

1

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.).

1.1 Najmanje dimenzije poprečnog preseka

Najmanje dimenzije poprečnog profila određuju se na osnovu toga da li je kanal predviđen za jednosmerni ili dvosmerni saobraćaj i na osnovu veličine merodavnog plovila. Na Slici 1.1 prikazan je najmanji poprečni presek kanala za dvosmernu plovidbu na pravolinijskoj deonici, kao i proširenje istog kanala u krivini, čija se veličina može sračunati pomoću jednog od ovih izraza:

$$\Delta B_k = \begin{cases} 2 \left[R_k - \sqrt{R_k^2 - (L_{pl}/2)^2} \right] \\ 0.35 \cdot L_{pl}^2 / R_k. \end{cases} \quad (1.1)$$

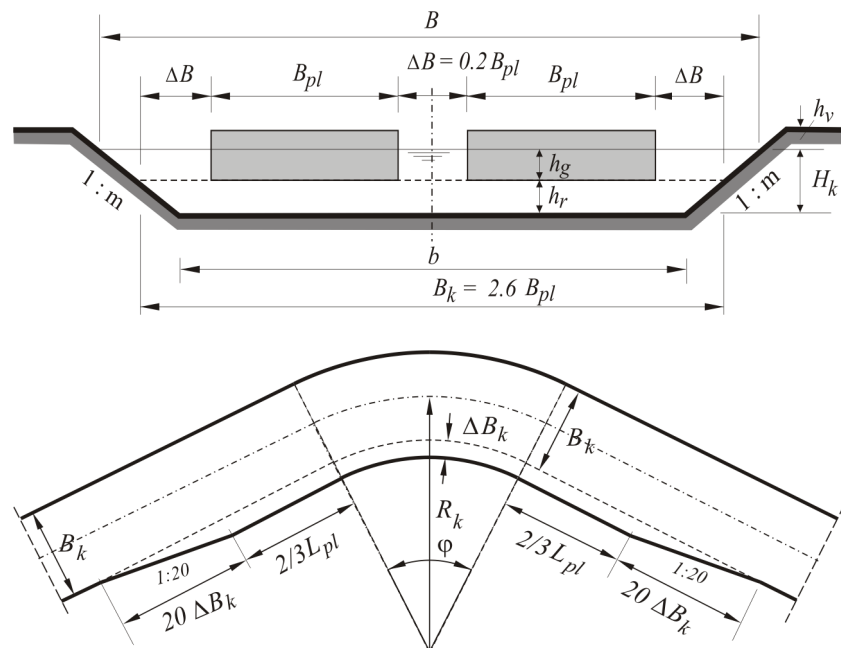
■ **Primer 1.1.** Projektovati najmanji poprečni presek plovnog kanala za dvosmerni saobraćaj sastava dimenzija: 160/10/2.0 m.

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.

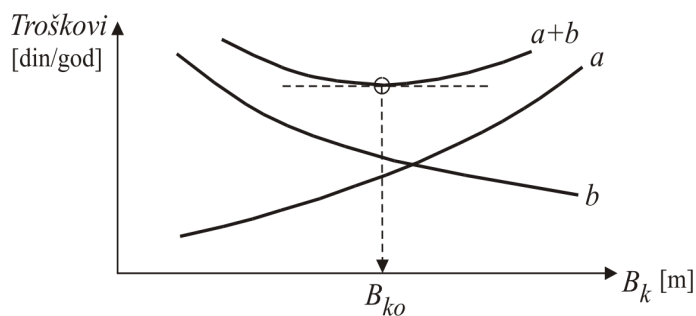


Slika 1.1: Kanal za dvosmerni saobraćaj: minimalne dimenzije i proširenje u krivini

Proširenje u krivini zavisi od širine kanala, dužine plovila/sastava i poluprečnika krivine; na primer, za poluprečnik $R_k=1000$ m, dobija se prema obrascima (1.1) $\Delta B_k=6.41$ 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 1.2.

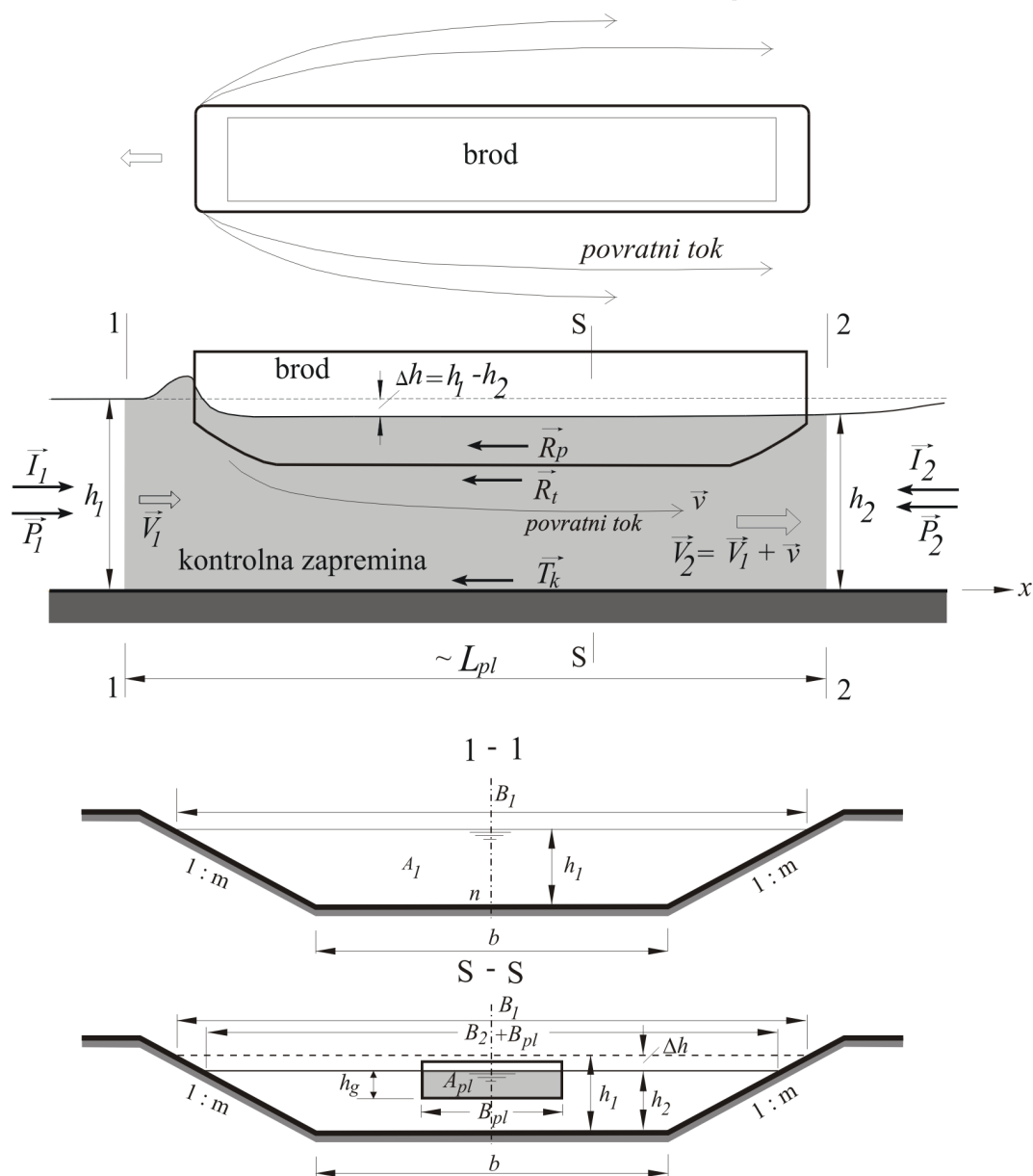


Slika 1.2: Optimalna širina plovnog kanala (B_{ko}) zavisi od troškova izgradnje kanala (a) i eksploatacionih troškova flote (b); ovi drugi obuhvataju troškove goriva, koji su srazmerni pogonskoj snazi broda, odnosno sili otpora.

1.2 Otpor broda u plovnom kanalu

Termin „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 1.3) jednaka brzini plovidbe: $V_1 = V_{pl}$.



Slika 1.3: Kontrolna zapremina i sile u analizi otpora broda

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

$$V_1 = \begin{cases} V_{pl} + v_o & - \text{ uzvodna plovidba;} \\ V_{pl} - v_o & - \text{ nizvodna plovidba;} \end{cases} \quad (1.2)$$

- (2) Kanal je prizmatičan, a tečenje ustaljeno, jednoliko;
- (3) Uzdužna osovina sastava se poklapa sa uzdužnom osovinom kanala;
- (4) Poremećaj nivoa u zoni broda/sastava aproksimira se kao na Slici 1.3, pri čemu je sniženje nivoa $\Delta h = \text{const}$.

1.2.1 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 δ 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).

1.2.2 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 oplate:

$$A_o = \begin{cases} 0.9 \cdot L_{pl} (2 h_g + \delta \cdot B_{pl}) & - \text{ samohodni brod} \\ 0.9 (2 a_1 + 2 a_2 + a_3) & - \text{ simetrična potisnica} \\ 0.9 (a_1 + 2 a_2 + a_3 + a_4) & - \text{ asimetrična potisnica,} \end{cases} \quad (1.3)$$

gde su izrazi za parcijalne površine:

Simetrične potisnice:

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

Asimetrične potisnice:

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

1.2.3 Hidraulički elementi poprečnih preseka

Na osnovu Slike 1.3 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:	$O_1 = b + 2 h_1 C_1$	$O_2 = b + 2 h_2 C_1 + B_{pl} + 2 h_g$
Hid. radijus:	$R_1 = A_1/O_1$	$R_2 = A_2/O_2$

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

$$C_{\tau k} = C_2/R_{2k}^{1/3}, \quad (1.4)$$

gde je $R_{2k} = A_2/(O_2 - B_{pl} - 2 h_g)$.

1.2.4 Brzina povratnog toka

Svojim kretanjem brod izaziva sekundarno strujanje koje se zove „povratno“ (Slika 1.3). Srednja profilaska 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:

$$v = V_1 \frac{A_{pl} + \bar{B} \cdot \Delta h}{A_2}, \quad (1.5)$$

gde je $\bar{B} = 0.5 (B_1 + B_2 + B_{pl})$. Srednja profilaska brzina u suženom preseku iznosi: $V_2 = V_1 + v$. Brzina kretanja broda V_1 , brzina povratnog toka v i sniženje nivoa Δh su uzajamno zavisne veličine; povećanjem brzine V_1 , povećavaju se brzine v i V_2 , kao i veličina Δh , a smanjuje se dubina h_2 ¹.

1.2.5 Bilans sila

Primenjujući D'alamberov princip da se uvođenjem inercijalnih sila, dinamički problem može svesti na statički problem, napisao se jednačina

¹Teorijski, 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: $V_1 \approx 0.5 V_{1k}$.

ravnoteže sila koje deluju na fluid unutar posmatrane kontrolne zapremine u pravcu strujanja (Slika 1.3):

$$I_1 - I_2 + P_1 - P_2 - T_k - R_t - R_o = 0, \quad (1.6)$$

gde je:

$$I_1 - I_2 = \rho V_1^2 A_1 - \rho V_2^2 A_2 \quad (1.7)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho g b (h_1^2 - h_2^2) + \frac{1}{3} \rho g m (h_1^3 - h_2^3) \quad (1.8)$$

$$T_k = \frac{1}{2} \rho C_{\tau k} (O_2 - B_{pl} - 2 h_g) L_{pl} v^2 \quad (1.9)$$

$$R_t = \frac{1}{2} \rho C_{\tau b} A_o V_2^2 \quad (1.10)$$

$$R_o = \frac{1}{2} \rho C_o A_{pl} V_1^2. \quad (1.11)$$

Izraz (1.7) predstavlja zbir inercijalnih sila, a izraz (1.8), zbir sila pritiska. Izrazi (1.9) i (1.10) predstavljaju sile trenja po okvašenoj površini kanala i okvašenom trupu broda, dok izraz (1.11) 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 Δh i v , koje se određuju iterativnim rešavanjem sistema jednačina (1.5) i (1.6). 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.

1.2.6 Pogonska snaga

Neto snaga broda se može približno odrediti pomoću izraza:

$$P_b = \rho \cdot g \cdot V_1 \cdot A_{pl} \cdot \Delta h \quad [\text{kW}], \quad (1.12)$$

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 Δh .

Bruto pogonska snaga je:

$$P_{bb} = P_b / \eta_b \quad [\text{kW}], \quad (1.13)$$

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

1.2.7 Ukupni otpor broda. Razdvajanje otpora

Ukupni otpor broda:

$$R_u = \frac{P_b}{V_1} \quad [\text{kN}] \quad (1.14)$$

može se predstaviti kao zbir otpora trenja i otpora oblika:

$$R_u = R_t + R_o. \quad (1.15)$$

1.2.8 Podešavanje vrednosti parametara modela

Sistem jednačina (1.6), (1.12), (1.14) i (1.15) 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 i određuje se pomoću izraza (1.4).

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

$$C_{\tau b} = 0.075 (\log \text{Re} - 2)^{-2} + \Delta C_{\tau b}, \quad (1.16)$$

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

Kako vrednosti sva tri parametra 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 Δh i svih navedenih sila, sve dok njihov zbir ne bude blizak nuli².

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 koriguje samo vrednost parametra C_o i vrednost odgovarajuće sile $R_o = R_u - R_t$. Iteracioni ciklus (korekcija vrednosti C_o) se obustavlja

²U programu MS Excel[©] rešavanje nelinearne algebarske jednačine se realizuje pomoću procedure:

„Tools/Goal Seek...”, uz definisanje dozvoljene greške, na primer, $\pm 1 \times 10^{-3}$.

kada razlika vrednosti sile R_o u dve sukcesivne iteracije postane dovoljno mala (± 0.1 kN), a istovremeno i suma sila postane približno jednaka nuli, što znači da je uslov (1.6) zadovoljen.

■ **Primer 1.2.** Sračunati otpor kretanju sastava iz prethodnog primera. Sastav je formiran od dve čeonno 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 Maningovog koeficijenta iznosi $n = 0.020$ m^{-1/3}s, a koeficijenta kinematičke viskoznosti $\nu = 1.1 \times 10^{-6}$ m²/s.

Rešenje:

Konstantne vrednosti:

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

U Tabeli 1.1 su date vrednosti hidrauličkih parametara preseka 1-1 u kome se ne oseća poremećaj usled prisustva broda.

(b) Sastav: površina broskog trupa izložena trenju iznosi: $A_o = 2037.86$ m², a najveća površina poprečnog preseka pod vodom je: $A_{pl}=20$ m². 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 1.1.

Tabela 1.1: *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	ΔI	$= -92.92$
$B_1 =$	44.00	m	$B_2 =$	33.26	m	$v + v_o$	$= 0.53$ m/s	ΔP	$= 123.48$
$A_1 =$	105.00	m ²	$A_2 =$	79.63	m ²	V_2	$= 2.20$ m/s	T_k	$= 6.43$
$O_1 =$	44.97	m	$O_2 =$	58.20	m	Fr_2	$= 0.41$	R_t	$= 12.17$
$R_1 =$	2.33	m	$R_2 =$	1.37	m	Fr_1	$= 0.31$	R_o	$= 11.97$

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

R_{2k}	$C_{\tau k}$	Re	$C_{\tau b}$	C_o
m	[-]	[-]	[-]	[-]
1.80	0.0064	3.196×10^8	0.00247	0.43

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

2

Brodska prevodnica

2.1 Dimenzionisanje komore

2.1.1 Dužina

$$L_{kp} = \begin{cases} L_p + \sum_{i=1}^{n_L} (L_{pl})_i + 2\Delta L & \text{-- potiskivani sastav} \\ L_t + \sum_{i=1}^{n_L} (L_{pl})_i + (n_L + 1)\Delta L & \text{-- tegljeni sastav} \end{cases} \quad (2.1)$$

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 merodavnog plovila [m], $\Delta L = 0.015L_{pl} + 1$ - sigurnosni razmak [m].

2.1.2 Širina

$$B_{kp} = (1.08 \div 1.10) \sum_{i=1}^{n_B} B_{pl} \quad (2.2)$$

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

2.1.3 Najmanja dubina

$$H_{kp} = (1.20 \div 1.25) h_g \quad (2.3)$$

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

2.2 Dimenzionisanje gornje glave čeonih sistema

Sistem punjenja kroz kratke galerije prikazan je na Slici 2.1-(a).

Karakteristične dužine: Dimenzije dvokrilne kapije i njene niše:

$$\begin{array}{ll} l_1 \approx 2/3 H_p & d_n \approx 1/10 B_{kp} \\ l_2 \approx H_p (\geq 5 \text{ m}) & D_n \approx (0.5-1.20) \text{ ctg } \alpha_s \\ l_3 \approx 3b_g & B_v = (B_{kp} + 2d_n)/(2\cos \alpha_k) \\ l_4 \approx B_{kp}/8 & l_n \approx (1.10-1.20) B_v \end{array}$$

U navedenim izrazima je α_s - ugao kosine prilaznog kanala, a α_k - ugao kapije u odnosu na vertikalnu ravan ($20-22^\circ$). 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 2.1-(b).

Radi smanjenja visine ustave, gornja glava kod ovih sistema je formirana u obliku praga, čija je visina jednaka početnoj denivelaciji $p = H_p$.

2.3 Hidraulički proračun punjenja komore

2.3.1 Koeficijent protoka sistema

Ovaj koeficijent je definisan izrazom:

$$C_Q(t) = \frac{1}{\sqrt{\xi_s + \xi_z(t)}} \quad (2.4)$$

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

Koeficijent sistema ξ_s obuhvata ove gubitke:

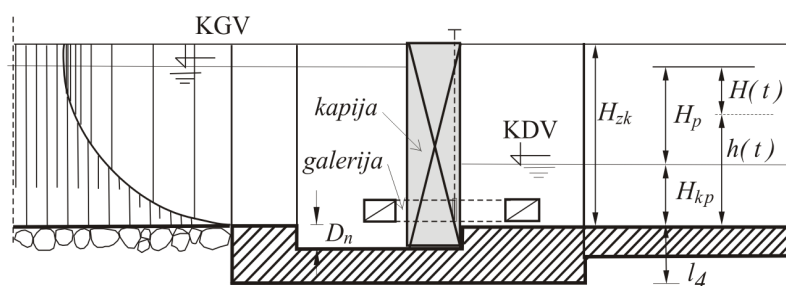
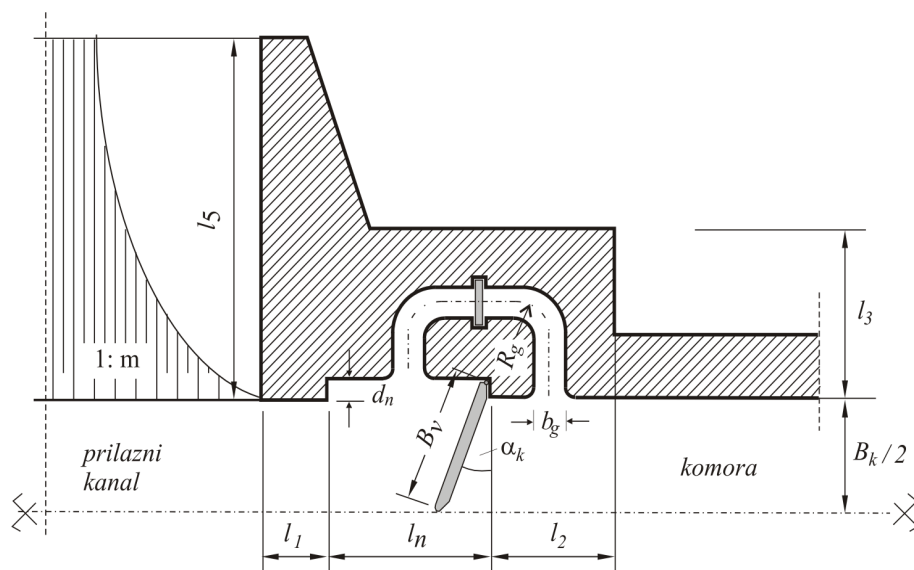
(1) Ulaz: $\xi_{ul} = 0.25 - 0.50$.

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

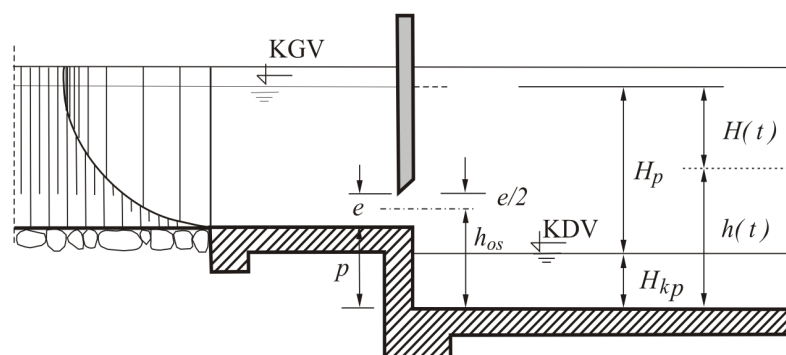
(3) Linijski gubici (trenje): $\xi_t = \lambda \cdot L/(4R)$, gde je λ - koeficijent trenja, L - dužina galerije po osovini [m], R - hidraulički radijus galerije [m]. Veza koeficijenta λ i Manningovog koeficijenta n je: $\lambda = 125 n^2 (4R)^{-1/3}$, gde je za beton: $n = 0.013-0.014 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.

(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° .

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



(a)



(b)

Slika 2.1: 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:

$$\xi_s = \xi_{ul} + 2\xi_r + 2\xi_k + \xi_t + \xi_{iz}. \quad (2.5)$$

Zavisnost $\xi_z(t)$ se odredjuje 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 2.1.

Tabela 2.1: 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
ξ_z	193.25	44.75	18.05	8.37	4.27	2.23	1.10	0.64	0.34	0.25

2.3.2 Numerički model

Ovaj model čine jednačina održanja mase:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q(t)}{\Omega_{kp}} = F(t, h, C) \quad (2.6)$$

i početni uslovi: $h(0) = H_{kp}$, odnosno $Q(0) = 0$.

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

(a) Sistem sa kratkim galerijama:

$$\begin{aligned} F &= C \cdot C_Q (H_o - h)^{1/2} \quad (\text{potopljeno isticanje}) \\ C &= 2A_g \sqrt{2g} / \Omega_{kp} \end{aligned} \quad (2.7)$$

(b) Sistem sa isticanjem ispod ustave:

$$F = \begin{cases} C \cdot e \cdot (H_o - p - e/2)^{1/2} & \text{za } h < h_{os} \quad (\text{nepotop. isticanje}) \\ C \cdot e \cdot (H_o - h)^{1/2} & \text{za } h \geq h_{os} \quad (\text{potopljeno isticanje}) \end{cases} \quad (2.8)$$

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

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 komori¹, p - visina praga, e - trenutna visina isticajnog otvora ispod ustave, h_{os} - trenutni položaj osovine otvora.

¹Kod sistema sa isticanjem ispod ustave, dužina L_{kp} obuhvata i komoru za umirenje neposredno iza praga.

Za numeričko rešavanje obične diferencijalne jednačine prvog reda (2.6), sa odgovarajućim početnim uslovima, može se koristiti poboljšana Ojlerova metoda, prema algoritmu:

- | | | |
|-----|---|--|
| 1. | u datom trenutku poznata je dubina: | $t_i : h_i$ |
| 2. | sračunati vrednost funkcije F : | $F_i = F(h_i)$ |
| 3. | povećati vremensku koordinatu: | $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ |
| 4. | sračunati novu dubinu ("prediktor"): | $h'_{i+1} = h_i + F_i \Delta t$ |
| 5. | sračunati novu vrednost funkcije F : | $F'_{i+1} = F(h'_{i+1})$ |
| 6. | sračunati srednju vrednost funkcije F : | $\bar{F} = (F_i + F'_{i+1})/2$ |
| 7. | sračunati priraštaj dubine: | $\Delta h = \bar{F} \Delta t$ |
| 8. | korigovati vrednost dubine ("korektor"): | $h_{i+1} = h_i + \Delta h$ |
| 9. | ispitati da li je punjenje završeno: | $ h_{i+1} - H_o \leq \epsilon = 1 \text{ mm}$ |
| 10. | ako je punjenje završeno: | $\rightarrow \text{kraj}$ |
| 11. | ako punjenje nije završeno: | $t_i \leftarrow t_{i+1}; h_i \leftarrow h_{i+1}$ |
| 12. | vratiti se 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 polovi kako se u izrazu F ne bi javio koren negativnog broja.

■ **Primer 2.1.** 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;
- nosivost plovila $G_{pl}=1000$ t, širina $B_{pl}=12$ m, maksimalni gaz $h_g=2.2$ m.

Rešenje:

Rezultati, dati u Tabeli 2.2, prikazani su na Slici 2.2.

■ **Primer 2.2.** 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 2.3, prikazani su na Slici 2.3.

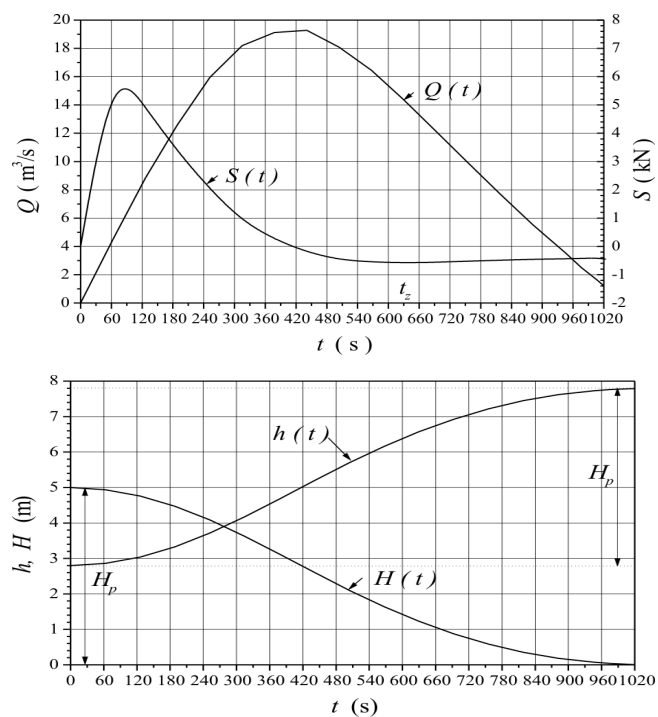
Tabela 2.2: *Proračun punjenja komore kroz kratke galerije*[illegible]

Tabela 2.3: Proračun punjenja komore isticanjem ispod kapije

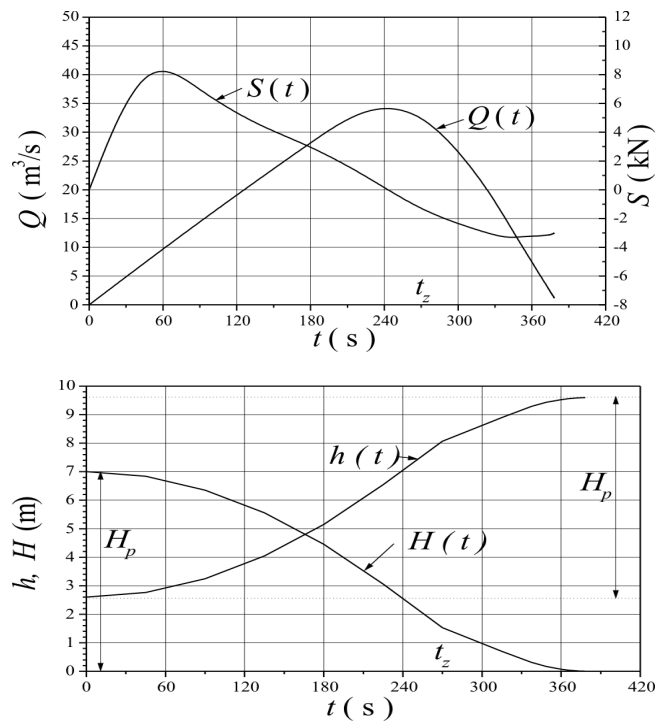
i	t [s]	e [m]	$e/2$ [m]	h_{os} [m]
1	45.00	0.13	0.06	7.063
2	90.00	0.25	0.13	7.126
3	135.00	0.38	0.19	7.189
4	180.00	0.50	0.25	7.252
5	225.00	0.63	0.31	7.315
6	270.00	0.76	0.38	7.378

i	t_i [s]	h_i [m]	F_i [m/s]	Q_i [m ³ /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 ³ /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 2.2: Punjenje komore kroz kratke galerije



Slika 2.3: Punjenje komore isticanjem ispod ustave

2.4 Intenzitet sila u pričvrstnim užadima

Primenjuje se izraz:

$$S(t) = \frac{dQ}{dt} \frac{G_{pl}}{A_{kp} - A_{pl}} \quad [\text{kN}], \quad (2.9)$$

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 [m²], $A_{pl} = B_{pl} \cdot h_g$ - površina uronjenog dela plovila [m²]. Izvod se numerički računa primenom centralne razlike: $dQ/dt \approx (Q_{i+1} - Q_{i-1})/(2\Delta t)$.

2.5 Propusna moć brodske prevodnice

Primenjuje se teorija masovnog opsluživanja, pri čemu prevodnica predstavlja kanal opsluživanja sa beskonačnim redom čekanja, bez otkaza. Raspodela nailazaka brodova je Puasonova, a vremenskih intervala između nailazaka, eksponencijalna. Proračun se obavlja pomoću izraza datih u Dodatku 1.

■ **Primer 2.3.** Analizirati funkcionisanje brodske prevodnice kao kanala opsluživanja, ako su dati ovi ulazni podaci:

- nosivost plovila $G_{pl} = 1000$ t;
- prosečni mesečni promet $Q_{mes} = 100000$ t/mes;
- navigacioni period $T_{nav} = 300$ dana/god;
- broj radnih dana u mesecu $T_{mes} = 25$ dana;
- prosečno trajanje prevodjenja $t_o = 1.5$ sat.

Rešenje:

Za usvojenu vremensku jedinicu od jednog dana, biće:

- vreme dolaska:

$$\bar{t}_d = G_{pl}/(Q_{mes}/T_{mes}) = 1000/100000/25 = 0.25 \text{ dan}$$

- prosečni broj plovila prispelih u jedinici vremena:

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

- vreme opsluživanja (prevodjenja):

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

- prosečni broj opsluženih 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 momentu nailaska broda prevodnica slobodna:

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

- verovatnoća da je u momentu nailaska broda prevodnica zauzeta:

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

- srednji broj plovila u redu čekanja na prevodjenje:

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

- srednje vreme čekanja:

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

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

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

- srednje trajanje boravka plovila u sistemu:

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

- srednji godišnji kapacitet prevodnice:

$$\bar{Q}_{pr} = (T_{nav}/\bar{t}_s) \cdot G_{pl} = (300/0.083)1000 = 3.6 \times 10^6 \text{ t/god.}$$

3

Pristanište

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

1. Teret u pristanište dolazi isključivo vodenim 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 se razmatra kao slučajni proces, definisan Puasonovom raspodelom verovatnoće. Pristanište predstavlja sistem višefaznog masovnog opsluživanja. U ovom zadatku se razmatraju dve faze - istovar plovila i uskladištenje tereta. Elementi sistema su: kanal opsluživanja - pretovarno mesto u prvoj, a skladište, u drugoj fazi; jedinica opsluživanja - plovilo i red čekanja - sidrište. U datom slučaju, pristanište se može smatrati višekanalnim sistemom opsluživanja, sa neograničenim redom čekanja, bez otkaza.

3.1.1 Parametri sistema opsluživanja

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

zadatu vrednost parametra raspodele λ . Ovaj parametar, koji se u teoriji masovnog opsluživanja zove „intenzitet toka dolazaka”, predstavlja *prosečni 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, prevladavaju različita odstojanja, a na brzinu plovidbe utiče niz faktora, kao što su vetrovi, magla, niski vodostaji, usputno zadržavanje itd.

Vreme istovara svakog plovila je takodje 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” μ [1/mes] i koji predstavlja *prosečni 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 ρ_z - zapreminska masa tereta [t/m³], \forall_g - zapremina zahvatnog uređaja - grabilice [m³].

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 2).

Prosečni 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 η_{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, prosečni mesečni kapacitet dizalice je istovremeno i prosečni 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 opsluživanja su dakle, λ , μ i ρ , a njihove vrednosti predstavljaju ulazne podatke za analizu stanja sistema.

3.1.2 Verovatnoće stanja sistema

Odnos parametra ρ i broja kanala opsluživanja (pretovarnih mesta): $\alpha = \rho/n$ zove se „faktor opterećenja kanala opsluživanja”. Verovatnoće stanja sistema određuju se za razne vrednosti parametra α , pri čemu te vrednosti moraju biti manje od jedan. (U slučaju $\alpha > 1$, sistem ne može funkcionisati jer je kapacitet kanala opsluživanja nedovoljan.)

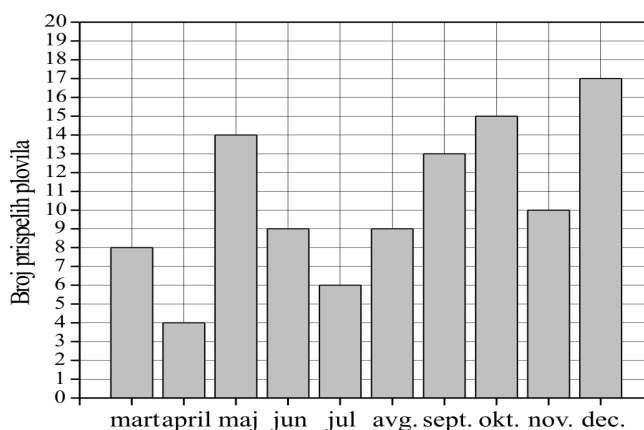
Verovatnoća da su u momentu nailaska plovila sva pretovarna mesta u pristaništu slobodna P_o , kao i verovatnoća da su sva zauzeta P_z , mogu se sračunati pomoću izraza datih u Dodatku 1. Verovatnoća da je bar jedno pretovarno mesto slobodno iznosi: $P_o^1 = 1 - P_z$.

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 1.

■ **Primer 3.1.** U Tabeli 3.1 i na Slici 3.1 dat je prosečni broj plovila prispelih u pristanište po mesecima. 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}	8	4	14	9	6	9	13	15	10	17



Slika 3.1: Slučajan raspored broja prispelih plovila

Ukupni broj plovila prispelih u pristanište u toku navigacionog perioda (10 meseci) je 105, a prosečni broj prispelih plovila u tom periodu je $\bar{n}_{pl}=10.5$. Intenzitet dolazaka plovila je $\lambda = \bar{n}_{pl}=10.5$ [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 dve smene: $T_{dn}=16$ sati/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 od 5 t. Kako svako pretovarno mesto ima jednu dizalicu, prosečni mesečni učinak jedne dizalice je istovremeno i prosečni mesečni kapacitet pretovarnog mesta Q_{pm} . Iz Tabele 3.2 se vidi da je intenzitet opsluživanja $\mu = Q_{pm}/G_{pl} = 24.738$ [1/mes] i da je faktor opterećenja sistema $\rho = \lambda/\mu = 0.424$, što znači da su pretovarna mesta zauzeta u proseku 42.4% vremena.

Na osnovu rezultata iz Tabele 3.2 može se zaključiti da već za dva pretovarna mesta (dve dizalice) postoji verovatnoća od preko 90% da će bar jedno od ovih mesta biti slobodno u momentu nailaska plovila, a tri i više pretovarnih mesta obezbeđuje skoro apsolutnu pouzdanost istovara plovila (>99%). Takodje se može konstatovati da će u slučaju dva pretovarna mesta, svako biti oko 20% vremena zauzeto ($\alpha = 0.212$).

Izbor broja pretovarnih mesta predstavlja ustvari izbor željene pouzdanosti rada sistema, odnosno finansijskih ulaganja koja su vezana za određenu pouzdanost.

3.2 Dužina operativne obale

Dužina operativne obale se određuje pomoću izraza:

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

gde je n - broj pretovarnih mesta, a ΔL - rezervna dužina (15-20 m).

Dužina operativne obale određuje dužinu kejskog zida u pristaništu.

3.3 Optimizacija 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 pouzdanost opsluživanja*

Kapacitet dizalice i parametri opsluživanja										
q_{br} [t]	V_g [m ³]	ρ_z [t/m ³]	q_n [t]	m_g [t]	$q_n + m_g$ [t]	Q_{diz} [t/h]	Q_{diz} 10 ³ [t/mes]	Q_{pm} 10 ³ [t/mes]	μ [1/mes]	ρ [-]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
5	2.00	0.85	1.70	3.15	4.85	49.0	23.5	23.5	24.738	0.424

Verovatnoće stanja sistema									
n [-]	α [-]	$1/n!$ [-]	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	0.424	1.0000	0.576	0.424	0.576	0.313	0.030	0.737	0.070
2	0.212	0.5000	0.650	0.074	0.926	0.020	0.002	0.444	0.042
3	0.141	0.1667	0.654	0.010	0.990	0.002	0.000	0.426	0.041
4	0.106	0.0417	0.654	0.001	0.999	0.000	0.000	0.425	0.040

Analiza dobiti i troškova se sprovodi *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 [kWs] (videti podatke u Dodatku 2), $n_{cik} = \sum n_{pl} \cdot G_{pl}/q_n$ - broj radnih ciklusa u periodu od godinu dana, a c_e - jedinična cena energije [EUR/kWh]. Troškovi maziva se obično 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].

Pojedinačno, 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 (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].

Pojedinačno, 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:

$$TIO_z = p_4 \cdot TAM_z \quad [\text{EUR/god}] \quad (3.14)$$

$$TOS_z = p_5 \cdot TAM_z \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.15)$$

gde je: $p_4 = p_5 = 10\%$;

- anuitet ili 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:

$$TP = p_3 \cdot (T_d + T_z) \quad [\text{EUR/god}], \quad (3.17)$$

gde je: $p_3 = 30\%$.

Ukupni troškovi. Ukupni 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 optimalnu varijantu broja pretovarnih mesta (dizalica) 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: $c_p = 1.8$ 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:

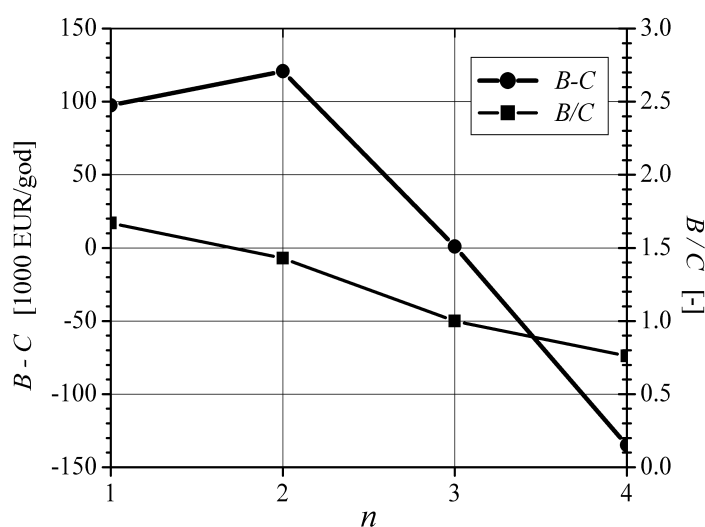
Rezultati proračuna prikazani u Tabeli 3.3 pokazuju odnos stepena pouzdanosti i odgovarajućih finansijskih efekata. Po kriterijumu odnosa dobiti i troškova B/C , najpovoljnija je varijanta sa jednim pretovarnim mestom (jednom dizalicom), a po kriterijumu neto dobiti $B - C$, najpovoljnija je varijanta sa dva pretovarna mesta i dve dizalice (Slika 3.2).

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	6.05	0.60	27.83	2.78	2.78	44.25	84.30
2	500	6.05	0.60	55.66	5.57	5.57	88.49	161.94
3	750	6.05	0.60	83.49	8.35	8.35	132.74	239.58
4	1000	6.05	0.60	111.33	11.13	11.13	176.98	317.23

Kejski zid								Plate TP
n [—]	L_{oo} [m]	CG 10^3 [EUR]	TAM_z	TIO_z	TOS_z	TAN_z	T_z	
10^3 [EUR/god]								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	90	90	10.02	1.00	1.00	15.93	27.95	33.67
2	180	180	20.04	2.00	2.00	31.86	55.90	65.35
3	270	270	30.06	3.01	3.01	47.79	83.86	97.03
4	360	360	40.08	4.01	4.01	63.71	111.81	128.71

Vrednovanje i upoređjivanje varijanti					
n [—]	P_o^1 [—]	C 10^3 [EUR/god]	B	B/C [—]	$B - C$ 10^3 [EUR/god]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.576	145.92	243.46	1.67	97.54
2	0.926	283.20	403.96	1.43	120.77
3	0.990	420.47	421.43	1.00	0.96
4	0.999	557.75	422.90	0.76	-134.85



Slika 3.2: Analiza dobiti i troškova

Ako je zahtevani nivo pouzdanosti rada sistema 90%, optimalna varijanta je ona sa dva pretovarna mesta. Varijante sa više od dva pretovarna mesta (i pored apsolutne pouzdanosti) nisu ekonomski prihvatljive.

3.4 Dimenzionisanje skladišta

Dimenzionisanje skladišta se takodje može zasnivati na modelu slučajnog procesa. Intenzitet dolaska tereta u skladište se definiše parametrom λ , a intenzitet opsluživanja, parametrom μ . 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 λ je ista u obe faze).

Intenzitet opsluživanja (μ) vezuje se za površinu skladišta. Kanal opsluživanja u ovom slučaju predstavlja određena površina skladišta (modul). Kod rasutih tereta, površina modula A_m [m²] se usvaja vodeći računa o dužini operativne obale.

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

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

gde je Δ_s [t/m²] - specifično opterećenje skladišta koje zavisi od vrste tereta (Dodatak 2).

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, λ , μ 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 1.

■ **Primer 3.3.** Dimenzionisati skladište iz prethodnih primera, ako je za ugalj $\Delta_s = 2.7$ t/m².

Rešenje:

Iz prethodnog primera je intenzitet dolaska tereta u skladište $\lambda = 10.5$ [1/mes]. Imajući u vidu da je dužina operativne obale za dva pretovarna mesta $L_{oo} = 180$ m, usvaja se površina skladišnog modula $A_m = 1400$ m², što približno odgovara površini pravougaonika $0.8 \cdot L_{oo} \times 10$ m².

Kapacitet skladišnog modula iznosi: $Q_m = 3780$ t/mes, a odgovarajuće vrednosti parametara su: $\mu = 3.979$ [1/mes] i $\rho = 2.639$.

Proračun je prikazan u Tabeli 3.4.

Tabela 3.4: Dimenzionisanje skladišta

n [-]	α [-]	$1/n!$ [-]	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	2.639	1.0000							
2	1.319	0.5000							
3	0.880	0.1667	0.031	0.781	0.219	5.710	0.544	8.349	0.795
4	0.660	0.0417	0.062	0.368	0.632	0.714	0.068	3.353	0.319
5	0.528	0.0083	0.069	0.156	0.844	0.175	0.017	2.813	0.268
6	0.440	0.0014	0.071	0.059	0.941	0.047	0.004	2.685	0.256
7	0.377	0.0002	0.071	0.020	0.980	0.012	0.001	2.651	0.252
8	0.330	0.0000	0.071	0.006	0.994	0.003	0.000	2.642	0.252

Rezultati pokazuju da skladište ukupne površine manje od 3 modula ne obezbeđuje neophodan skladišni prostor ($\alpha > 1$). Za varijante broja skladišnih modula $n > 3$, pouzdanost se kreće od 21.9% ($n = 3$) do 99.4% ($n = 8$). Ako se usvoji približno isti stepen pouzdanosti kao za pretovarna mesta u fazi istovara (92.6%), optimalni broj skladišnih modula je $n = 6$, sa ukupnom površinom skladišta $A_s = 8400$ m². 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. Optimalni 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 se definiše 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.

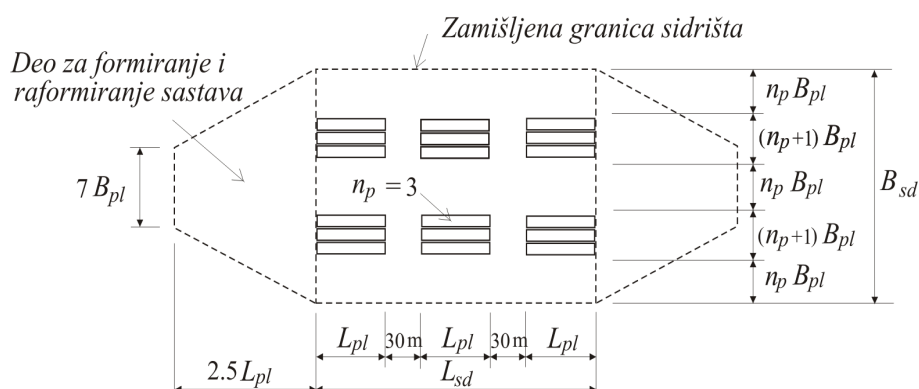
Kota teritorije pristaništa se definiše u odnosu na kotu velike vode:

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

gde je h_t - rezerva u slučaju pojave talasa.

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

Sidrište se dimenzioniše na najveći broj plovila u redu čekanja. Usidreni brodovi su grupisani 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, formiranih od ukupno 18 usidrenih plovila.



Slika 3.3: Shematski prikaz sidrišta