu i drugih okolnosti. Istovar plovila se u matematičkom modelu predstavlja parametrom koji se zove „intenzitet opsluživanja”  $\mu$  [1/mes]. Ovaj parametar predstavlja *prosečan broj* istovarenih plovila u jedinici vremena (mesec dana). Da bi se odredila vrednost ovog parametra, moraju se definisati vrsta i kapacitet pretovarne mehanizacije.

Polazi se od usvajanja bruto nosivosti dizalice  $q_{br}$  [t]. Odgovarajuća neto nosivost  $q_n$  [t] je:

$$q_n = \begin{cases} \rho_z \cdot \forall_g & - \text{rasuti teret;} \\ 0.5 \cdot q_{br} & - \text{komadni teret,} \end{cases} \quad (3.1)$$

gde je  $\rho_z$  - zapreminska masa tereta [t/m<sup>3</sup>],  $\forall_g$  - zapremina zahvatnog uređaja - grabilice [m<sup>3</sup>].

Pri izboru zahvatnog uređaja mora se voditi računa da zbir njegove mase ( $m_g$ ) i mase tereta ( $\rho_z \cdot \forall_g$ ) ne može biti veći od bruto nosivosti dizalice:  $\rho_z \cdot \forall_g + m_g < q_{br}$ . (Podaci o zahvatnim uređajima dati su u dodatku 3).

Prosečan kapacitet dizalice je:

$$Q_{diz} = q_n \frac{3600}{T_c} \eta_{diz} \quad [\text{t/h}], \quad (3.2)$$

gde je  $q_n$  - neto nosivost dizalice [t],  $T_c$  - trajanje radnog ciklusa [s], a  $\eta_{diz}$  - redukcionni koeficijent (0.7-0.9).

Kapacitet dizalice na mesečnom nivou računa se množenjem časovnog kapaciteta (3.2) brojem radnih sati u mesecu:  $T_{dn} \cdot T_{mes}$ , gde je  $T_{dn}$  [h/dan] - broj radnih sati na dan (16, ako se radi u dve smene), a  $T_{mes}$  [dan/mes] - broj radnih dana u mesecu (30).

Ako se ima u vidu pretpostavka da se na svakom pretovarnom mestu nalazi jedna dizalica, prosečan mesečni kapacitet dizalice je istovremeno i prosečan mesečni kapacitet pretovarnog mesta:  $Q_{diz} = Q_{pm}$  [t/mes]. Intenzitet opsluživanja je tada:  $\mu = Q_{pm}/G_{pl}$  [1/mes], gde je  $G_{pl}$  - nosivost plovila [t].

Faktor opterećenja sistema  $\rho = \lambda/\mu$  [-] ukazuje na odnos prosečnog broja prispelih i istovarenih plovila u svakom mesecu.

Parametri sistema masovnog opsluživanja su dakle,  $\lambda$ ,  $\mu$  i  $\rho$ , pri čemu vrednosti parametara  $\lambda$  i  $\mu$  predstavljaju ulazne podatke za analizu stanja sistema.

### 3.1.2 Verovatnoće stanja sistema

Odnos parametra  $\rho$  i broja kanala opsluživanja (pretovarnih mesta):  $\alpha = \rho/n$  zove se „faktor opterećenja kanala opsluživanja” i takođe predstavlja parametar SMO. Verovatnoće stanja sistema određuju se za razne vrednosti parametra  $\alpha$ , pri čemu te vrednosti moraju biti manje od jedan, a njihov zbir (zbir verovatnoća svih stanja) mora biti jednak jedan. (U slučaju kada je  $\alpha > 1$ , sistem ne može da funkcioniše, jer je kapacitet kanala opsluživanja nedovoljan.)

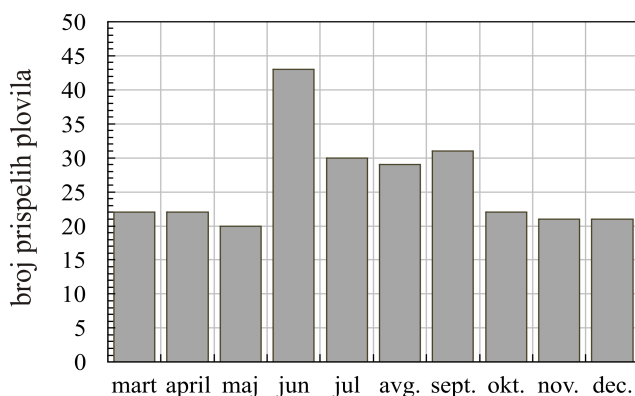
Verovatnoća da su u trenutku nailaska plovila sva pretovarna mesta u pristaništu slobodna  $P_o$ , kao i verovatnoća da su sva zauzeta  $P_z$  (verovatnoća da će postojati red čekanja), mogu se izračunati pomoću izraza datih u dodatku 2. Verovatnoća da plovilo ne čeka u redu, tj. da je bar jedno pretovarno mesto slobodno iznosi:  $P_o^1 = 1 - P_z$ .

Srednji broj plovila u redu čekanja (sidrištu)  $\bar{k}_r$  i srednji broj plovila u sistemu (na istovaru i u redu čekanja)  $\bar{k}$ , kao i srednje vreme zadržavanja u sidrištu  $\bar{t}_r$  i u sistemu  $\bar{t}_s$ , određuju se pomoću izraza datih u dodatku 2.

■ **Primer 3.1.** U tabeli 3.1 i na slici 3.1 dat je prosečan broj plovila prispelih u pristanište po mesecima. Plovilima se dovozi ugalj. Navigacioni period traje 10 meseci godišnje. Nosivost plovila je  $G_{pl} = 950$  t, a njegove dimenzije su:  $L_{pl} = 70$  m,  $B_{pl} = 9.4$  m,  $h_g = 2.2$  m.

Tabela 3.1: Broj dolazaka plovila u pristanište

mesec	mart	april	maj	jun	jul	avg.	sept.	okt.	nov.	dec.
$n_{pl}$	22	22	20	43	30	29	31	22	21	21



Slika 3.1: Slučajan raspored broja prispelih plovila

Ukupan broj plovila prispelih u pristanište u toku navigacionog perioda (10 meseci) je 261, a prosečan broj prispelih plovila u tom periodu je  $\bar{n}_{pl} = 26.1$ . Intenzitet dolazaka plovila je  $\lambda = \bar{n}_{pl} = 26.1$  [1/mes].

Neka se istovar plovila obavlja dizalicama bruto nosivosti 5 t. Trajanje ciklusa ovakve dizalice iznosi  $T_c = 100$  s, a vrednost njenog koeficijenta korisnog dejstva,  $\eta_{diz} = 0.8$ . Pretpostavlja se da se istovar obavlja u tri smene:  $T_{dn} = 24$  sata/dan i da je broj radnih dana u mesecu  $T_{mes} = 30$  dan/mes.

### Rešenje:

U tabeli 3.2 prikazan je proračun časovnog i mesečnog učinka dizalice bruto nosivosti 5 t. Kako svako pretovarno mesto ima jednu dizalicu, prosečni mesečni učinak jedne dizalice istovremeno je i prosečni mesečni kapacitet pretovarnog mesta  $Q_{pm}$ . Iz tabele 3.2 vidi se da je intenzitet opsluživanja  $\mu = Q_{pm}/G_{pl} = 37.107$  [1/mes] i da je faktor opterećenja sistema  $\rho = \lambda/\mu = 0.703$ , što znači da su pretovarna mesta zauzeta u proseku 70.3% vremena.

Na osnovu rezultata iz tabele 3.2 može se zaključiti da za tri pretovarna mesta (tri dizalice) postoji verovatnoća od preko 90% da će bar jedno od ovih mesta biti slobodno u trenutku nailaska plovila, a četiri i više pretovarnih mesta obezbeđuje veliku verovatnoću da plovilo neće čekati na pretovar ( $P_0^1 > 99\%$ ). Takođe se može konstatovati da će u slučaju tri pretovarna mesta, svako biti oko 25% vremena zauzeto ( $\alpha = 0.234$ ).

Izbor broja pretovarnih mesta predstavlja u stvari izbor željene verovatnoće da će plovilo koje dolazi u pristanište odmah biti opsluženo (pretovareno), odnosno finansijskih ulaganja koja su vezana za određenu verovatnoću.

## 3.2 Dužina operativne obale

Dužina operativne obale određuje se pomoću izraza:

$$L_{oo} = n(L_{pl} + \Delta L) \quad [\text{m}], \quad (3.3)$$

gde je  $n$  - broj pretovarnih mesta, a  $\Delta L$  - rezervna dužina (15-20 m).

Dužina operativne obale određuje dužinu kejskog zida u pristaništu.

## 3.3 Određivanje broja pretovarnih mesta i dužine kejskog zida

Izbor najpovoljnije varijante broja pretovarnih mesta (dizalica) i dužine kejskog zida zasniva se na analizi odnosa dobiti i troškova ( $B/C$ ) i određivanju neto dobiti ( $B - C$ ). Radi pojednostavljenja proračuna, pretpostavlja se da vladaju uslovi tržišne ekonomije u kojoj nema inflacije.

Tabela 3.2: Intenzitet i verovatnoća opsluživanja

Kapacitet dizalice i parametri SMO										
$q_{br}$ [t]	$V_g$ [m <sup>3</sup> ]	$\rho_z$ [t/m <sup>3</sup> ]	$q_n$ [t]	$m_g$ [t]	$q_n + m_g$ [t]	$Q_{diz}$ [t/h]	$Q_{diz}$ 10 <sup>3</sup> [t/mes]	$Q_{pm}$ 10 <sup>3</sup> [t/mes]	$\mu$ [1/mes]	$\rho$ [-]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
5	2.00	0.85	1.70	3.15	4.85	49.0	35.3	35.3	37.107	0.703

Verovatnoće stanja sistema									
$n$ [-]	$\alpha$ [-]	$1/n!$ [-]	$P_o$ [-]	$P_z$ [-]	$P_o^1$ [-]	$\bar{k}_r$ [-]	$\bar{t}_r$ [mes]	$\bar{k}$ [-]	$\bar{t}_s$ [mes]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	0.703	1.0000	0.297	0.703	0.297	1.668	0.064	2.371	0.091
2	0.352	0.5000	0.480	0.183	0.817	0.099	0.004	0.803	0.031
3	0.234	0.1667	0.493	0.037	0.963	0.011	0.000	0.715	0.027
4	0.176	0.0417	0.495	0.006	0.994	0.001	0.000	0.705	0.027



Analiza dobiti i troškova sprovodi se *na godišnjem nivou*. Ukupni troškovi predstavljaju zbir troškova poslovanja pretovarne mehanizacije, troškova kejskog zida i bruto plata zaposlenih, a dobit – prihod od pretovara tereta.

### 3.3.1 Troškovi pretovara

**Dizalice.** Troškovi poslovanja:

$$T_d = TE + TM + TAM_d + TIO_d + TOS_d + TAN_d \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.4)$$

obuhvataju pogonske troškove dizalica (energije i maziva)  $TE+TM$ , troškove amortizacije  $TAM_d$ , održavanja  $TIO_d$ , osiguranja  $TOS_d$  i otplate zajma („anuitet“)  $TAN_d$ .

Troškovi energije za pogon dizalica iznose:

$$TE = q_e (n_{cik}/3600) c_e \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.5)$$

gde je  $q_e$  - potrošnja energije po radnom ciklusu [kW] (videti podatke u dodatku 3),  $n_{cik} = \sum n_{pl} \cdot G_{pl}/q_n$  - broj radnih ciklusa u periodu od godinu dana, a  $c_e$  - jedinična cena energije [EUR/kWh]. Troškovi maziva obično se uzimaju procentualno u odnosu na troškove energije:  $TM = 0.1 \cdot TE$ .

Izdvajanja za amortizaciju, održavanje, osiguranje i otplatu zajma zavise od visine investicija za nabavku dizalica:

$$CN = n_{diz} \cdot c_n \quad [\text{EUR}], \quad (3.6)$$

gde je  $n_{diz}$  - broj dizalica u datoj varijanti, a  $c_n$  - cena dizalice [EUR].

Pojedinačni godišnji troškovi su:

- amortizacija:

$$TAM_d = CN \cdot (1 + i_1)^{N_1} \left[ \frac{i_1}{(1 + i_1)^{N_1} - 1} \right] \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.7)$$

gde je  $i_1$  - kamatna stopa, a  $N_1$  - obračunski period;

- investiciono održavanje i osiguranje:

$$TIO_d = p_1 \cdot TAM_d \quad [\text{EUR/god}] \quad (3.8)$$

$$TOS_d = p_2 \cdot TAM_d \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.9)$$

gde je:  $p_1 = p_2 = 10\%$ ;

- anuitet (godišnja rata otplate zajma):

$$TAN_d = CN \cdot (1 + i_o)^{N_1} \left[ \frac{i_o}{(1 + i_o)^{N_1} - 1} \right] \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.10)$$

gde je:  $i_o$  - kamatna stopa.

**Kejski zid.** Troškovi kejskog zida:

$$T_z = TAM_z + TIO_z + TAN_z + TOS_z \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.11)$$

definišu se u odnosu na cenu njegove gradnje:

$$CG = L_{oo} \cdot c_g \quad [\text{EUR}], \quad (3.12)$$

gde je  $L_{oo}$  - dužina operativne obale [m], a  $c_g$  - cena izgradnje [EUR/m].

Pojedinačni godišnji troškovi su:

- amortizacija:

$$TAM_z = CG \cdot (1 + i_2)^{N_2} \left[ \frac{i_2}{(1 + i_2)^{N_2} - 1} \right] \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.13)$$

gde je  $i_2$  - kamatna stopa, a  $N_2$  - obračunski period;

- investiciono održavanje i osiguranje:

$$TIO_z = p_3 \cdot TAM_z \quad [\text{EUR/god}] \quad (3.14)$$

$$TOS_z = p_4 \cdot TAM_z \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.15)$$

gde je:  $p_3 = p_4 = 10\%$ ;

- anuitet (godišnja rata otplate zajma):

$$TAN_z = CG \cdot (1 + i_o)^{N_2} \left[ \frac{i_o}{(1 + i_o)^{N_2} - 1} \right] \quad [\text{EUR/god}]. \quad (3.16)$$

**Bruto plate zaposlenih.** Radi pojednostavljenja proračuna, bruto plate zaposlenih računaju se procentualno u odnosu na zbir prethodno definisanih troškova:

$$TP = p_5 \cdot (T_d + T_z) \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.17)$$

gde je:  $p_5 = 30\%$ .

**Ukupni troškovi.** Ukupni godišnji troškovi dobijaju se sabiranjem troškova pretovarne mehanizacije (dizalica), kejskog zida i bruto plata zaposlenih:

$$C = T_d + T_z + TP \quad [\text{EUR/god}]. \quad (3.18)$$

### 3.3.2 Prihod od pretovara (dobit)

Ekonomska dobit je prihod koji se ostvaruje pretovarom u pristaništu:

$$B = \frac{T_{nav}}{\bar{t}_s} \cdot G_{pl} \cdot c_p \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.19)$$

gde je  $T_{nav}$  - navigacioni period [mes],  $\bar{t}_s$  - srednje vreme boravka plovila u sistemu [mes], a  $c_p$  - jedinična cena pretovara [EUR/t].

### 3.3.3 Vrednovanje varijanti na osnovu dobiti i troškova

Odnos dobiti i troškova ( $B/C$ ) pokazuje koliko se novčanih jedinica dobiti ostvaruje na jednu novčanu jedinicu troškova. Varijanta je prihvatljiva ako je  $B/C > 1$ , a bolja je ona varijanta kod koje je vrednost ovog odnosa veća.

Neto dobit predstavlja razliku dobiti i troškova ( $B - C$ ). Varijanta je prihvatljiva ako je  $B - C > 0$ , a prednost ima varijanta kod koje je ova vrednost veća.

■ **Primer 3.2.** Odrediti najpovoljniju varijantu broja pretovarnih mesta (dizalice) i dužine operativne obale za pristanište iz prethodnog primera, ako su dati sledeći podaci:

- cena nabavke dizalice:  $c_n = 250\,000$  EUR;
- cena električne energije:  $c_e = 0.1$  EUR/kWh;
- cena izgradnje kejskog zida:  $c_g = 1000$  EUR/m;
- cena pretovara:  $c_p = 1.4$  EUR/t;
- obračunski period:  $N_1 = N_2 = 10$  godina;
- godišnja kamatna stopa na uložena sredstva je  $i_1 = i_2 = 2\%$ ;
- godišnja kamatna stopa na pozajmljena sredstva je  $i_o = 12\%$ .

#### Rešenje:

Rezultati proračuna prikazani u tabeli 3.3 pokazuju očekivane tehničke (verovatnoća da će plovilo odmah biti opsluženo  $P_o^1$ ) i finansijske efekte razmatranih varijanti. Najpovoljnija varijanta po oba kriterijuma - odnosa dobiti i troškova  $B/C$  i i neto dobiti  $B - C$ , je varijanta sa dva pretovarna mesta i dve dizalice (slika 3.2).

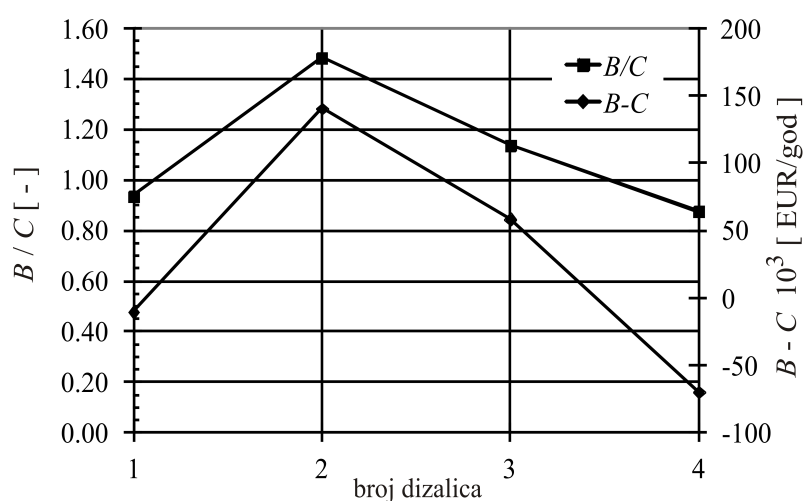
Ako je zahtevana verovatnoća opsluživanja plovila 90%, prihvatljiva varijanta je ona sa tri pretovarna mesta. Međutim, ona nije ekonomski najpovoljnija. Varijanta sa dva pretovarna mesta je (i pored manje verovatnoće  $P_o^1$ ) ekonomski prihvatljivija.

Tabela 3.3: Analiza troškova i dobiti

Mehanizacija								
$n = n_{diz}$ [-]	$CN$ $10^3$ [EUR]	$TE$	$TM$	$TAM_d$	$TIO_d$	$TOS_d$	$TAN_d$	$T_d$
		$10^3$ [EUR/god]						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	250	15.03	1.50	27.83	2.78	2.78	44.25	94.18
2	500	15.03	1.50	55.66	5.57	5.57	88.49	171.84
3	750	15.03	1.50	83.49	8.35	8.35	132.74	249.47
4	1000	15.03	1.50	111.33	11.13	11.13	176.98	327.11

Kejski zid								Plate $TP$
$n$ [-]	$L_{oo}$ [m]	$CG$	$TAM_z$	$TIO_z$	$TOS_z$	$TAN_z$	$T_z$	
		$10^3$ [EUR/god]						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	85	85	9.46	0.95	0.95	15.04	26.40	36.17
2	170	170	18.93	1.89	1.89	30.09	52.80	67.39
3	225	225	28.39	2.84	2.84	45.13	79.20	98.60
4	340	340	37.85	3.79	3.79	60.17	105.60	129.81

Vrednovanje i upoređivanje varijanti					
$n$ [-]	$P_o^1$ [-]	$C$	$B$	$B/C$	$B - C$
		$10^3$ [EUR/god]		[-]	$10^3$ [EUR/god]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.297	156.75	146.39	0.93	-10.36
2	0.817	292.01	432.48	1.48	140.47
3	0.963	427.26	485.61	1.14	58.35
4	0.994	562.52	492.60	0.88	-69.85



Slika 3.2: Analiza dobiti i troškova

### 3.4 Dimenzionisanje skladišta

Dimenzionisanje skladišta takođe se može zasnivati na modelu slučajnog procesa. Intenzitet dolaska tereta u skladište definiše se parametrom  $\lambda$ , a intenzitet opsluživanja, parametrom  $\mu$ . U modelu pristaništa, istovar plovila predstavlja prvu fazu rada, a uskladištenje tereta, drugu fazu. Obe faze podrazumevaju istu vremensku jedinicu (mesec dana).

Imajući u vidu pretpostavku da sav istovareni teret odlazi u skladište, intenzitet dolaska tereta u skladište jednak je intenzitetu dolaska brodova na istovar (vrednost  $\lambda$  ista je u obe faze).

Intenzitet opsluživanja ( $\mu$ ) vezuje se za površinu skladišta. Kanal opsluživanja u ovom slučaju predstavlja određena površina skladišta (modul). Kod rasutih tereta, površina modula  $A_m$  [m<sup>2</sup>] usvaja se vodeći računa o dužini operativne obale.

Prosečna količina rasutog tereta koja se može smestiti na površinu skladišnog modula zavisi od vrste tereta:

$$Q_m = A_m \cdot \Delta_s \quad [t], \quad (3.20)$$

gde je  $\Delta_s$  [t/m<sup>2</sup>] - specifično opterećenje skladišta koje zavisi od vrste tereta (dodatak 3).

Kako se skladište dimenzioniše prema mesečnim količinama tereta, količina definisana izrazom (3.20) predstavlja istovremeno mesečni protok tereta kroz modul skladišta [t/mes].

Intenzitet opsluživanja:  $\mu = Q_m/G_{pl}$  [1/mes] označava prosečan broj plovila čiji se teret može smestiti u modul skladišta svakog meseca.

Parametri skladišnog sistema su dakle,  $\lambda$ ,  $\mu$  i faktor opterećenja  $\rho = \lambda/\mu$ , koji u ovom slučaju predstavlja srednji broj skladišnih modula potreban da se prihvati sav istovareni teret. Faktor opterećenja kanala opsluživanja je:  $\alpha = \rho/n$ , gde je u ovom slučaju  $n$  - broj skladišnih modula. Sa poznatim vrednostima navedenih parametara mogu se odrediti verovatnoće stanja sistema pomoću izraza datih u dodatku 2.

■ **Primer 3.3.** Dimenzionisati skladište iz prethodnih primera, ako je specifično opterećenje za ugalj  $\Delta_s = 2.7$  t/m<sup>2</sup>.

#### Rešenje:

Iz prethodnog primera je intenzitet dolaska tereta u skladište  $\lambda = 26.1$  [1/mes]. Imajući u vidu da je dužina operativne obale za dva pretovarna mesta  $L_{oo} = 170$  m, usvaja se površina skladišnog modula  $A_m = 1350$  m<sup>2</sup>, što približno odgovara površini pravougaonika  $0.8 \cdot L_{oo} \times 10$  m<sup>2</sup>.

Kapacitet skladišnog modula iznosi:  $Q_m = 3645$  t/mes, a odgovarajuće vrednosti parametara su:  $\mu = 3.84$  [1/mes] i  $\rho = 6.80$ . Proračun je prikazan u tabeli 3.4.

Tabela 3.4: Dimenzionisanje skladišta

$n$	$\alpha$	$1/n!$	$P_o$	$P_z$	$P_o^1$	$\bar{k}_r$	$\bar{t}_r$	$\bar{k}$	$\bar{t}_s$
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[mes]	[-]	[mes]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	6.802	1.0000							
⋮	⋮	⋮							
7	0.972	0.0002	0.000	0.917	0.083	31.563	1.209	38.365	1.470
8	0.850	0.0000	0.001	0.573	0.427	3.257	0.125	10.059	0.385
9	0.765	0.0000	0.001	0.341	0.659	1.057	0.040	7.859	0.301
10	0.680	0.0000	0.001	0.193	0.807	0.410	0.016	7.213	0.276
11	0.618	0.0000	0.001	0.103	0.897	0.167	0.006	6.970	0.267
12	0.567	0.0000	0.001	0.052	0.948	0.068	0.003	6.871	0.263

Rezultati pokazuju da skladište sa manje od 7 modula ne obezbeđuje neophodan skladišni prostor ( $\alpha > 1$ ). Za varijante broja skladišnih modula  $n > 7$ , verovatnoća da će teret bez čekanja biti uskladišten kreće se od 8.3% ( $n = 7$ ) do 94.8% ( $n = 12$ ). Ako se usvoji da je verovatnoća da teret neće čekati na skladištenje približno jednaka verovatnoći da plovilo neće čekati u redu na pretovar - faza istovara (81.7%), prihvatljiv broj skladišnih modula je  $n = 10$ , sa ukupnom površinom skladišta  $A_s = 13500$  m<sup>2</sup>. Ovaj izbor je potrebno potvrditi odgovarajućom ekonomskom analizom (kao u prvoj fazi).

### 3.5 Suvozemni transport u pristaništu

Sistem suvozemnog transporta u pristaništu čini mreža železničkih koloseka i saobraćajnica. Železnički koloseci mogu biti obalni i skladišni. Obalni koloseci prolaze ispod portala dizalica ili pored njih. Ovim kolosecima se, nakon istovara, teret železnicom direktno otprema iz pristaništa, bez prolaska kroz skladište. Skladišnim kolosecima se otprema onaj deo tereta koji je izvesno vreme proveo u skladištu. Broj koloseka u oba slučaja najčešće iznosi 1-3. Potreban broj koloseka se može utvrditi pomoću stohastičkog modela koji je sličan onom za određivanje broja pretovarnih mesta i veličine skladišta.

### 3.6 Dimenzionisanje akvatorije pristaništa

Akvatorija pristaništa obuhvata navigacioni deo, operativni deo i sidrište. Kod pristaništa na otvorenoj obali, širina navigacionog dela iznosi (1.5–3.0)  $L_{pl}$  [m], a operativnog dela,  $3.5 \cdot B_{pl}$  [m].

Potrebna dubina akvatorije definiše se u odnosu na kotu male vode:

$$h_a = h_g + h_r \quad [\text{m}], \quad (3.21)$$

gde je  $h_g$  - maksimalni gaz plovila, a  $h_r$  - rezervna dubina, koja se u konkretnom slučaju određuje na osnovu navigacionih uslova, hidrološkog, hidrauličkog i psamološkog režima vodotoka.

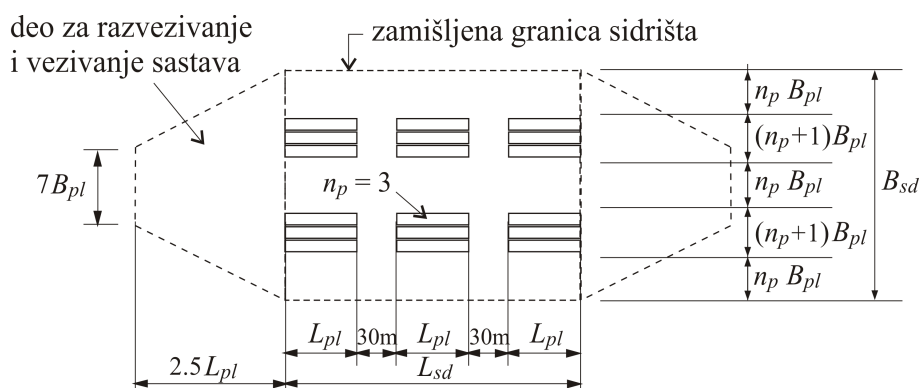
Kota teritorije pristaništa definiše se u odnosu na kotu velike vode:

$$Z_t = Z_{VV} + h_t \quad [\text{mnm}], \quad (3.22)$$

gde je  $h_t$  - rezerva u slučaju pojave talasa.

Kota velike vode vezana je za određenu verovatnoću pojave, odnosno povratni period (recimo, 100 godina).

Sidrište se dimenzioniše na najveći broj plovila u redu čekanja. Usidreni brodovi grupisani su u „pakete” od po 3 ili 4 bočno spojena broda, pri čemu raspored paketa zavisi od konkretnih uslova (pre svega, širine vodotoka). Slika 3.3 prikazuje primer sidrišta sa  $3 \times 2 = 6$  paketa, napravljenih od ukupno 18 usidrenih plovila.



Slika 3.3: Shematski prikaz sidrišta [1]

## Literatura

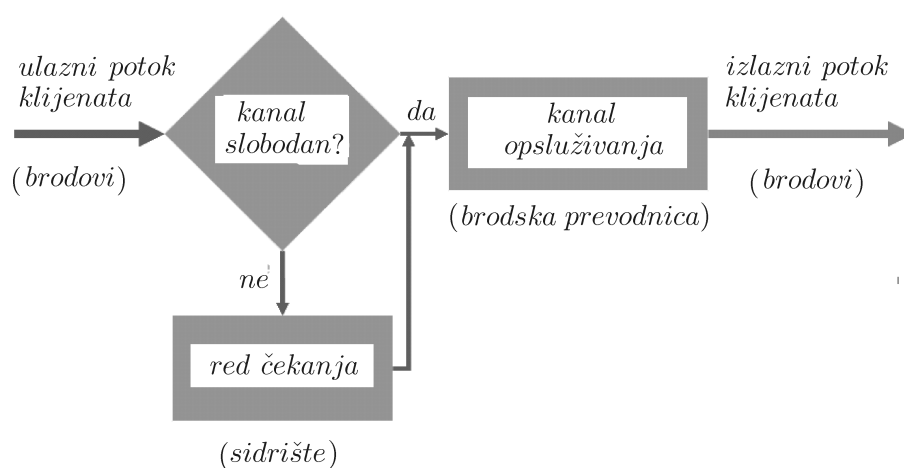
- [1] Čolić, V., (1993) *Eksperimentalna ispitivanja veličine otpora pri plovidbi savremenih brodova dunavske plovne mreže i određivanje najpovoljnijih računskih metoda na osnovu rezultata ispitivanja*, Saobraćajni fakultet Beograd.
- [2] Dehousse, N., (1985) *Les écluses de navigation*, Université de l'Etat á Liège.
- [3] Idelchik, I.E., (1979) *Coefficients de pertes de charge singulières*, Dunod.
- [4] Jovanović, M., (1998) Uticaj intercije na hidraulički režim brodskih prevodnica, *Zbornik radova 12. Savetovanja Jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja*, Subotica.
- [5] Jovanović, M., (2004) Otpor broda u plovnom kanalu, *Vodoprivreda*, 36(209-210), 283-288
- [6] McNown, J.S., (1975) Sinkage and Resistance for Ships in Channels, *Journal of the Waterways and Harbours Division*, ASCE, Vol. 102, No. WW3.
- [7] Mihailov, A.B., (1977) Limitation of Hydraulic Regime and Time of Filling High-Head Ship Lock Chambers by Standard Navigation Regulations Requirements, *Proc. XVII. IAHR Congress*, Baden-Baden.
- [8] Muškatirović, D., (1993) *Unutrašnji plovni putevi i pristaništa*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [9] Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC), (1987) *Final Report of the International Commission for the Study of Locks*, Brussels.
- [10] Radmilović, Z., (1994) *Propusna sposobnost rečnih luka*, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- [11] Radunović D., *Numeričke metode*, Građevinska knjiga, Beograd, 1991.; II (dopunjeno) izdanje: Univerzitet u Beogradu, 1998.; treće (dopunjeno) izdanje: Akademska misao, Beograd, 2004



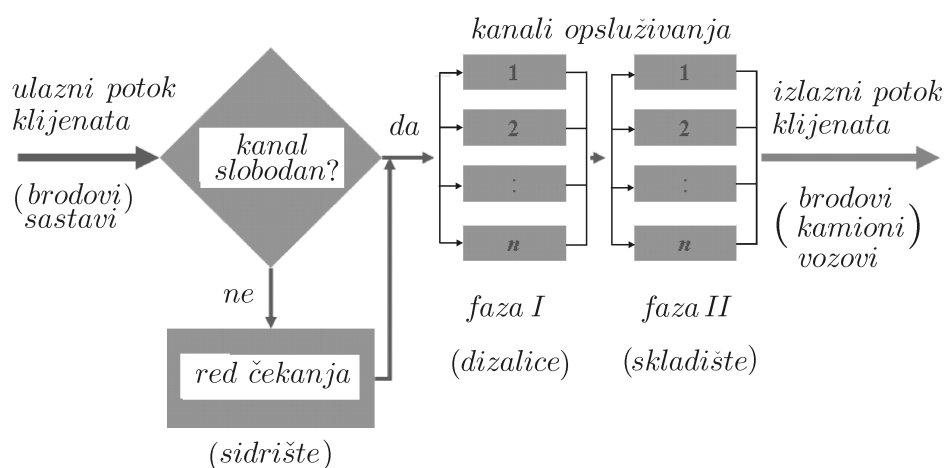


## Dodatak 1

### Shematski prikaz sistema masovnog opsluživanja



Slika 1: Brodska prevodnica: jednofazni, jednogazni SMO sa neograničenim redom čekanja bez otkaza i bez prioriteta opsluživanja ("FIFO – first in, first out" disciplina opsluživanja).



Slika 2: Pristanište: višefazni, višekanalni SMO sa neograničenim redom čekanja bez otkaza, bez medjusobne ispomoći kanala i bez prioriteta opsluživanja.

## Dodatak 2

### Obrasci za proračun opsluživanja višekanalnog sistema sa neograničenim redom čekanja, bez otkaza

#### Parametri sistema

$n$  - broj kanala opsluživanja;

$\lambda$  - intenzitet dolaska klijenata (broj prispelih klijenata u jedinici vremena);

$\mu$  - intenzitet opsluživanja (broj opsluženih klijenata u jedinici vremena);

$\rho = \lambda/\mu$  - faktor opterećenja sistema;

$\alpha = \rho/n$  - faktor opterećenja kanala opsluživanja.

#### Stanje sistema

- Verovatnoća da su svi kanali opsluživanja slobodni:  $P_o = \left( \sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^n}{n!} \frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^{-1}$
- Verovatnoća da su svi kanali opsluživanja zauzeti:  $P_z = \frac{\rho^n}{n!} P_o \frac{1}{1-\alpha}$
- Verovatnoća da je bar jedan kanal opsluživanja slobodan:  $P_o^1 = 1 - P_z$
- Srednji broj jedinica u redu čekanja:  $\bar{k}_r = \frac{\rho^n}{n!} P_o \frac{\alpha}{(1-\alpha)^2}$
- Srednje vreme čekanja:  $\bar{t}_r = \bar{k}_r/\lambda$
- Srednji broj jedinica u sistemu (opsluživanje+čekanje):  $\bar{k} = \bar{k}_r + \rho$
- Srednje vreme boravka u sistemu (opsluživanje+čekanje):  $\bar{t}_s = \bar{k}/\lambda$

**Napomena:** Za proračun verovatnoće  $P_o$  mogu se koristiti dve funkcije programa MS Excel<sup>©</sup>:

- zbir reda: SERIESSUM(  $x, k, m, \mathbf{a}$  ), gde je  $\rho$  - promenljiva,  $k$  - početna vrednost eksponenta,  $m$  - inkrement eksponenta i  $\mathbf{a}$  - lista koeficijena reda;
- faktorijel: FACT(broj).

U datom slučaju, zbir reda:

$$\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} = 1 + \sum_{k=1}^n \frac{\rho^k}{k!} = 1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!}$$

može se ovako računati:  $1 + \text{SERIESSUM}(\rho, 1, 1, a_1 : a_n)$ , gde su koeficijenti reda:  $a_1 = 1/\text{FACT}(1)$ ,  $a_2 = 1/\text{FACT}(2)$ ,  $\dots$ ,  $a_n = 1/\text{FACT}(n)$ .

### Dodatak 3<sup>1</sup>

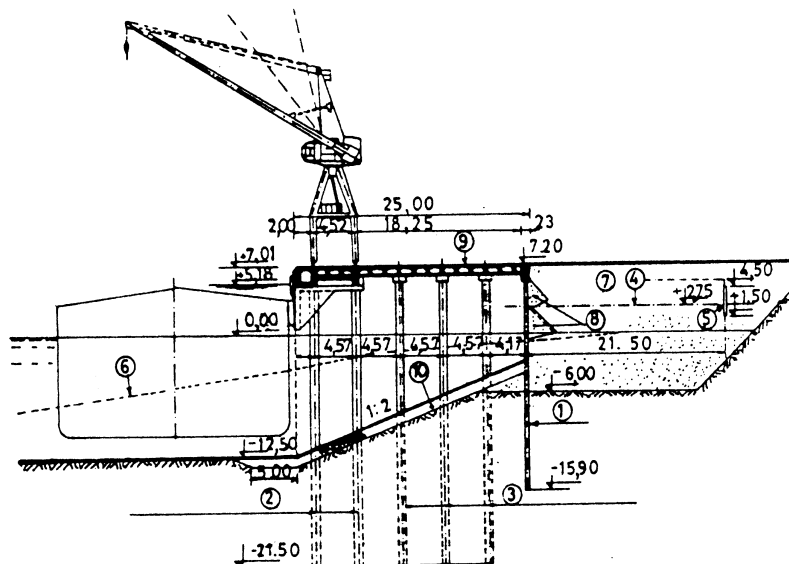
Tip dizalice	Nosivost [t]	Dužina strele [m]	Vrsta operacije i energija				Ukupna energija [kWs]
			Dizanje tereta [kWs]	Okretanje strele [kWs]	Promena dometa [kWs]	Kretanje portala [kWs]	
Portalna	3	25	1350	480	270	200	2300
	3	30	1350	660	270	220	2500
	5	25	2000	1020	510	180	3710
	5	30	2000	1140	570	360	4070
Mostovska	7	11	4000	280	-	225	4505
	7	20	4000	280	-	525	4805

Grabilice		
Zapremina [m <sup>3</sup> ]	Visina [m]	Neto masa [t]
0.77	2.05	1.65
1.13	2.25	2.05
1.54	2.40	2.30
2.00	2.50	3.15
2.48	2.86	4.15

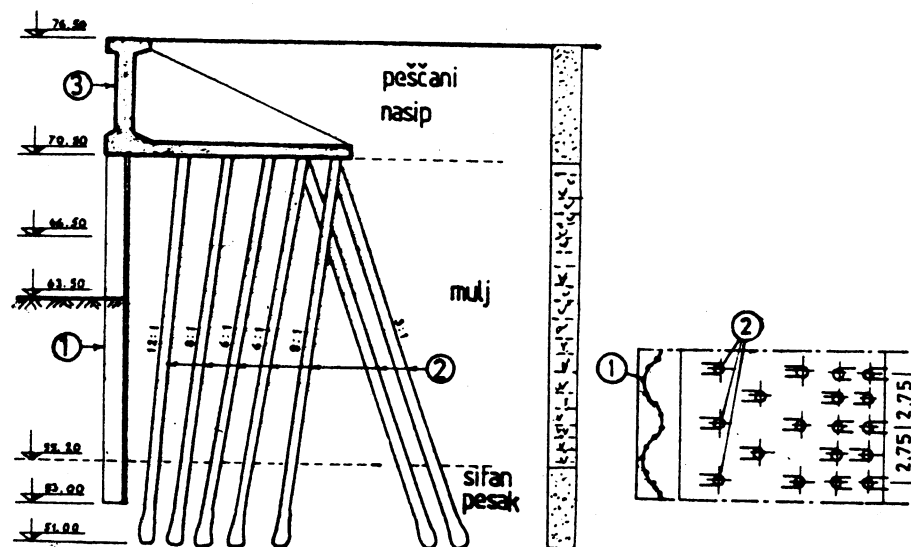
Vrsta tereta	Način pakovanja	Masa paketa [kg]	Visina skladištenja [m]	Zapreminska masa [t/m <sup>3</sup> ]	Specifično opterećenje [t/m <sup>2</sup> ]
Žito	Džak	80	4.5	0.55-0.75	2.5-3.4
Cement	Džak	50	1.6	1.00	1.60
Opeka	-	2.5-3.0	1.2	1.10	1.30
Metali	-	-	1.5-3.0	1.0-5.0	0.5-0.8
Voće	Sanduk	-	1.0-3.0	0.5-0.7	1.5-1.6
Pamuk	Bale	120-200	5.0	0.32-0.38	1.6-1.9
Hartija	Rolne	100-300	2.0	0.4-0.5	1.0
Žito	Rasuto	-	≤4.0	0.4-0.8	1.5-3.5
Pesak	Rasuto	-	9.5-14.0	1.4-2.0	6.5-8.5
Kamen	Rasuto	-	≤3.5	1.6-2.2	≤7.0
Ugalj	Rasuto	-	3.0	0.8-0.9	≤2.7
Gvozdena ruda	Rasuto	-	6.0	1.3	7.8
Boksit	Rasuto	-	≤6.0	1.26	7.6
Ostale rude	Rasuto	-	3.5-5.0	1.5-2.7	7.5
Rezana gradnja	Rasuto	-	≤6.0	0.45-0.65	≤4.0
Oblo drvo	Rasuto	-	≤12.0	0.6	7.2
Ogrevno drvo	Rasuto	-	2.0	0.5-0.6	1.0-1.2

<sup>1</sup>Tabele su preuzete iz [8].

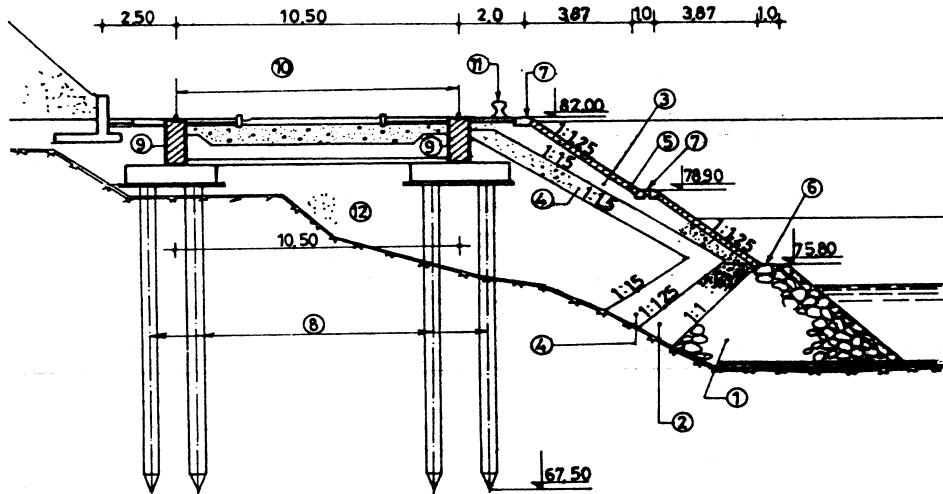
## Dodatak 4



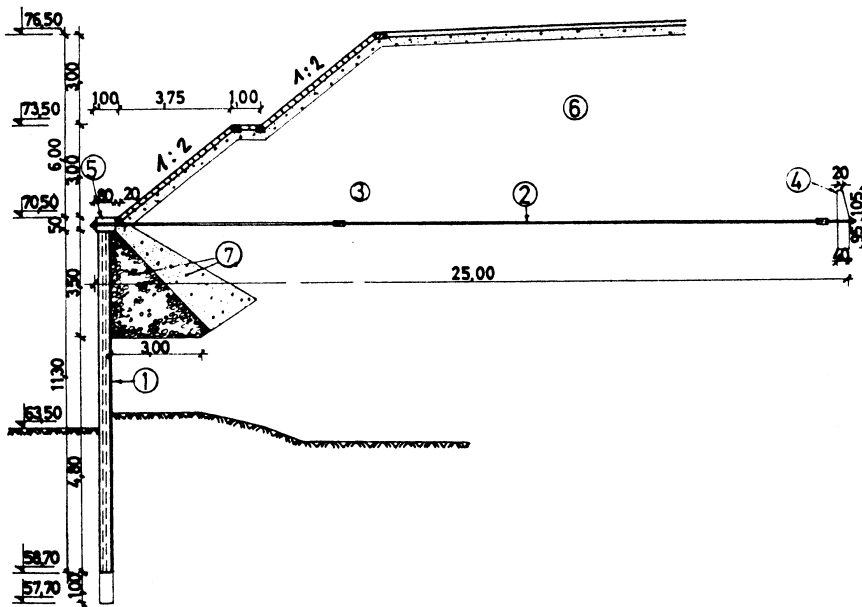
Slika 1: Vertikalna konstrukcija sa pribojem od talpi: 1-čelične talpe; 2-čelični cevasti šipovi  $\varnothing 900$  mm,  $d=16$  mm; 3-čelični cevasti šipovi  $\varnothing 700$  mm,  $d=12.7$  mm; 4-zatega  $\varnothing 80$  mm; 5-ankerni zid od talpi MB35; 6-linija prvobitnog terena; 7-nasip od refuliranog materijala; 8-filtar; 9-platforna od armiranog betona; 10-obloga od kamenog nabačaja [8]



Slika 2: Vertikalni zid u Lucii Beograd: 1-zid od ravnih čeličnih talpi; 2-šipovi tipa „Franki”  $\varnothing 520$  mm; 3-armirano-betonska platforma [8]



Slika 3: Kosa pretovarna obala: 1-nožica od kamenog nabačaja krupnoće 15-20 cm; 2-filtarski sloj od kamene sitneži 1-10 cm; 3-prvi filtarski sloj; 4-drugi filtarski sloj; 5-obloga od betonskih blokova; 6-uporna greda; 7-završna greda; 8-šipovi; 9-kranska staza; 10-kranski kolosek; 11-bitva; 12-nasip od refuliranog peska [8]



Slika 4: Polukosi kejski zid od armirano-betonskih talpi (pristanište u Beogradu): 1-armirano-betonske talpe; 2-čelična zatega; 3-muf; 4-ankerni blok; 5-završna greda; 6-nasip od refulisanog peska; 7-dvoslojni filter [8]