

SVEUČILIŠTE U RIJECI

GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

Preddiplomski sveučilišni studij Građevinarstvo

Hidromehanika

Manuela Andrić

0114024503

**ANALIZA HIDRAULIČKIH PARAMETARA PRI
HIDRAULIČKOM (VODNOM) SKOKU**

Završni rad

Rijeka, rujan 2015.

SADRŽAJ:

1. Uvod.....	3
2. Energijska jednadžba stacionarnog strujanja u koritu.....	4
2.1 Stacionarno strujanje u blago nagnutom koritu.....	5
2.2 Jednoliko strujanje u blago nagnutom koritu.....	7
2.3 Jednoliko strujanje u brzotoku.....	12
3. Specifična energija u presjeku korita.....	14
3.1 Značajka Froudeovog broja.....	15
3.2 Značajka Froudeovog broja kod složenih profila korita.....	17
4. Proces nastanka hidrauličkog skoka	19
4.1 Određivanje visine i duljine vodnog skoka.....	22
4.2 Tipovi vodnih skokova u praksi.....	23
5. Disipacija energije u hidrauličkom vodnom skoku.....	26
6. Mjere sanacije od oštećenja vodnog skoka.....	28
7. Računski dio.....	31
7.1 Primjer 1.- Određivanje spregnutih dubina.....	31
7.2 Podprimjer 1.1.- Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka i preljevnog praga	34
7.3 Podprimjer 1.2.- Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni širine preljeva i koeficijenta protoka na preljevu	35
7.4. Podprimjer 1.3.-Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka i dubini donje vode.....	37
7.5 Primjer 2.- Određivanje duljine vodnog skoka i duljine bučnice.....	41
7.6 Podprimjer 2.1-Određivanje duljine bučnice u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka.....	42
7.7 Podprimjer 2.2-Određivanje duljine bučnice u ovisnosti o promjeni visine preljevnog praga.....	44
7.8 Podprimjer 2.3-Određivanje duljine bučnice u ovisnosti o promjeni dubine donje vode i koeficijenta protoka na preljevu	48
7.9 Podprimjer 2.4-Određivanje duljine bučnice u ovisnosti o promjeni širine preljeva, koeficijenta brzine i koeficijenta protoka na preljevu.....	49

8. Zaključak.....	54
9. Literatura.....	55
10. Popis slika, tablica i grafikona.....	56

1. Uvod

Hidrotehnički kanali najstarije su hidrotehničke građevine. Prvi povijesni tragovi pojavili su se još oko 2000 godina prije naše ere prilikom izgradnje kanala Nil-Crveno more. Kanal je bio plovan i njime je ostvarena veza Sredozemno more-Nil-Crveno more. Također, na području Egipta postojala je gusta mreža velikih natapnih sustava, (Stojić, 1998.). Danas se kanali koriste za različite namjene: kao kanali za obranu od poplava, kanali za navodnjavanje, odvodnju, prevoženje trupaca, za tranzit (prijevoz, transport) riba, plovni kanali, kanali za hidroelektrane, te kombinirani kanali. Kod kanala za natapanje i odvodnju nastoji se postići manja brzina s ciljem da se spriječe erozija, dok se kod plovnih kanala teži većim brzinama kako bi se spriječilo zamuljenje (zamuljenost) vode. Brzina kretanja i tlak u nekoj točci presjeka mogu se izraziti kao funkcija vremena i prostora. Tok vode u kanalima može biti stacionaran ako se u svakoj točci promatranog poprečnog presjeka brzina i tlak ne mijenjaju s vremenom, dok je tok nestacionaran ukoliko se brzina i tlak u poprečnom presjeku mijenjaju s vremenom. Stacionaran tok može biti jednolik (ravnomjeran) ili nejednolik (neravnomjeran). Jednolik tok nastaje kada je kanal nepromjenjivog poprečnog presjeka, srednje brzine, pada i protoka po cijeloj dužini, dok nejednolik tok nastaje kada su srednja brzina u presjeku, površina protjecajnog presjeka i dubina uzduž kanala različite, (Žic i sur., 2010.). Geometrija poprečnih presjeka kanala mogu biti različite ovisno o namjeni i uvjetima korištenja kanala. Prirodni kanali obično se izvode trapeznog oblika s određenim nagibom pokosa, ovisno o stabilnosti pokosa. Moguće su i izvedbe kanala ugradnjom montažnih elemenata koji osim trapeznog profila mogu biti pravokutni, parabolični i polukružni. Oblik poprečnog presjeka utječe na protjecajnu površinu (A) i omočni opseg (O), (Stojić, 1998.).

2. Energija jednadžba stacionarnog strujanja u koritu

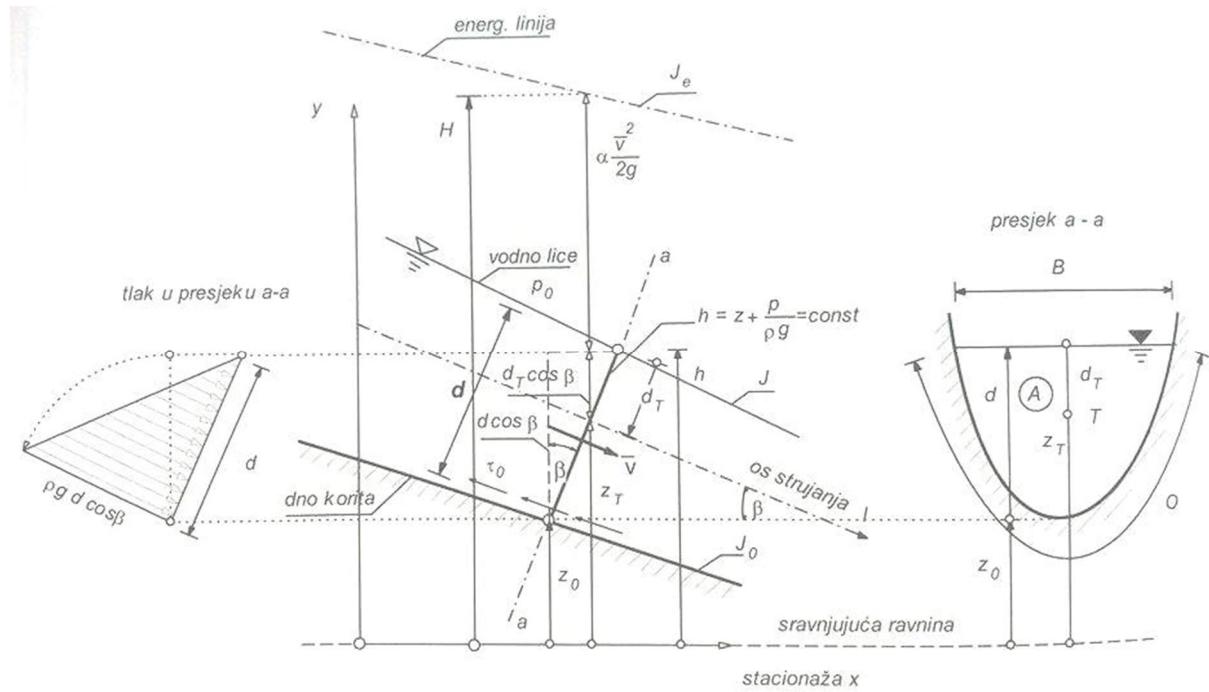
Realna viskozna tekućina lijepi se po stjenkama kanala, stoga je brzina vode (ili druge kapljevine) na stijenki jednaka nuli. Odmicanjem od stijenki kanala brzina se povećava, te je u slučaju osne simetričnosti najveća u osi kanala. Zbog nejednakih brzina u profilu kanala, kako bi mogli razmatrati strujanje realne tekućine kroz kanal kao stacionarno strujanje, strujanje prikazujemo srednjom brzinom (Jović, 2006.). Izraz po kojem određujemo srednju brzinu stacionarnog strujanja u koritu glasi:

$$\bar{v} = Q/A \quad (2.1)$$

gdje je Q protok, a A je površina protjecajnog (tzv. „živog“) presjeka. Također izraz za određivanje protoka Q , jednak je integralu brzine po protjecajnoj površini A :

$$Q = \int_A v dA. \quad (2.2)$$

Energijski (energetski) odnosi stacionarnog strujanja u koritu prikazani su na slici 1. Strujanje se odvija uzduž osi koja spaja težišta poprečnih presjeka, (Jović, 2006.).



Slika 1. Prikaz fizičkih parametara pri strujanju u strmom koritu, (Jović, 2006.)

U smjeru okomitom na os strujanja strujnice su paralelne zbog čega je piezometarska visina konstantna po presjeku, te je izraz za određivanje piezometarske visine jednak:

$$h = z + \frac{p}{\rho g} = \text{const.} \quad (2.3)$$

pri čemu je z geometrijska visina od promatrane sravnavajuće (referentne) ravnine do težišta u nekom poprečnom presjeku, p je vrijednost tlaka. Srednja energijska visina $H(E)$ prema Joviću dobije se dodavanjem Coriolisovog broja α u Bernoullijevu jednadžbu:

$$H(E) = z_T + \frac{p_T}{\rho g} + \alpha \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.4)$$

pri čemu su z_T geometrijska visina mjerena od sravnavajuće (referentne) ravnine do težišta promatranog poprečnog presjeka a-a prikazanog na slici 1. Desno, p_T je vrijednost tlaka u presjeku a-a, ρ gustoća vode (ili druge kapljevine), g ubrzanje polja sile teže dok je α Coriolisov broj. Prema Joviću (2006.) Coriolisov broj je „bezdimenzionalni broj ili koeficijent kinetičke raspodjele u presjeku“. Budući da se promatra tečenje u nagnutom koritu energetska visina mjerena od sravnavajuće ravnine za težište presjeka može se napisati kao:

$$H(E) = z_T + d_T \cos \beta + \alpha \frac{\bar{v}^2}{2g} = z_0 + d \cos \beta + \alpha \frac{\bar{v}^2}{2g}, \quad (2.5)$$

gdje je β kut kojeg zatvara os strujanja prema horizontali, a d_T je dubina težišta. Kako se promatra strujanje s otporom vrijedi:

$$\frac{dH}{dl} + J_e = 0. \quad (2.6)$$

Gradijent energijske linije I_e određen je specifičnom silom otpora koji se može izraziti (Jović, 2006.):

$$J_e = \frac{\tau_0}{\rho g R}. \quad (2.7)$$

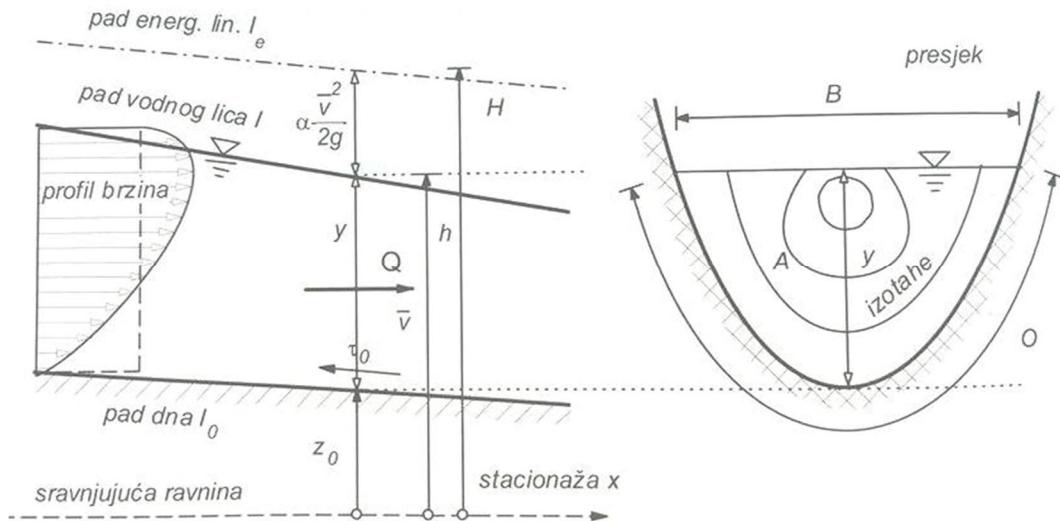
Posmično naprezanje τ_0 djeluje po omočenom opsegu korita, hidraulički radijus R prema Joviću (2006.) je „odnos površine protjecajnog presjeka A i omočenog opsega $O““. Energijska jednadžba stacionarnog strujanja kod nagnutih korita glasi:$

$$\frac{dH}{dl} + \frac{\tau_0}{\rho g R} = 0 \quad (2.8)$$

2.1 Stacionarno strujanje u blago nagnutom koritu

Korita kojima je kut $\beta \approx 0$, odnosno kut kojeg zatvara os stujanja prema horizontalnoj ravnini nazivaju se blago nagnuta korita, Slika 2. U posebnim slučajevima izvode se korita

većeg nagiba, te se tada govori o brzotocima. Kut β kod brzotoka je jednak ili veći od 5° (Jović, 2006.).



Slika 2. Strujanje u blago nagnutim koritima, (Jović, 2006.)

Zbog malog nagiba dna korita poprečni presjeci mogu smatrati uspravnim, te se sa slike 2. može uočiti da se piezometarska linija poklapa s vodnim licem h :

$$h = z_0 + y \quad (2.9)$$

Specifična energija strujanja $H(E)$ u blago nagnutom koritu prema Joviću iznosi:

$$H(E) = z_0 + y + \alpha \frac{\bar{v}^2}{2g} = h + \alpha \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.10)$$

Nagib korita izražava se tangensom kuta β u obliku postotka ili promila, npr. pad dna je $I_0=0,1\%$, odnosno korito ima pad 1m po kilometru. Pad energijske linije I_e mjeri se tangensom kuta β kojeg os strujanja zatvara prema horizontalnoj ravnini, dok je gradijent energijske linije J_e mjera opadanja energijske linije uzduž osi strujanja (Jović, 2006.). U svojim razmatranjima Jović je promatrao da „veza između gradijenta i nagiba slijedi iz diferencijalnog odnosa $dx = dl \cos \beta$ “, što daje jednakost:

$$J_e = I_e \cos \beta \quad (2.11)$$

Za $\beta = 0$ vrijedi jednakost $J_e = I_e$, te je energijska jednadžba za blago nagnuta korita prema istom autoru jednaka:

$$\frac{dH}{dx} + I_e = 0 \quad (2.12)$$

2.2 Jednoliko strujanje u blago nagnutom koritu

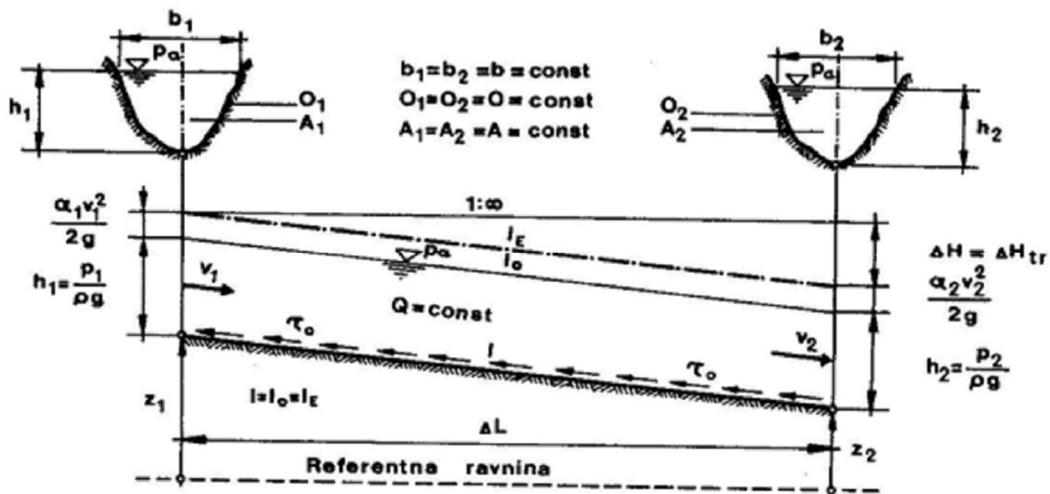
Uvjeti za jednoliko stacionarno strujanje u blago nagnutom kanalu su slijedeći:

- stalni protok, Q
- stalna protjecajna površina, A
- nagib vodnog lica jednak nagibu dna kanala i nagibu linije energije:

$$I = I_0 = I_e \quad (2.13)$$

- jednaka hrapavost protjecajne površine uzduž korita, n
- te nepostojanje lokalnih otpora (mali radijusi zakriviljenja u krivinama korita).

Kanali kojima profil uzduž toka ostaje nepromjenjen nazivaju se prizmatični kanali (umjetno sagrađeni kanali). Strujanje u prizmatičnim kanalima dakle ima nepromjenjen profil brzina i stalnu dubinu vode h , zbog čega su jednake srednje brzine i Coriolisov broj, te se strujanje u takvim uvjetima naziva jednoliko stacionarno (ustaljeno) strujanje (Jović, 2006.). Na slici 3. prikazano je jednoliko tečenje u prizmatičnom kanalu.



Slika 3. Prikaz jednolikog strujanja, (Žic i sur., 2010.)

Srednja brzina profila kod jednolikog strujanja može se zapisati kao:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2g}{c_f}} \sqrt{RI_0} \quad (2.14)$$

Uvođenjem Chezyevog broja C u prethodni izraz dobije se Chezyeva formula za brzinu strujanja u kanalima:

$$v = C \sqrt{RI_0}, \quad (2.15)$$

gdje je Chezyev broj jednak $C = \sqrt{2g}/\sqrt{c_f}$ [m^{1/2}s⁻¹]. Francuski inženjer Antoine Chezy smatrao je da je koeficijent C konstanta, što se kasnije pokazalo netočno, jer broj ne ovisi samo o koeficijentu trenja c_f u graničnom sloju nego i o Reynoldsovom broju Re i hrapavosti, te su uslijedila brojna istraživanja i formule za određivanje Chezyevog broja (Jović, 2006.). Jedan od izraza za određivanje Chezyevog broja je Manning-Stricklerova formula koja glasi:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} = k_s R^{\frac{1}{6}} \quad (2.16)$$

Uvođenjem izraza (2.14) u izraz (2.13) dobiva se Manningova formula za brzinu strujanja u kanalima:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I_e^{\frac{1}{2}} [\text{m/s}], \quad (2.17)$$

gdje je n Manningov koeficijent hrapavosti [m^{-1/3}s], R hidraulički radius i I_e nagib linije energije (Jović, 2006.). Poznavajući brzinu strujanja u promatranom kanalu prema uvjetu neprekinitosti dobiven je izraz prema kojem se određuje protok:

$$Q = vA = \frac{1}{n} A R^{2/3} I_e^{1/2} \quad (2.18)$$

U tablici 1. su prikazane vrijednosti Manningova koeficijenta hrapavosti n i Stricklerov koeficijent brzine $k_s(K)$ za različite vrste obloženosti stijenki korita.

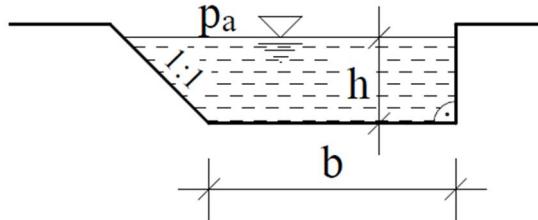
Tablica 1. Vrijednosti Manningova koeficijenta hrapavosti za pojedine tipove obloženosti stijenki korita, (Jović, 2006.)

Kat.	Vrsta stijenki	n	K=1/n
I	Osobito glatke površine; emajlirane ili glazirane površine	0,009	111
II	Vrlo brižn oblanjane daske i dobro sastavljen; najbolja čista cementna žbuka (zaglađena)	0,010	100
III	Najbolja cementna žbuka (1/3 pijeska); čiste nove grnčarske cijevi; cijevi od lijevanog željeza; dobro sastavljen željezne cijevi; dobro oblanjane daske	0,011	90,9
IV	Neoblanjane daske, dobro sastavljen; vodovodne cijevi u normalnim okolnostima, bez veće inkrustacije; vrlo čiste cijevi za otpadnu vodu i vrlo dobar beton	0,012	83,3
V	Drvena obloga dobro obrađena; dobra obloga od opeke; cijevi za otpadnu vodu u normalnim okolnostima; ponešto nečiste cijevi za vodu	0,013	76,9
VI	Zaprjljane cijevi (vodovodne i za otpadnu vodu); betonirani kanali u srednjim okolnostima	0,014	71,4
VII	Srednje dobra obloga od opeke; tarac od klesana kamena u srednjim okolnostima; dovoljno zaprljane cijevi za odvod otpadne vode; cerada na drvenim letvama	0,015	66,7
VIII	Dobar tarac od lomljenog kamena; stara (oštećena) obloga od opeke; relativno grub beton	0,017	58,8
IX	Kanal pokriven debelim stabilnim slojem mulja, kanali u zbijenom sitnom šljunku, pokriveni neprekidnim tankim slojem mulja (pri tome sve u besprijeckornom stanju)	0,018	55,6
X	Srednje dobar tarac od lomljenog kamena; tarac od oblutaka; kanali usječeni u kanenu; kanali u lesu, prekriveni tankim slojem mulja (u običnom stanju)	0,02	50,0
XI	Kanali u zbijenoj glini; kanali u lesu, šljunku i zemljii, pokriveni isprekidano tankim slojem mulja; veliki zemljani kanali u dobrom stanju	0,0225	44,4
XII	Dobra suha obloga, veliki zemljani kanali srednje održavani i mali zemljani kanali dobro održavani; rijeke u veoma dobrim okolnostima (čisto, pravolinijsko korito sa slobodnim tokom, bez obalnih urušavanja i dubokih vododerina)	0,025	40,0
XIII	Veliki zemljani kanali u nešto slabijem stanju i mali kanali u dobrom stanju	0,0275	36,4
XIV	Zemljani kanali u slabom stanju, na primjer sa šašem, oblutcima ili šljunkom na dnu, poprilično zarasli travom, s odronjavanjem obalnih kosina i sl.; rijeke u dobrim okolnostima tečenja	0,03	33,3
XV	Kanali u vrlo lošim okolnostima (s nepravilnim profilima, poprilično zatrpani kamenom i s vodenom travom); rijeke u relativno dobrom stanju, ali s nekom količinom kamena i šaši.	0,035	28,6
XVI	Kanali u vrlo lošem stanju (sa znatnim vododreinama i odronjavanjima obola, zarasli šašem, s krupnim kamenjem na dnu i sl.); rijeke s pogrešanim okolnostima tečenja, s povećanom količinom kamena i šaši, s vijugavim koritom	0,04 i više	25,0 i manje

Ovisno o padu dna kanala I i kritičnom padu korita I_{cr} razlikuje se silovit, miran i kritičan tok (strujanje, režim). Kritičan pad je pad dna korita gdje je normalna dubina h_0 jednaka kritičnoj dubini h_{cr} . Normalna dubina je dubina koja se javlja pri jednolikom stacionarnom strujanju za zadani pad dna korita I i protok Q . Kada je normalna dubina veća od kritične dubine, odnosno kada vrijedi $I < I_{cr}$ radi se o mirnom toku. Obrnuto, kada je normalna dubina manja od kritične dubine, odnosno $I > I_{cr}$ tok je silovit (buran ili hitar). Poznavajući geometriju korita (kanala), protok (Q), pad dna (I) i koeficijent hrapavosti n ili Stricklerov koeficijent brzine k_s nismo u mogućnosti direktno odrediti normalnu dubinu koristeći izraze (2.17) i (2.18). Stoga se normalna dubina određuje na način da se pretpostavi neka vrijednost dubine h_i i za odabranu vrijednost se izračunaju protjecajna površina A_i , omočeni opseg O_i i hidraulički radius R_i . Potom se pomoću izraza (2.18) odredi protok Q_i . Postupak se ponavlja sve dok dobiveni protok Q_i nije približno jednak zadanim protoku Q . Tada je pretpostavljena dubina h_i , kojom je dobiven protok jednak zadanim protoku, jednaka normalnoj dubini h_0 (Žic i sur., 2010.). Opisani postupak prikazan je kroz Primjer 1.

Primjer 1.

Za zadanu geometriju kanala sa slike, pridnenom širinom kanala $b=3\text{m}$, protokom $Q=5,2 \text{ m}^3/\text{s}$ i padom dna kanala $I=1\text{ \%}$, uz Manningov koeficijent hrapavosti $n=0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ potrebno je odrediti dubinu vode h .



Rješenje:

Za zadanu geometriju kanala protjecajna površina A jednaka je:

$$A = bh + \frac{h^2}{2} = h \left(b + \frac{h}{2} \right)$$

Omočeni opseg O je pritom:

$$O = h + \frac{h}{\cos 45} + b$$

dok se hidraulički radius R određuje prema formulaciji:

$$R = \frac{A}{O}$$

Protok za danu geometriju kanala određuje se na temelju Manningove formule:

$$Q_i = \frac{1}{n} A R^{2/3} I^{1/2} = \frac{1}{0,025} A R^{2/3} 0,001^{1/2} = 1,265 A R^{2/3}$$

Normalna dubina h određuje se po izrazu:

$$h = h_{pretp} \left(\frac{Q}{Q_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Iterativnom metodom dolazi se do normalne dubine h :

h_{pretp} (m)	A (m^2)	O (m)	R (m)	Q_i (m^3/s)	h (m)
2,0	8,0	7,82	1,023	10,27	1,42
1,42	5,62	6,62	0,85	6,37	1,35
1,35	4,96	6,26	0,792	5,37	1,325
1,325	4,853	6,198	0,783	5,2	1,325

Usvojena vrijednost normalne dubine iznosi $h=1,325$ m.

Postupak proračuna iz tablice za prvi redak je slijedeći:

- 1) Prepostavljamo dubinu $h_{pretp}=2m$

$$A_1 = bh + \frac{h^2}{2} = h \left(b + \frac{h}{2} \right) = 2 \left(3 + \frac{2}{2} \right) = 8 \text{ } m^2$$

$$O_1 = h + \frac{h}{\cos 45} + b = 2 + \frac{2}{\cos 45} + 3 = 7,82 \text{ m}$$

$$R = \frac{A}{O} = \frac{8}{7,82} = 1,023 \text{ m}$$

$$Q_1 = 1,265 A R^{2/3} = 1,265 \cdot 8 \cdot 1,023^{2/3} = 10,267 \text{ } m^3/s$$

$$h = h_{pretp} \left(\frac{Q}{Q_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 2 \left(\frac{5,2}{10,267} \right)^{\frac{1}{2}} = 1,42 \text{ m}$$

Isti postupak vrijedi i za ostale redke u tablici.

2.3 Jednoliko strujanje u brzotoku

Za jednoliko strujanje u brzotoku, kao i kod blago nagnutih korita, vrijedi stalna dubina vode tako da vrijedi jednakost gradijenata: $J = J_0 = J_e$ (Jović, 2006). Stoga se srednja brzina profila u brzotoku može napisati u obliku:

$$v = \sqrt{\frac{2g}{c_f}} \sqrt{RJ_0}, \quad (2.19)$$

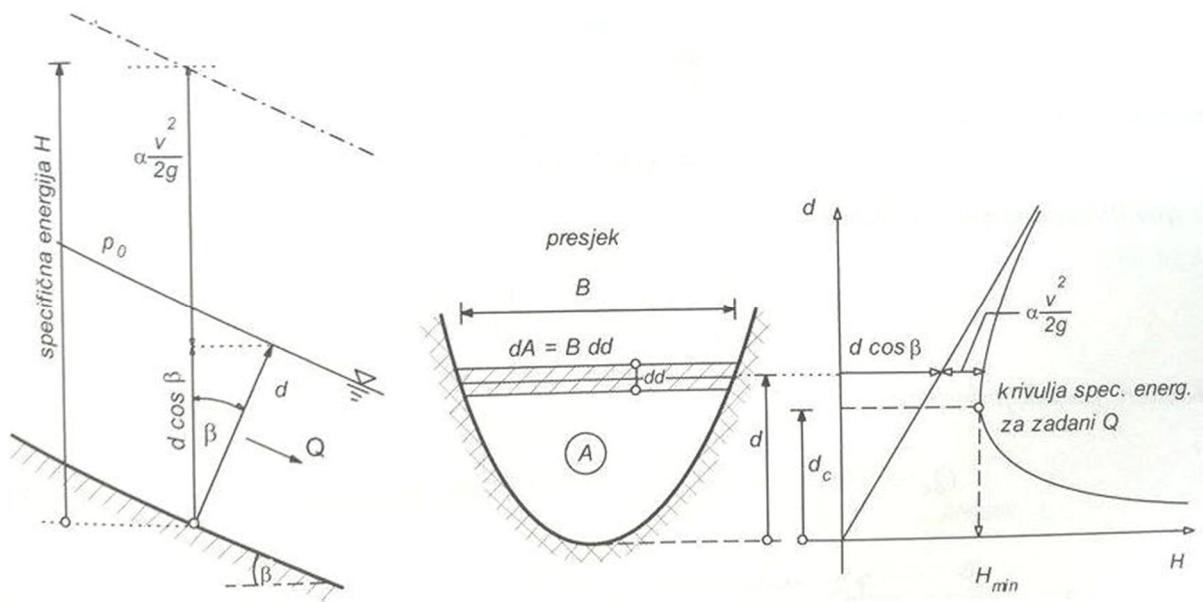
odnosno:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.20)$$

Gradijent dna korita J_0 može se napisati pomoću pada dna $J_0 = I_0 \cos \beta$, gdje je β kut dna korita prema horizontalnoj ravnini (Jović, 2006.). Prema slici 4. može se odrediti specifična energija presjeka brzotoka:

$$H(E) = d \cos \beta + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (2.21)$$

Za promatrani protok Q može se prikazati krivulja specifične energije u ovisnosti o dubini (slika 4., desno).



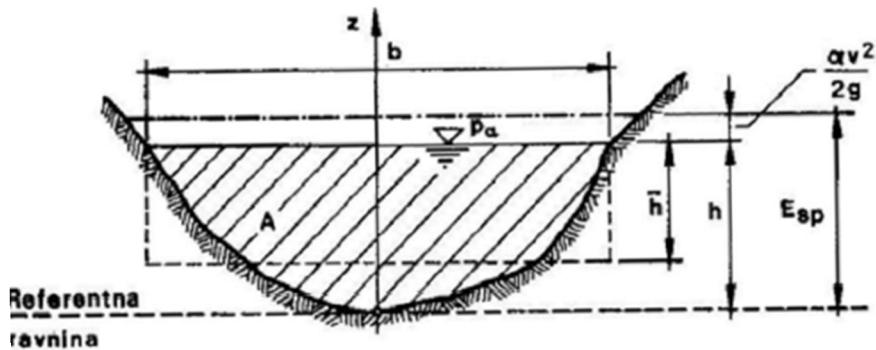
Slika 4. Dijagram specifične energije pri strujanju u brzotoku, (Jović, 2006.)

3. Specifična energija u presjeku korita

Specifičnu energiju presjeka korita možemo definirati kao mehaničku energiju vode koja u jedinici vremena protječe kroz protjecajnu površinu vodotoka s obzirom na horizontalnu referentnu ravninu koja prolazi najnižom točkom poprečnog presjeka (Žic i sur., 2010.). Prema tome vrijedi da je specifična energija presjeka (slika 5.) jednaka:

$$E_{sp} = h + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (3.1)$$

gdje je h dubina vode u presjeku korita, v srednja brzina vode u koritu, α Coriolisov koeficijent, a g ubrzanje polja sile teže.



Slika 5. Poprečni presjek prirodnog kanala, (Žic i sur., 2010.)

Za izabrani protok može se nacrtati krivulja specifične energije u zavisnosti o dubini h [m], koja je prikazana na slici 6. Isti protok Q može teći različitim brzinama, a prema tome i različitim dubinama ovisno o uzdužnom padu i hrapavosti korita. Tako će npr. za male padove korita dubina protjecanja biti veća nego za velike padove korita. Promjenom brzine i dubine mijenjati će se potencijalni i kinetički dio specifične energije presjeka. Na slici 6. potencijalni dio specifične energije prikazan je točkastom linijom, a kinetički dio crtkanom krivuljom drugog reda. Ukupna promjena specifične energije prikazan je punom krivuljom kojoj su asymptote os apscisa, pravac potencijalnog dijela specifične energije i minimalna količina specifične energije. Dubina vode za koju je specifična energija minimalna naziva se kritična dubina i označava se h_{cr} . Kritična dubina se može odrediti crtanjem krivulje specifične energije presjeka ili analitički, postavljajući da je prva derivacija funkcije specifične energije presjeka (izraz 3.1) po dubini jednaka nuli (Žic i sur., 2010.). Deriviranjem se dobiva izraz:

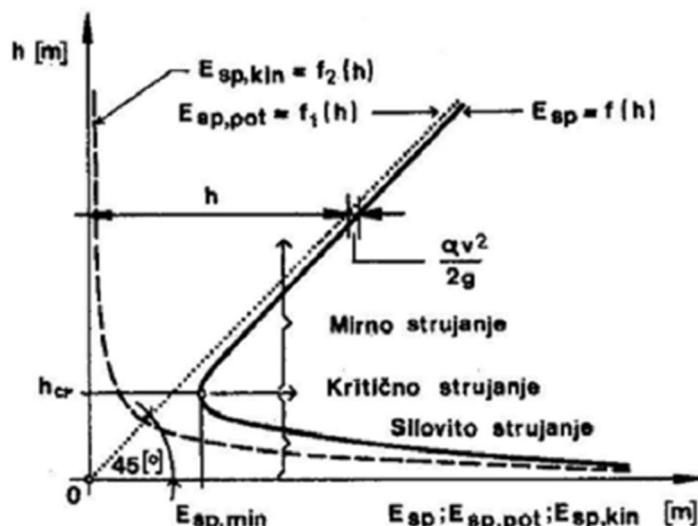
$$\frac{\alpha Q^2 b}{g A^3} = \frac{\alpha v^2}{gh} = 1 \quad (3.2)$$

gdje je A protjecajna površina, a b širina vodnog lica. Vrijednost s lijeve strane izraza (3.2) pokazuje odnos sila tromosti i sila gravitacije i naziva se Froudeov broj. Za $h = h_{cr}$ vrijedi:

$$F_r = \frac{\alpha Q^2 b_{cr}}{g A_{cr}^3} = 1 \quad (3.3)$$

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A_{cr}^3}{b_{cr}} \quad (3.4)$$

Strujanje pri kojem je kritična dubina jednaka normalnoj dubini naziva se kritično strujanje. Ukoliko je normalna dubina veća od kritične strujanje je mirno (podkritično), a ukoliko je normalna dubina manja od kritične strujanje je silovito (nadkritično, burno), (Jović, 2006.).



Slika 6. Krivulja specifične energije vodotoka (brzotoka) u zavisnosti o dubini vode (Žic i sur., 2010.)

3.1 Značajka Froudeovog broja

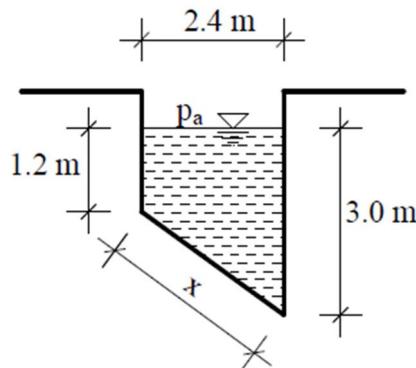
Predhodno spomenut izraz (3.3) naziva se Froudeov broj, predstavlja prema Joviću (2006.) „kriterij za kritično strujanje“. Bezdimenzionalan je i označava se sa F_r . Za vrijednost $F_r=1$ vrijedi kritično strujanje tj. postoji jednak odnos sila inercije i sila gravitacije. Mirno strujanje je strujanje kad je $F_r < 1$, te kod takvog strujanja prevladavaju sile gravitacije nad silama tromosti. Kad je $F_r > 1$ strujanje je silovito, te kod takvog strujanja prevladavaju sile tromosti nad silama gravitacije (Žic i sur., 2010.). Kod jednostavnijih poprečnih presjeka za Coriolisov broj α se može uzeti jedinica, tako da Froudeov broj poprima oblik:

$$F_r = \frac{Q^2 b}{g A^3} \quad (3.5)$$

Način određivanja toka strujanja u nekom koritu pomoću Frudeovog broja prikazan je kroz Primjer 2.

Primjer 2.

Za poprečni presjek kanala prema slici i protok Q potrebno je odrediti karakter (režim) toka. Zadano je: protok $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$, dubine vode u kanalu $h_1=1,2 \text{ m}$, $h_2=3,0 \text{ m}$, površinska širina kanala $b=2,4 \text{ m}$, Coriolisov koeficijent $\alpha=1,1$, atmosferski tlak $p_a=0 \text{ Pa}$.



Rješenje:

Protjecajna površina presjeka za dani poprečni profil kanala A određuje se prema slijedećoj formuli:

$$A = h_1 b + \frac{(h_2 - h_1)b}{2} = 1,2 \cdot 2,4 + \frac{(3 - 1,2) \cdot 2,4}{2} = 5,04 \text{ m}^2$$

$$x = \sqrt{1,8^2 + 2,4^2} = 3 \text{ m}$$

Omočeni opseg O za dani poprečni profil iznosi:

$$O = h_1 + h_2 + x = 1,2 + 3 + 3 = 7,2 \text{ m}$$

Na temelju određene protjecajne površine presjeka kanala i omočenog opsega proizlazi izračun hidrauličkog radijusa R :

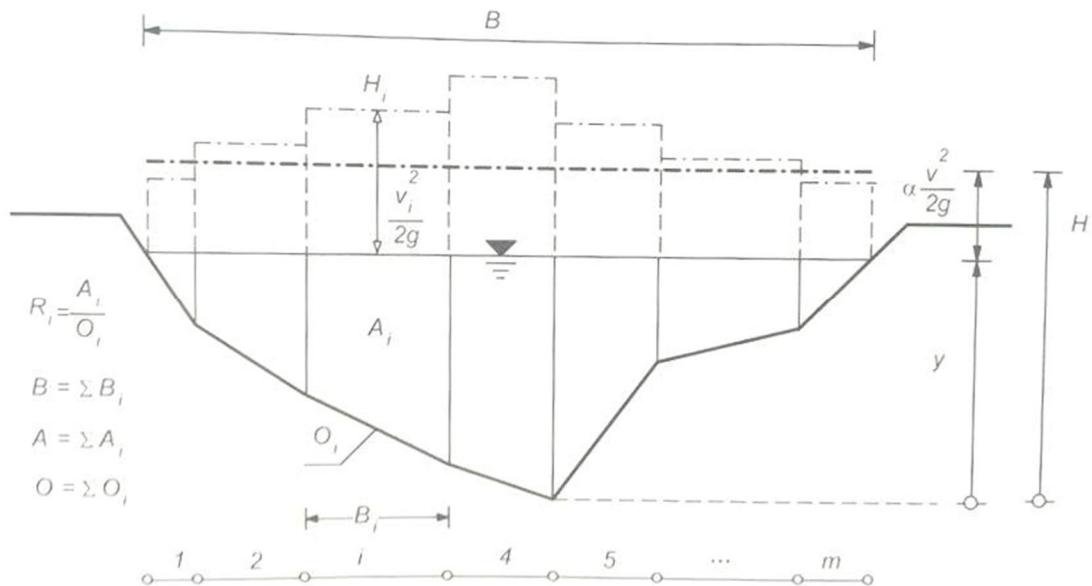
$$R = \frac{A}{O} = 0,7 \text{ m}$$

Froudeov broj F_r za dani poprečni profil kanala iznosi:

$$F_r = \frac{\alpha Q^2 b}{g A^3} = \frac{1,1 \cdot 10^2 \cdot 2,4}{9,81 \cdot 5,04^3} = 0,21 < 1 \text{ miran tok}$$

3.2 Značajka Froudeovog broja kod složanih profila korita

Za složene poprečne presjeke korita potrebno je izračunati Coriolisov broj α , zbog nejednolike raspodjele kinetičke energije (Jović, 2006.), slika 7. Prema Joviću (2006.) „Coriolisov se broj izračunava iz uvjeta izračunavanja snage toka u koritu koristeći srednju profilsku brzinu“.



Slika 7. Specifična energija u složenom presjeku korita, (Jović, 2006.)

Coriolisov broj složenog presjeka korita prema Joviću (2006.) iznosi:

$$\alpha = \sum_{i=1}^m \frac{\left(\frac{K_i}{K}\right)^3}{\left(\frac{A_i}{A}\right)^2} \quad (3.6)$$

a specifična energija:

$$H = y + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (3.7)$$

Kriterij za vrstu strujanja prema Joviću dobije se iz uvjeta minimalne specifične energije:

$$\frac{dH}{dy} = \frac{d}{dy} \left(y + \alpha \frac{Q^2}{2g A^2} \right) = 0 \quad (3.8)$$

Uvođenjem Coriolisovog broja za složeni presjek korita u prehodni izraz i deriviranjem dolazi se do slijedećeg izraza:

$$\frac{Q^2}{gA^3} b \sum_{i=1}^m \left(\frac{K_i}{K}\right)^3 \left(\frac{A_i}{A}\right)^3 \frac{b_i}{b} = 1 \quad (3.9)$$

Uvodeći faktor korekcije:

$$\gamma = \sum_{i=1}^m \left(\frac{K_i}{K}\right)^3 \left(\frac{A_i}{A}\right)^3 \frac{b_i}{b} \quad (3.10)$$

dobije se Froudeov broj za složeni presjek korita:

$$F_r = \gamma \frac{Q^2}{gA^3} b \quad (3.11)$$

4. Proces nastanka hidrauličkog skoka

Hidraulički ili vodni skok prema Agroskinu (1969.) predstavlja „promjena oblika slobodne površine vodotoka u vidu skoka pri prijelazu silovitog u miran tok“. Hidraulički (vodni) skok nastaje na primjer kod preljeva preko brane, pri istjecanju ispod zapornice ili promjeni pada dna kanala sa $I > I_{kr}$ na pad $I < I_{kr}$. Kako silovit tok ima veliku kinetičku energiju koja uzrokuje eroziju korita potrebna je zaštita korita posebnim oblogama. Miran tok s malim brzinama ne zahtjeva takvu oblogu zbog čega se nastoji u vodotoku osigurati miran tok gdje je to moguće. Dio vodotoka u kojem se javlja vodni skok naziva se slapište (Agroskin, 1969.). Shema pojave vodnog skoka prikazan je na slici 8. i 9. Sa slike 9. je vidljivo da se prijelaz iz silovitog toka, tj. dubine h_1 , u miran tok, tj. dubine h_2 odvija preko kritične dubine h_{cr} (Žic i sur., 2010.). Dubine h_1 i h_2 nazivaju se spregnute ili uzajamne (konjugirane) dubine. Spregnute dubine možemo odrediti pomoću ravnoteže tlačnih sila i sila količine gibanja na normalnom vodnom skoku u pravokutnom koritu za specifični protok $q = Q/B$ [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$], tj. protok po jedinici širine (Jović, 2006.). Raspodjela tlačnih sila i sila količine gibanja prikazani su na slici 8. Prema tome, može se u smjeru toka postaviti jednadžbu ravnoteže u sljedećem obliku:

$$F_1 + K_1 = F_2 + K_2 \quad (4.1)$$

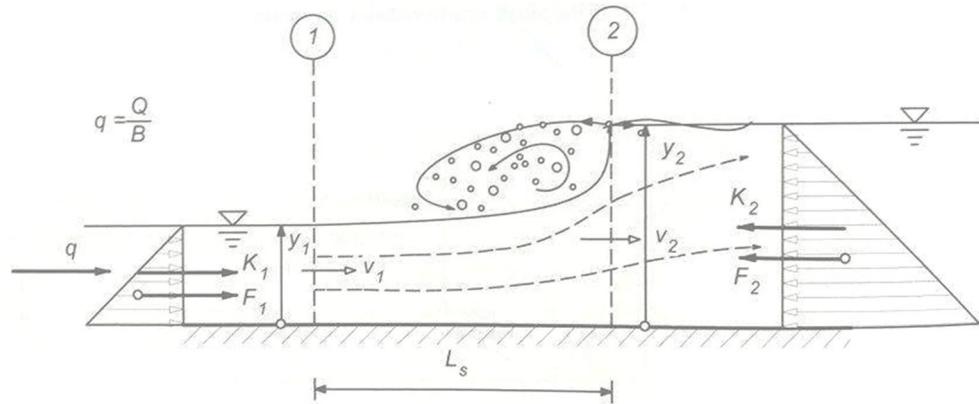
pri čemu su:

$$F_1 = \rho g \frac{h_1^2}{2} \quad \text{sila tlaka u uzvodnom presjeku} \quad (4.2)$$

$$K_1 = \rho g v_1 = \rho \frac{q^2}{h_1} \quad \text{sila količine gibanja u uzvodnom presjeku} \quad (4.3)$$

$$F_2 = \rho g \frac{h_2^2}{2} \quad \text{sila tlaka u nizvodnom presjeku} \quad (4.4)$$

$$K_2 = \rho g v_2 = \rho \frac{q^2}{h_2} \quad \text{sila količine gibanja u nizvodnom presjeku} \quad (4.5)$$



Slika 8. Raspodjela tlačnih sila i sila količine gibanja

Napomena: za spregnute dubine na slikama oznaka je $y(h)$, (Jović, 2006.)

Zbog pojednostavljenja analize u izrazu (4.1) izostavljene su sila trenja na vanjskoj površini promatranog volumena i sila vlastite težine vode. Uvrštavanjem izraza (4.2)-(4.5) u jednadžbu ravnoteže (izraz 4.1) dobiva se jednadžba u obliku:

$$\rho g \frac{h_1^2}{2} + \rho \frac{q^2}{h_1} = \rho g \frac{h_2^2}{2} + \rho \frac{q^2}{h_2} \quad (4.6)$$

odnosno:

$$\frac{h_1^2}{2} + \frac{q^2}{gh_1} = \frac{h_2^2}{2} + \frac{q^2}{gh_2} \quad (4.7)$$

Izraz (4.7) množi se s $\frac{2h_1h_2}{g}$ te se dobiva:

$$h_1h_2(h_2^2 - h_1^2) = \frac{2q^2}{g}(y_2 - y_1) \quad (4.8)$$

Nakon dijeljenja s $h_1(h_2 - h_1)$ proizlazi izraz:

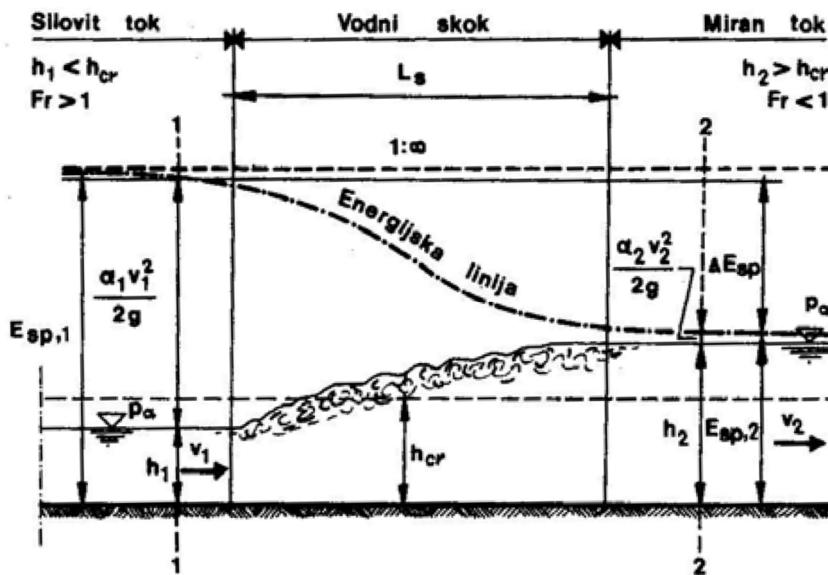
$$h_2^2 + h_1h_2 - \frac{2q^2}{gh_1} = 0 \quad (4.9)$$

Poznavajući da je specifični protok $q = v_1h_1$ i Froudeov broj $F_r = \frac{v_1^2}{gh_1}$ dobiju se izrazi za prvu i drugu spregnutu dubinu:

$$h_1 = \frac{h_2}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_{r2}} - 1 \right) \quad (4.10)$$

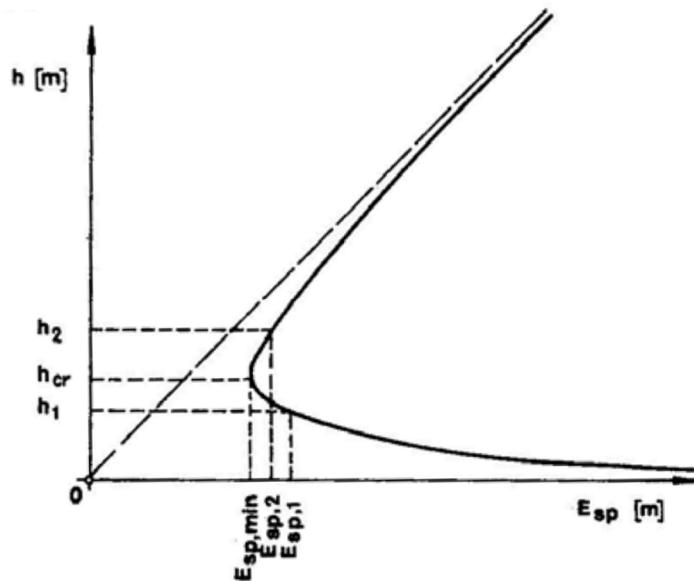
$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8F_{r1}} - 1) \quad (4.11)$$

Treba napomenuti da izrazi za spregnute dubine (4.10) i (4.11) vrijede kod korita pravokutnog poprečnog presjeka. Za druge oblike korita razrađena je metodologija proračuna uz pomoć tabela i dijagrama (Jović, 2006.).



Slika 9. Hidraulički (vodni) skok, (Žic i sur., 2010.)

Prijelaz iz silovitog u miran tok odvija se preko vodnog skoka (a ne postepeno), jer promjena specifične energije vodotoka koja bi pratila kontinuirani oblik krivulje slobodnog vodnog lica fizički nije moguća. Moguće je jedino strujanje s disipacijom energije do minimuma, odnosno smanjenje specifične energije od početne vrijednosti $E_{sp,1}$ do minimuma specifične energije $E_{sp,min}$, gdje je normalna dubina jednaka kritičnoj, a zatim povećanje od minimuma do vrijednosti $E_{sp,2}$ (Žic i sur., 2010.). Promjena specifične energije po dubini prikazana je na slici 10.



Slika 10. Krivulja specifične energije vodotoka, (Žic i sur., 2010.)

4.1 Određivanje visine i duljine vodnog skoka

Razlika druge i prve spregnute dubine naziva se visina vodnog skoka i označava se s a_s [m], odnosno vrijedi:

$$a_s = h_2 - h_1 \quad (4.12)$$

„Horizontalna udaljenost od čela skoka do točke na površini neposredno nizvodno od vrtložnog površinskog valjka u kojoj je dubina praktički jednaka drugoj spregnutoj dubini“ prema Žicu i sur. (2010.) naziva se duljina vodnog skoka i označava se s L_s [m]. Zbog turbulentnog strujanja duljina vodnog skoka ne može se precizno odrediti, te se prilikom projektiranja koristi niz empirijskih formula baziranih na rezultatima eksperimentalnih istraživanja. Neki od izraza za određivanje duljine vodnog skoka za horizontalno pravokutno korito dani su kroz sljedeće izraze, (Žic i sur., 2010.):

Izraz kojeg je predložio Smetane:

$$L_s \approx 6(h_2 - h_1) \quad (4.13)$$

Zatim izraz Bradleya i Peterke:

$$L_s = 6,1h_2 \quad \text{za } 25 < F_{rl} < 200 \quad (4.14)$$

$$L_s = h_2(1,1 + 2F_{rl} - 0,2F_{rl}^2) \quad \text{za } 2,25 < F_{rl} < 25 \quad (4.15)$$

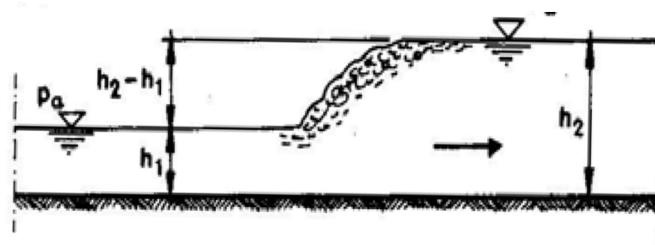
Izraz Silvestera:

$$L_s = 9,75 h_1 (\sqrt{F_{r1}} - 1)^{1,01} \quad (4.16)$$

4.2 Tipovi vodnih skokova u praksi

Prema okolnostima u kojima nastaju vodni skokovi poprimaju različite oblike i prema tim oblicima dijele se na potpuni skok, valoviti skok, potopljeni i površinski skok.

Potpun vodni skok (Slika 11.) je skok u koritu stalnog presjeka i pada, te da bi došlo do pojave potpunog vodnog skoka treba vrijediti odnos $h_2 - h_1 > h_1$ (Agroskin, 1969.).



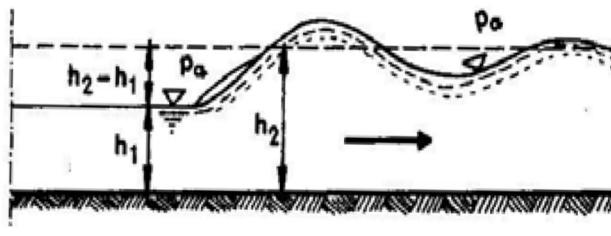
Slika 11. Potpuni vodni skok, (Žic i sur., 2010.)

Promatrajući koja količina gibanja tekućine protječe kroz poprečni presjek vodotoka u jedinici vremena može se odrediti jednadžba potpunog vodnog skoka:

$$\frac{\alpha Q^2}{g A_1} + A_1 h_{c1} = \frac{\alpha Q^2}{g A_2} + A_2 h_{c2} \quad (4.17)$$

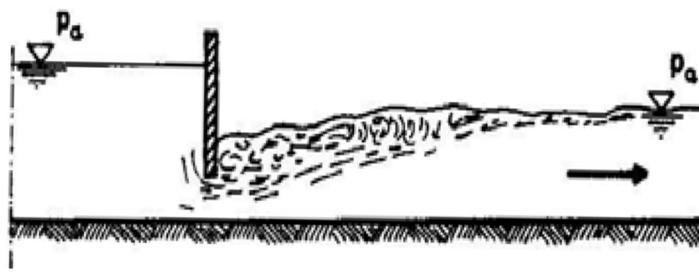
gdje je α Coriolisov koeficijent, te se može pretpostaviti da je on jednak jedinici, Q je protok [m^3/s], A_1 i A_2 su protjecajne površine u presjeku 1-1, odnosno 2-2 [m^2], h_{c1} i h_{c2} su dubine ispod površine vodnog lica na kojoj se nalazi težište protjecajne površine A_1 , odnosno A_2 [m], a g je ubrzanje poja sile teže [m/s^2], (Agroskin, 1969.).

Valoviti skok je skok koji izgleda poput niza postepeno prigušenih valova (Slika 12.). Relativno je male visine, površinska zona nije jako izražena i za valoviti skok vrijedi odnos $h_2 - h_1 < h_1$ (Agroskin, 1969.).



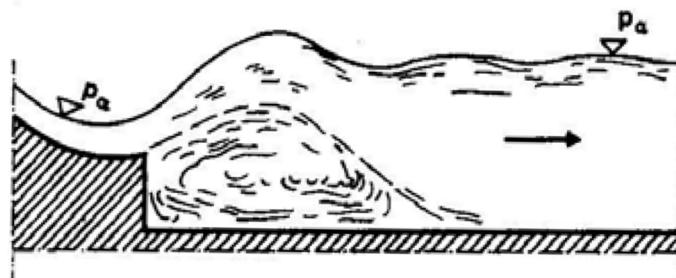
Slika 12. Valoviti vodni skok, (Žic i sur., 2010.)

Potopljeni skok je skok s razvijenom površinskom zonom (Slika 13.). Pojavljuje se kod istjecanja ispod zapornice u obliku površinskog vodnog skoka, (Agroskin, 1969.).



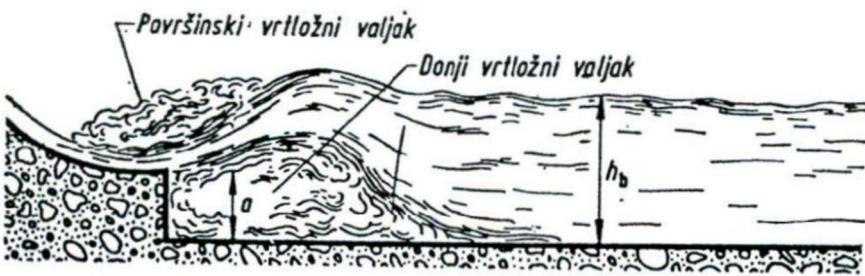
Slika 13. Potopljeni vodni skok, (Žic i sur., 2010.)

Površinski skok je skok s razvijenom površinskom zonom i razvijenim vrtložnim valjkom pri dnu na početku skoka (Slika 14.). Ovaj tip skoka može se pojaviti u bučnici i ispred udarnog (odbojnog) praga, (Agroskin, 1969.).



Slika 14. Slobodni površinski vodni skok, (Žic i sur., 2010.)

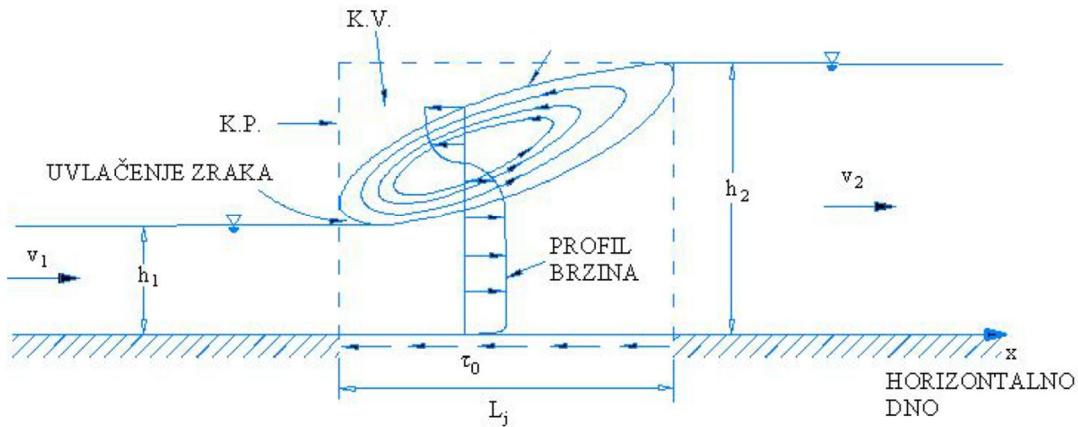
Može biti slobodan ili potopljen (Slika 15.). Oblik površinskog skoka ovisi o dubini donje vode. Povećavanjem donje vode skok će se premještati prema brani te će na gornjoj površini mlaza na mjestu gdje prelazi preko praga nastati površinski vrtložni valjak prikazan na slici 15. To je spajanje u obliku potopljenog površinskog vodnog skoka, (Agroskin, 1969.).



Slika 15. Potopljeni površinski vodni skok, (Žic i sur., 2010.)

5. Disipacija energije u hidrauličkom (vodnom) skoku

Prilikom hidrauličkog skoka dolazi do velike disipacije (gubitka) mehaničke energije ΔE i prekida slobodnog vodnog lica, te pojave turbulentnog toka. Unutar vodnog skoka javlja se prostorno i vremensko pulsiranje tlakova i brzina, te uvlačenje zraka i njegovo miješanje s vodom. Prisustvo zraka u površinskoj zoni skoka, u kojoj su čestice tekućine u složenom gibanju, narušava kontinuitet toka, (Žic i sur., 2010.), slika 16.



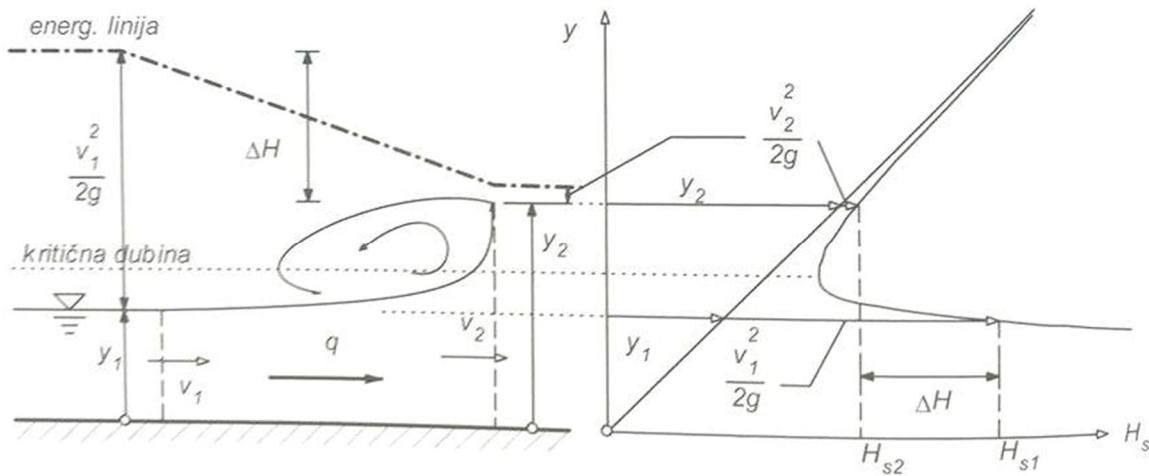
Slika 16. Prikaz profila brzine u vodnom skoku, (Lončar, 2012.)

Prema Joviću (2006.) „veličina disipacije energije u vodnom skoku jednaka je razlici specifičnih energija u spregnutim presjecima“, što se može vidjeti na slici 17.:

$$\Delta E = E_{s1} - E_{s2} \quad (5.1)$$

odnosno:

$$\Delta E = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_2 - \frac{v_2^2}{2g} \quad (5.2)$$

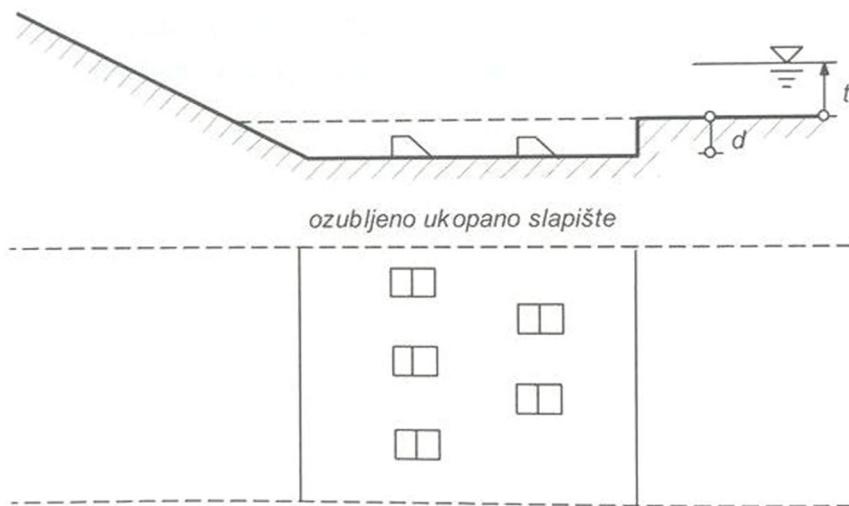


Slika 17. Disipacija energije u vodnom skoku; promjena energije - ΔE (ΔH), spregnute dubine - $h(y)$, (Jović, 2006.)

Disipacijom energije u vodnom skoku uzrokuje se značajno smanjenje brzina i povećanje dubina u nizvodnom dijelu vodotoka, čime se osigurava stabilnost nizvodnog korita (Lončar, 2012.). U nastavku rada biti će prikazane neke od mogućih mjera za sanaciju korita od posljedica oštećenja korita uslijed djelovanja vodnog skoka.

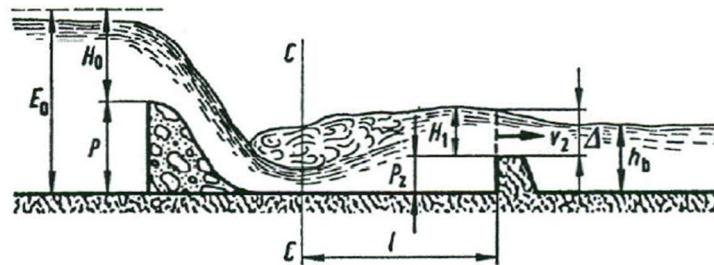
6. Mjere sanacije od oštećenja vodnog skoka

U uvjetima pojave odbačenog vodnog skoka u nizvodnom dijelu vodotoka u cijelom uzvodnom području prije pojave vodnog skoka zadržavaju se velike brzine. Velike brzine ugrožavaju stabilnost pokosa, te prijeti opasnost od erozije korita. Zbog toga je potrebno osigurati da se vodni skok pojavi u obliku normalnog vodnog skoka ili potopljenog vodnog skoka. Ukoliko se nakon nastupa preljeva zbog velikih nagiba dna kanala nizvodne dionice ne mogu osigurati uvjeti potopljenog skoka izvodi se bučnica ili slapište koja osigurava normalan tok nizvodno od slapišta. Bučnica se izvodi na kraju preljevne građevine ukopavaljem ispod kote dna prirodnog korita u obliku bazenskog prostora. U bučnici mogu biti izgrađeni posebni objekti poput pragova, deflektora, disipacijskih zubiju (dissipatori, odbojni blokovi) i sl. Na slici 18. prikazan je nacrt i tlocrt bučnice sa zubima. Osnovni cilj bučnice je kontrola vodnog skoka i pratećih hidrauličkih vrtloga pretvorbom kinetičke energije toka u druge oblike energije. Zbog hidrauličkih problema, statike i dinamičke stabilnosti tijekom vremena bučnice se ubrajaju u najsloženije hidrotehnčke građevine. Za hidraulički proračun bučnice: širinu, dubinu, dužinu, visinu razine vodnog skoka, brzinu vodnog skoka i rasipanje energije u stručnoj literaturi mogu se naći izrazi koji se zasnivaju na hidrauličkim modelskim ispitivanjima u laboratoriju (fizikalni modeli) i u prirodi (terenska mjerjenja), (Stojić, 1998.).



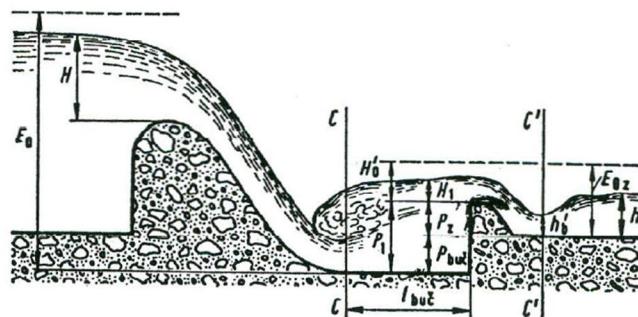
Slika 18. Prikaz bučnice sa disipacijskim zubima, (Jović, 2006.)

Izgradnjom udarnog (odbojnog) zida postiže se ista funkcija koja se postiže bučnicom, Slika 19.



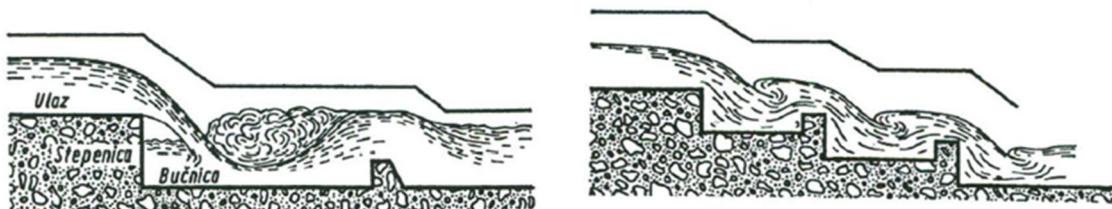
Slika 19. Odbojni zid u funkciji regulacije korita od posljedica vodnog skoka, (Agroskin, 1969.).

U praksi se u slučaju kada izgradnja bučnice zahtjeva jako veliku dubinu, a udarni zid jako veliku visinu izvodi bučnica kombiniranog tipa koja nastaje djelomičnim udubljenjem u slapištu i djelomičnom izvedbom odbojnog zida, (Agroskin, 1969.). Na slici 20. prikazana je kombinacija bučnice i udarnog zida.

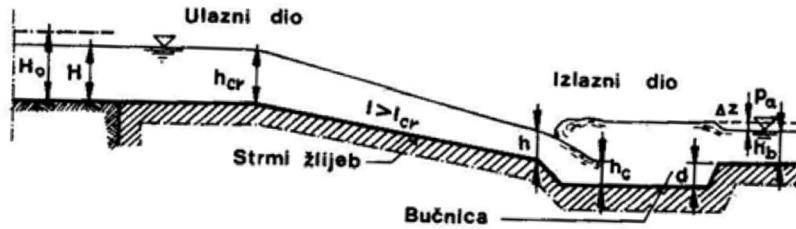


Slika 20. Prikaz kombinacije bučnice i odbojnog zida, (Agroskin, 1969.).

Objekti kojima je osnovni cilj disipacija kinetičke energije vodnog skoka još su stepenice (kaskade, Slika 21.) i brzotoci (Slika 22.). Uglavnom se izvode na tokovima s vrlo naglašenim padom dna tj. na mjestima gdje je na kratkom potezu potrebno savladati veći pad korita (kanala). Kaskade se mogu izvoditi s jednom (slika 21., lijevo) ili više stepenica (slika 21., desno), (Žic i sur., 2010.).

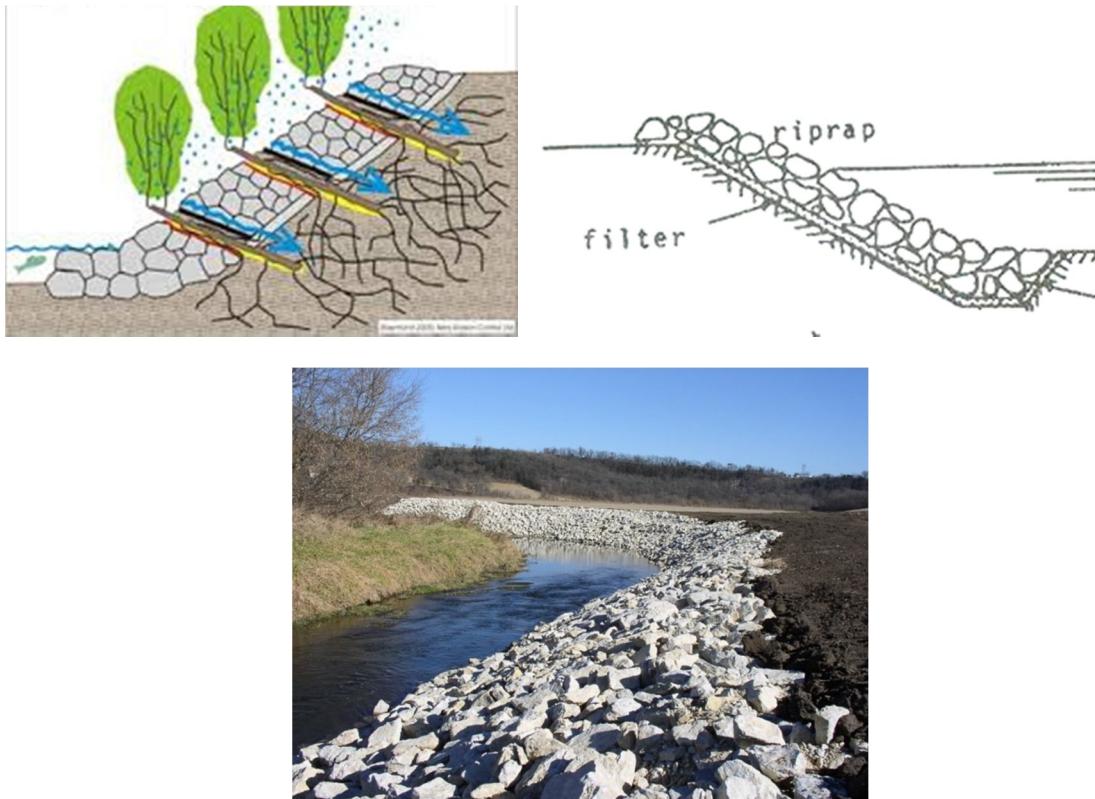


Slika 21. Kaskade s jednom ili više stepnica, (Agroskin, 1969.).



Slika 22. Prikaz brzotoka u svrhu disipacije kinetičke energije kod vodnog skoka, (Žic i sur., 2010.)

Obale kanala mogu se osigurati od djelovanja valova i hidrodinamičkih sila kamenim nabačajem (tzv. „rip-rap“ tehnikom) u slojevima. Kameni nabačaj obično se izvodi u dva sloja različite granulacije i dimenzija. Za gornji sloj mora se odabrati kamen boljih fizičko-mehaničkih svojstava, otporan na djelovanje vode, mraza i sl. Kameni nabačaj (rip-rap) polaže se na filterski sloj koji mora zadovoljiti Terzagijev kriterij filtra (tkz. „filterski kriterij“). Veličina kamena mora biti takva da ga voda ne pokrene i da je stabilan. Za osiguranje obale kanala može se koristiti opeka, betonski prefabricirani elementi, betonske ploče, oblaganje kanala gabionima s biomatom (brzorastuće biljke) i slično, (Stojić, 1998.).



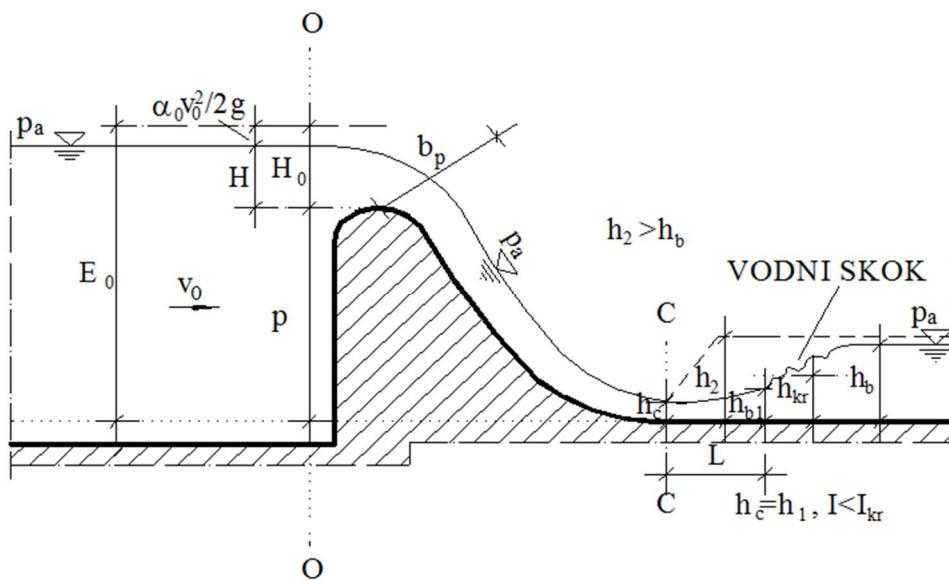
Slika 23. Primjena kamenog nabačaja (rip-rapa) u funkciji zaštite pokosa kanala i zaštite od erozijskog djelovanja, (Stojić, 1998.)

7. Računski dio – Analiza hidrauličkih parametara na preljevu praktičnog profila krivolinijskog obrisa

U nastavku završnog rada prikazan je primjer proračuna spregnutih dubina na preljevu praktičnog profila krivolinijskog obrisa sa ciljem utvrđivanja vrste vodnog skoka te duljine bučnice (slapišta). Na prikazanom primjeru vrši se analiza, odnosno promatra se način promjena vrijednosti prve i druge spregnute dubine h_1 i h_2 , visine preljevnog mlaza H_0 (h_p), specifične energije E_0 , brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini F_{rl} , te duljine bučnice prema Smetani, Silvesteru, Bradley i Peterki, ovisno o promjeni specifičnog protoka q , visine krune preljeva p , širine korita b_p i dubine donje vode h_b . Rezultati analize prikazani su tablično i grafički, te se ispod svakog nalazi objašnjenje promjena vrijednosti parametara.

7.1 Primjer 1. Određivanje spregnutih dubina h_1 i h_2

Za specifični protok $q=6,0 \text{ m}^2/\text{s}$ i vrijednost koeficijenta brzine $\varphi=0,9$ potrebno je odrediti način spajanja gornje vode s donjom vodom preko praktičnog pravokutnog preljeva krivolinijskog obrisa. Ako je poznata visina krune preljeva $p=5,3 \text{ m}$, širina korita $b_p=1,5 \text{ m}$, normalna dubina donje vode $h_b=2,0 \text{ m}$. Vrijednost koeficijenta protoka na preljevu iznosi $m=0,49$, Coriolisov koeficijent $\alpha=1,1$, atmosferski tlak $p_a=0 \text{ Pa}$, dok je konstanta gravitacije $g=9,81 \text{ m/s}^2$. Na dionici preljeva od krune preljeva do prve spregnute dubine gubitci se zanemaruju, $\Delta H_{tr}=0 \text{ m}$.



Visina preljevnog mlaza h_p određuje se iz izraza za određivanje protoka Q preko praktičnog preljeva krivolinijskog obrisa koji glasi:

$$Q = m \cdot b_p \cdot \sqrt{2g} \cdot h_p^{3/2}$$

odnosno vrijedi:

$$h_p = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{m^2 \cdot 2g \cdot b_p^2}}$$

Protok se za dani slučaj određuje preko formulacije:

$$Q = q \cdot b_p = 6,0 \cdot 1,5 = 9,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h_p = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{m^2 \cdot 2g \cdot b_p^2}} = \sqrt[3]{\frac{9,0^2}{0,49^2 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 1,5^2}} = 1,97 \text{ m}$$

Kako bi odredili način spajanja vodnih razina potrebno je odrediti dubinu u suženom (kontrahiranom) presjeku h_c . Dubina u suženom presjeku h_c jednaka je prvoj spregnutoj dubini h_l . Formulu za određivanje dubine u suženom presjeku određuje se pomoću specifične energije E_0 na sljedeći način:

$$E_0 = h_p + p = 1,97 + 5,3 = 7,27 \text{ m}$$

$$E_0 = h_p + p = h_c + \frac{v_c^2}{2g}$$

$$v_c^2 = \frac{Q^2}{A^2} = \frac{q^2 \cdot b_p^2}{b_p^2 \cdot h_c^2} = \frac{q^2}{h_c^2}$$

$$E_0 - h_c = \frac{q^2}{h_c^2 \cdot 2g}$$

$$h_c = \frac{q}{\rho \cdot \sqrt{2g \cdot (E_0 - h_c)}}$$

Iterativnom metodom dolazi se do dubine h_c na početku vodnog skoka. Pretpostavljamo vrijednost dubine u suženom (kontrahiranom) presjeku $h_c=0,56$ m.

$$h_c = \frac{q}{\rho \cdot \sqrt{2g \cdot (E_0 - h_c)}} = \frac{6,0}{0,9 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (7,27 - 0,56)}} = 0,581 \text{ m}$$

$$h_c = 0,58 \neq 0,56 \text{ m}$$

Druga pretpostavka: $h_c = 0,577 \text{ m}$

$$h_c = \frac{q}{\rho \cdot \sqrt{2g \cdot (E_0 - h_c)}} = \frac{6,0}{0,9 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (7,27 - 0,577)}} = 0,582 \text{ m}$$

$$h_c = 0,582 \neq 0,577 \text{ m}$$

Treća pretpostavka: $h_c = 0,580 \text{ m}$

$$h_c = \frac{q}{\rho \cdot \sqrt{2g \cdot (E_0 - h_c)}} = \frac{6,0}{0,9 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (7,27 - 0,58)}} = 0,582 \text{ m}$$

Usvaja se $h_c = h_I = 0,58 \text{ m}$.

Brzina v_I na početku vodnog skoka tj. na prvoj spregnutoj dubini h_I iznosi:

$$v_I = \frac{Q}{A} = \frac{q \cdot b_p}{h_1 \cdot b_p} = \frac{q}{h_1} = \frac{6,0}{0,58} = 10,34 \text{ m/s}$$

Froudeov broj F_{rI} na prvoj spregnutoj dubini iznosi:

$$F_{rI} = \frac{\alpha \cdot v_I^2}{h_c \cdot g} = \frac{1,1 \cdot 10,34^2}{0,58 \cdot 9,81} = 20,69$$

Druga spregnuta dubina h_2 iznosi:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8 \cdot F_{rI}} - 1) = \frac{0,58}{2} (\sqrt{1 + 8 \cdot 20,69} - 1) = 3,45 \text{ m} > h_b = 2,0 \text{ m}$$

Na temelju odnosa druge spregnute dubine i dubine donje vode zaključuje se da će se spajanje gornje i donje vode izvršiti u obliku odbačenog vodnog skoka. Zbog pojave velikih brzina (velike kinetičke energije) kod odbačenog vodnog skoka korito ili kanal je potrebno zaštiti kako bi se smanjila erozijska djelovanja i mogućnost podlokavanja temelja preljeva. Zaštita kanala postiže se dimenzioniranjem slapišta ili bučnice čime dolazi do formiranja potopljenog vodnog skoka. Osim izvođenja slapišta ili bučnice moguća je zaštita primjenom odbojnih zidova, betonskih blokova (disipatora energije) ili kombinacijom navedenih objekata.

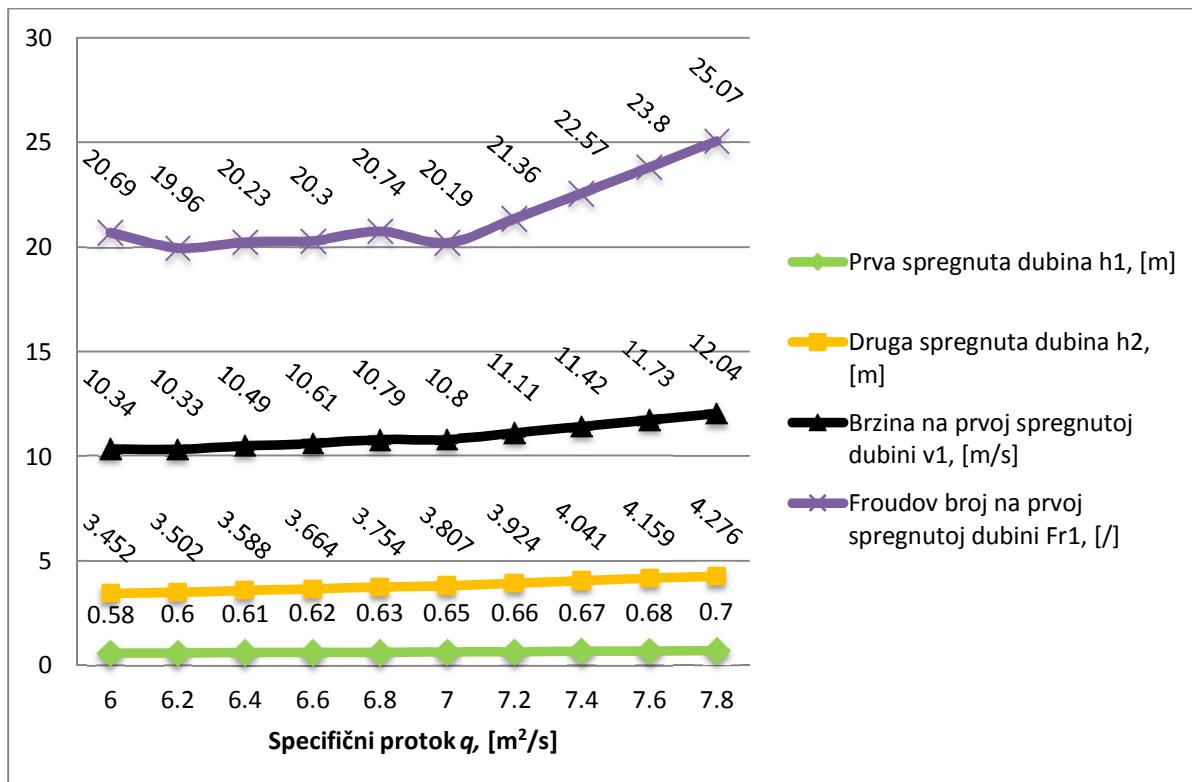
7.2 Podprimjer 1.1 - Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka i preljevnog praga

Na temelju prethodnog primjera napravljena je analiza promjena vrijednosti prve i druge spregnute dubine h_1, h_2 , visine preljevnog mlaza h_p , specifične energije E_0 , brzina na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeov broj na prvoj spregnutoj dubini Fr_{rl} . Ukoliko se promatra specifični protok u granicama od $q = 6 \text{ m}^2/\text{s}$ do $q = 7,8 \text{ m}^2/\text{s}$ i visina krune preljeva u granicama $p = 5,3 \text{ m}$ do $p = 6,2 \text{ m}$. Sljedeće geometrijske veličine ostaju nepromijenjene: koeficijent brzine φ , širina korita b_p , dubina donje vode h_b , koeficijent protoka preljeva m , Coriolisov koeficijent α .

Tablica 2. Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka q i visine krune preljeva p

	q	φ	p	b_p	h_b	m	α	h_p	E_0	h_1	h_2	v_1	Fr_{rl}
	[m^2/s]	[/]	[m]	[m]	[m]	[/]	[/]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[/]
1	6	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	1,970	7,270	0,58	3,452	10,34	20,69
2	6,2	0,9	5,4	1,5	2	0,49	1,1	2,013	7,413	0,6	3,502	10,33	19,96
3	6,4	0,9	5,5	1,5	2	0,49	1,1	2,056	7,556	0,61	3,588	10,49	20,23
4	6,6	0,9	5,6	1,5	2	0,49	1,1	2,099	7,699	0,62	3,664	10,61	20,3
5	6,8	0,9	5,7	1,5	2	0,49	1,1	2,141	7,841	0,63	3,754	10,79	20,74
6	7	0,9	5,8	1,5	2	0,49	1,1	2,183	7,983	0,65	3,807	10,8	20,19
7	7,2	0,9	5,9	1,5	2	0,49	1,1	2,224	8,124	0,66	3,924	11,11	21,36
8	7,4	0,9	6	1,5	2	0,49	1,1	2,265	8,265	0,67	4,041	11,42	22,57
9	7,6	0,9	6,1	1,5	2	0,49	1,1	2,306	8,406	0,68	4,159	11,73	23,8
10	7,8	0,9	6,2	1,5	2	0,49	1,1	2,346	8,546	0,7	4,276	12,04	25,07

Iz tablice 2. može se zaključiti da promjenom, odnosno povećavanjem vrijednosti specifičnog protoka i visine krune preljeva dolazi do povećavanja svih promatranih parametara: vrijednosti prve $h_1(h_c)$ i druge spregnute dubine h_2 , visine preljevnog mlaza h_p , specifične energije E_0 , brzina na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeov broj na prvoj spregnutoj dubini Fr_{rl} . Također iz tablice 2. se može jasno odrediti vrsta vodnog skoka u ovisnosti od položaja vodnog skoka u odnosu na objekt iz odnosa dubine donje vode h_b i druge spregnute dubine h_2 . Dolazi do odbačenog vodnog skoka ukoliko vrijedi $h_2 > h_b$, odnosno do potopljenog vodnog skoka ako vrijedi $h_2 < h_b$. Normalni vodni skok javlja se ukoliko vrijedi $h_2 = h_b$.



Slika 24. Grafički prikaz ovisnosti promjene prve h_1 i druge spregnute dubine h_2 , brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini Fr_1 o promjeni specifičnog protoka q

Odnos promjena vrijednosti prve $h_1(h_c)$ i druge spregnute dubine h_2 , brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini Fr_1 ovisno o promjeni specifičnog protoka q prikazan je na slici 24. Može se uočiti da se za maksimalnu vrijednost specifičnog protoka $q=7,8 \text{ m}^2/\text{s}$ dobije maksimalna vrijednost prve spregnute dubine $h_1=0,7 \text{ m}$ kao i druge spregnute dubine $h_2=4,28 \text{ m}$. Također, isto vrijedi za brzinu na prvoj spregnutoj dubini $v_1=12,04 \text{ m/s}$ i Froudeov broj na prvoj spregnutoj dubini $Fr_1=25,07$.

7.3 Podprimjer 1.2 – Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni širini preljeva i koeficijenta protoka preljeva

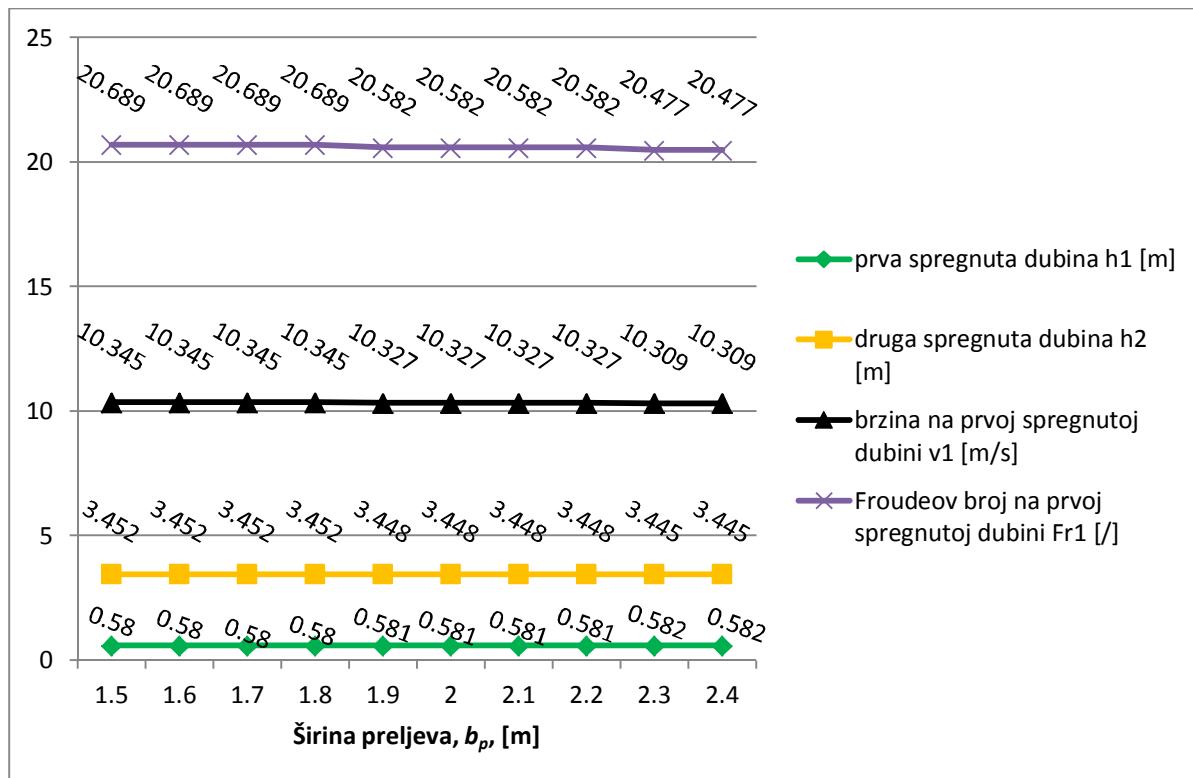
U ovom podprimjeru napravljena je analiza promjena vrijednosti prve i druge spregnute dubine h_1, h_2 , visine preljevnog mlaza h_p , specifične energije E_0 , brzina na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeov broj na prvoj spregnutoj dubini Fr_1 . U ovom podprimjeru se promatra varijabilnost širine korita u granicama od $b_p = 1,5 \text{ m}$ do $b_p = 2,4 \text{ m}$, te koeficijenta protoka preljeva m u granicama od 0,47 do 0,49. Sljedeće geometrijske veličine ostaju

nepromijenjene: specifični protok q , koeficijent brzine φ , visina krune preljeva p , dubina donje vode h_b , te Coriolisov koeficijent α .

Tablica 3. Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni širine preljeva b_p i koeficijenta protoka preljeva m

	q	φ	p	b_p	h_b	m	α	h_p	E_0	h_1	h_2	v_1	Fr_1
	[m ² /s]	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[-]
1	6	0,9	5,3	1,5	2	0,472	1,1	2,019	7,319	0,58	3,452	10,345	20,689
2	6	0,9	5,3	1,6	2	0,474	1,1	2,014	7,314	0,58	3,452	10,345	20,689
3	6	0,9	5,3	1,7	2	0,476	1,1	2,008	7,308	0,58	3,452	10,345	20,689
4	6	0,9	5,3	1,8	2	0,478	1,1	2,003	7,303	0,58	3,452	10,345	20,689
5	6	0,9	5,3	1,9	2	0,48	1,1	1,997	7,297	0,581	3,448	10,327	20,582
6	6	0,9	5,3	2	2	0,482	1,1	1,991	7,291	0,581	3,448	10,327	20,582
7	6	0,9	5,3	2,1	2	0,484	1,1	1,986	7,286	0,581	3,448	10,327	20,582
8	6	0,9	5,3	2,2	2	0,486	1,1	1,981	7,281	0,581	3,448	10,327	20,582
9	6	0,9	5,3	2,3	2	0,488	1,1	1,975	7,275	0,582	3,445	10,309	20,477
10	6	0,9	5,3	2,4	2	0,49	1,1	1,970	7,270	0,582	3,445	10,309	20,477

Promatrajući tablicu 3. zaključuje se da promjena, odnosno povećavanje vrijednosti širine preljeva i koeficijenta protoka preljeva utječe na povećanje prve spregnute dubine $h_1(h_c)$, dok dolazi do smanjenja visine preljevnog mlaza h_p , specifične energije E_0 i druge spregnute dubine h_2 . Povećanje prve spregnute dubine rezultira smanjenjem brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini Fr_1 .



Slika 25. Grafički prikaz ovisnosti promjene prve h_1 i druge spregnute dubine h_2 , brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini Fr_1 o promjeni specifičnog protoka q i koeficijenta protoka m

Odnos promjena vrijednosti prve $h_1(h_c)$ i druge spregnute dubine h_2 , brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini Fr_1 ovisno o promjeni vrijednosti širine preljeva i koeficijenta protoka preljeva prikazan je na slici 25. Maksimalna vrijednost prve spregnute dubine $h_1=0,582$ m dobije se za maksimalnu vrijednost širine preljeva $b_p=2,4$ m. Za istu vrijednost širine preljeva dobije se najmanja vrijednost druge spregnute dubine $h_2=3,445$ m. Također, isto vrijedi za brzinu na prvoj spregnutoj dubini $v_1=10,309$ m/s i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini $Fr_1=20,477$. Oburnuto za najmanju vrijednost širine preljeva $b_p=1,5$ m dobije se najmanja veličina prve spregnute dubine $h_1=0,58$ m, odnosno najveća veličina druge sprenute dubine $h_2=3,452$ m. Za istu vrijednost širine preljeva dobiju se maksimalne veličine brzine na prvoj spregnutoj dubini $v_1=10,345$ m/s i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini $Fr_1=20,689$.

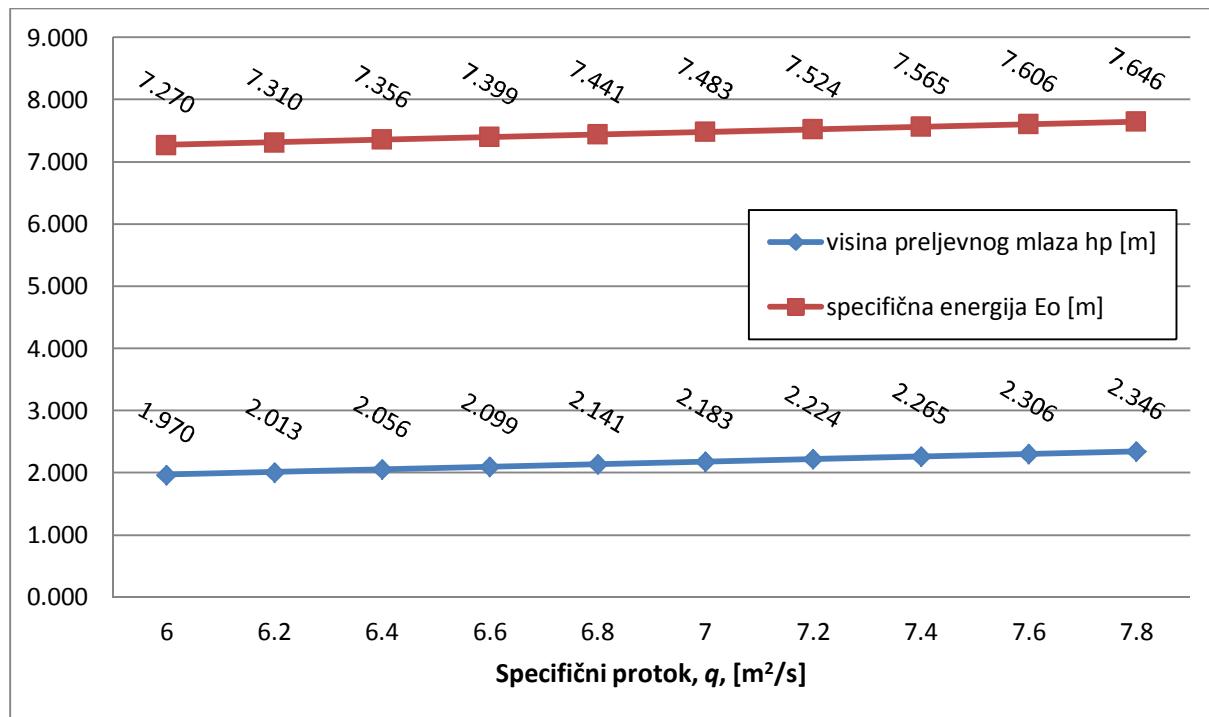
7.4 Podprimjer 1.3 – Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka i dubine donje vode

U ovom podprimjeru napravljena je analiza promjena vrijednosti prve i druge spregnute dubine h_1, h_2 , visine preljevnog mlaza h_p , specifične energije E_o , brzina na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeov broj na prvoj spregnutoj dubini Fr_{rl} , ukoliko se promatra dubina donje vode u granicama od $h_b = 2,0$ m do $h_b = 2,9$ m i specifični protok u granicama od $q = 6 \text{ m}^2/\text{s}$ do $q = 7,8 \text{ m}^2/\text{s}$. Sljedeće geometrijske veličine ostaju nepromijenjene: koeficijent brzine φ , visina krune preljeva p , širina korita b_p , koeficijent protoka preljeva m , te Coriolisov koeficijent α .

Tablica 4. Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka q i dubini donje vode h_b

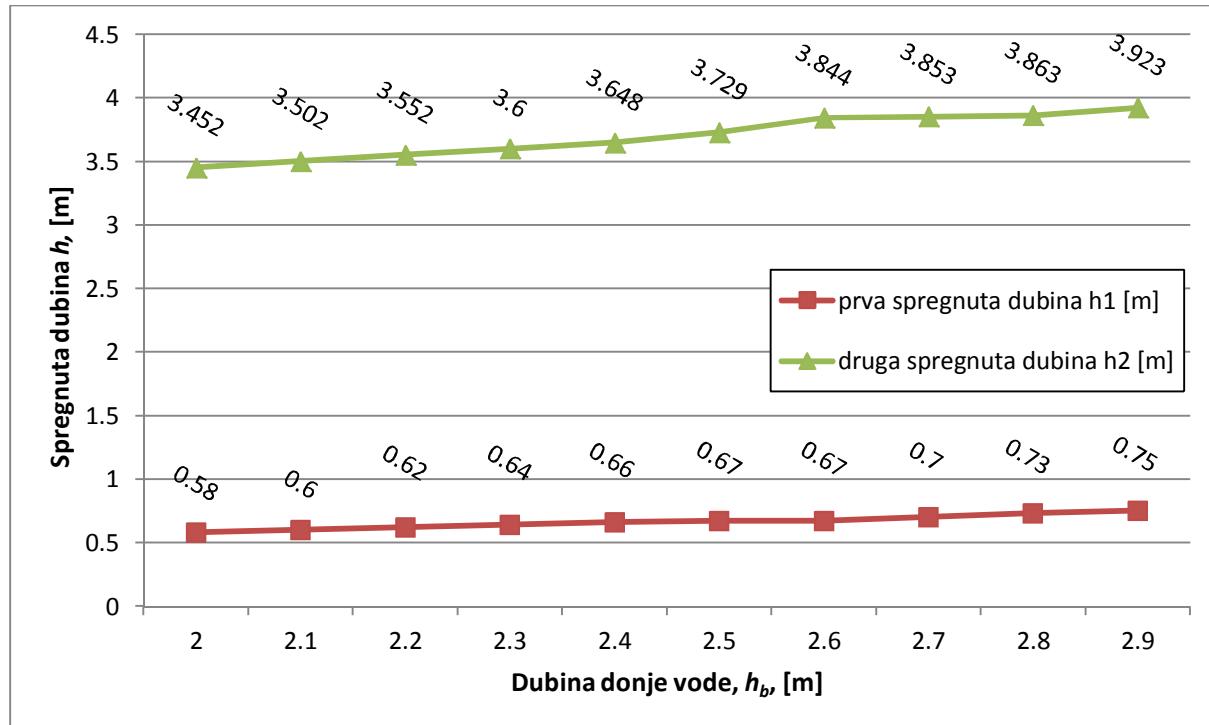
	q	φ	p	b_p	h_b	m	α	h_p	E_o	h_1	h_2	v_1	Fr_{rl}
	[m^2/s]	[/]	[m]	[m]	[m]	[/]	[/]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[/]
1	6	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	1,970	7,270	0,58	3,452	10,31	20,48
2	6,2	0,9	5,3	1,5	2,1	0,49	1,1	2,013	7,313	0,6	3,502	10,33	19,96
3	6,4	0,9	5,3	1,5	2,2	0,49	1,1	2,056	7,356	0,62	3,552	10,34	19,36
4	6,6	0,9	5,3	1,5	2,3	0,49	1,1	2,099	7,399	0,64	3,6	10,36	18,89
5	6,8	0,9	5,3	1,5	2,4	0,49	1,1	2,141	7,441	0,66	3,648	10,38	18,45
6	7	0,9	5,3	1,5	2,5	0,49	1,1	2,183	7,483	0,67	3,729	10,4	18,02
7	7,2	0,9	5,3	1,5	2,6	0,49	1,1	2,224	7,524	0,67	3,844	10,42	17,62
8	7,4	0,9	5,3	1,5	2,7	0,49	1,1	2,265	7,565	0,7	3,853	10,44	17,23
9	7,6	0,9	5,3	1,5	2,8	0,49	1,1	2,306	7,606	0,73	3,863	10,45	16,85
10	7,8	0,9	5,3	1,5	2,9	0,49	1,1	2,346	7,646	0,75	3,923	10,47	16,49

Iz tablice 4. može se zaključiti da uslijed povećavanja vrijednosti specifičnog protoka i dubine donje vode dolazi do povećavanja sljedećih promatranih parametara: vrijednosti prve $h_1(h_c)$ i druge spregnute dubine h_2 , visine preljevnog mlaza h_p i specifične energije E_o . Povećanjem prve spregnute dubine dolazi do smanjenja vrijednosti brzine v_1 na prvoj spregnutoj dubini i Froudeovog broja Fr_{rl} na prvoj spregnutoj dubini. Ovisno o položaju vodnog skoka u odnosu na objekt iz odnosa dubine donje vode h_b i druge spregnute dubine h_2 može se odrediti vrsta vodnog skoka.



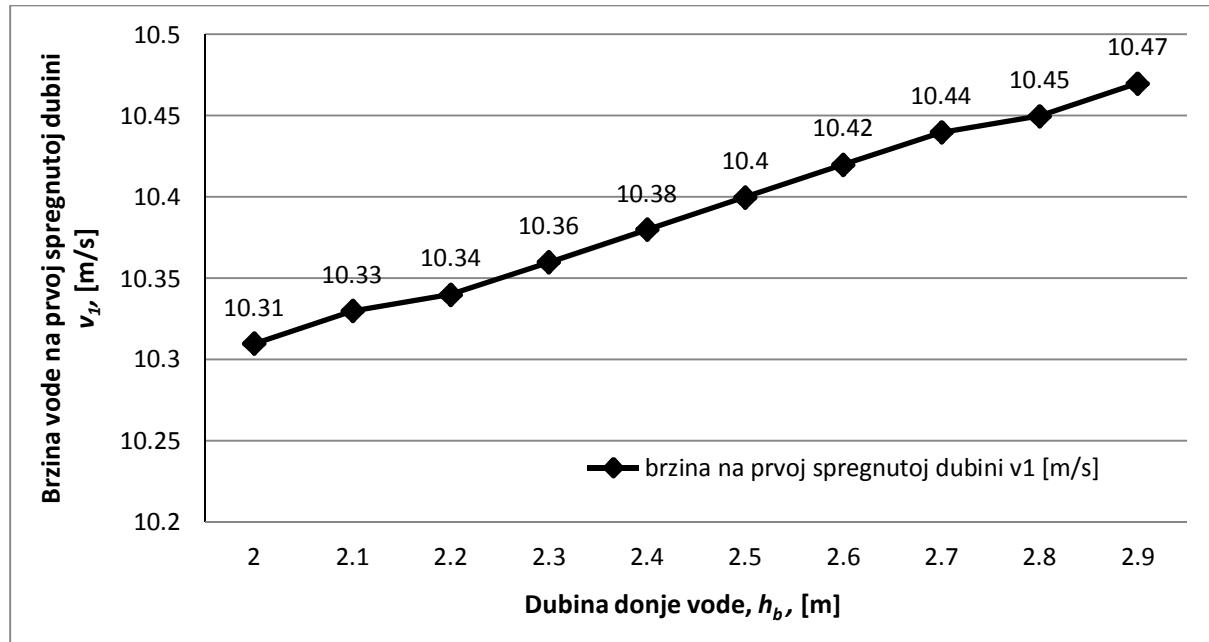
Slika 26. Grafički prikaz ovisnosti promjene visine preljevnog mlaza h_p i specifične energije E_0 o promjeni specifičnog protoka q i dubini donje vode h_b

Odnos promjene visine preljevnog mlaza i specifične energije ovisno o promjeni specifičnog protoka prikazan je na slici 26. Iz iste se vidi da se za maksimalni specifični protok $q=7,8 \text{ m}^2/\text{s}$ dobije maksimalna vrijednost visine preljevnog mlaza $h_b=2,346 \text{ m}$ kao i maksimalna vrijednost specifične energije $E_0=7,646 \text{ m}$. Sukladno tome se za minimalni specifični protok $q=6 \text{ m}^2/\text{s}$ dobije minimalna vrijednost visine preljevnog mlaza $h_b=1,97 \text{ m}$ i specifične energije $E_0=7,27 \text{ m}$.

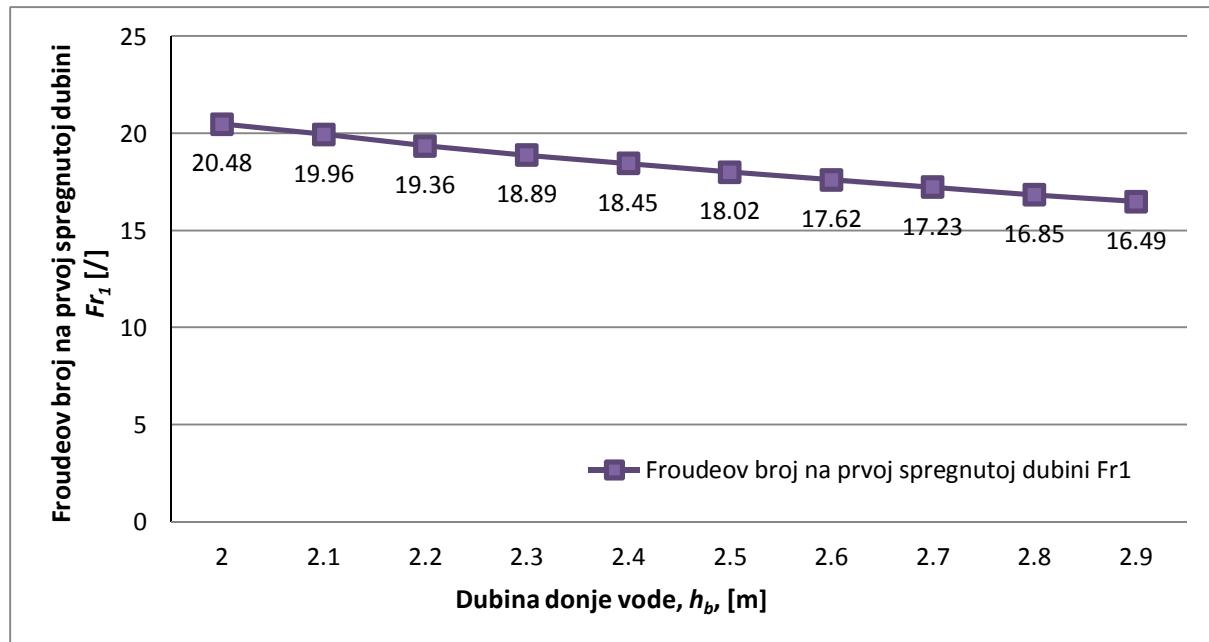


Slika 27. Grafički prikaz ovisnosti promjene prve i druge spregnute dubine h_1, h_2 o promjeni specifičnog protoka q i dubine donje vode h_b

Odnos promjene prve i druge spregnute dubine ovisno o promjeni specifičnog protoka i dubine donje vode prikazan je na slici 26. Iz iste se vidi da se za maksimalnu dubinu donje vode $h_b=2,9$ m dobije maksimalna vrijednost prve $h_1=0,75$ m, odnosno druge spregnute dubine $h_2=3,923$ m. Sukladno tome se za minimalnu dubinu donje vode $h_b=2$ m dobije minimalna vrijednost prve $h_1=0,58$ m i druge spregnute dubine $h_2=3,452$ m.



a)



b)

Slika 28. Grafički prikaz promjene a) brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 i b) Froudeovog broja Fr_1 na prvoj spregnutoj dubini ovisno o promjeni specifičnog protoka q i dubine donje vode h_b

Na slici 28. a) prikazana je promjena brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 ovisno o promjeni specifičnog protoka q i dubine donje vode h_b . Povećavanjem dubine donje vode i specifičnog protoka dolazi do povećanja brzine na prvoj spregnutoj dubini. Promjena Froudeovog broja

F_{rl} na prvoj spregnutoj dubini ovisno o promjeni specifičnog protoka q i dubine donje vode h_b prikazana je na slici 28.b). Povećavanjem dubine donje vode h_b i specifičnog protoka q dolazi do smanjenja Froudeovog broja F_{rl} . Za dubinu donje vode $h_b=2,9$ m brzina na prvoj spregnutoj dubini iznosi $v_l=10,47$ m/s koja je ujedno i najveća brzina, dok za istu vrijednost dubine donje vode Froudeov broj na prvoj spregnutoj dubini iznosi $F_{rl}=16,49$, što je najmanja vrijednost Froudeovog broja. Sukladno za vrijednost dubine donje vode $h_b=2$ m brzina na prvoj spregnutoj dubini je minimalna i iznosi $v_l=10,31$ m/s, a Froudeov broj na prvoj spregnutoj dubini je maksimalan i iznosi $F_{rl}=20,48$.

7.5 Primjer 2. Određivanje duljine vodnog skoka i duljine bučnice

Iako postoji mnogo izraza za određivanje duljine vodnog skoka u horizontalnom pravokutnom koritu u zadatku pod Primjerom 1. koriste se najpoznatiji izrazi koji se koriste u praksi:

a) po Smetani:

$$L_s \approx 6(h_2 - h_1) = 6 \cdot (3,45 - 0,58) = 17,22 \text{ m}$$

b) po Bradley i Peterki:

$$L_s = 6,1h_2 \quad \text{za } 25 < F_{rl} < 200$$

$$L_s = h_2(1,1 + 2F_{rl} - 0,2F_{rl}) \quad \text{za } 2,25 < F_{rl} < 25$$

Kako je u ovom slučaju $F_{rl}=20,69$ primjenjujemo drugi izraz:

$$L_s = h_2(1,1 + 2F_{rl} - 0,2F_{rl}) = 3,45(1,1 + 2 \cdot 20,69 - 0,2 \cdot 20,69) = 132,28 \text{ m}$$

c) po Silvesteru:

$$L_s = 9,75h_1(\sqrt{F_{rl}} - 1)^{1,01} = 9,75 \cdot 0,58(\sqrt{20,69} - 1)^{1,01} = 20,32 \text{ m}$$

Duljina slapišta (bučnice) za ovakav tip objekta jednak je vrijednosti duljine vodnog skoka uvećanog za 10%. Prema tome, duljine slapišta prema gornjim izrazima iznose:

$$L_{slap.Smetana} \approx 1,1 \cdot 17,22 = 18,94 \text{ m}$$

$$L_{slap.Bradley.Peterka} \approx 1,1 \cdot 132,28 = 145,51 \text{ m}$$

$$L_{\text{slap.Silvestera}} \approx 1,1 \cdot 20,32 = 22,35 \text{ m}$$

7.6 Podprimjer 2.1. Određivanje duljine bučnice u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka

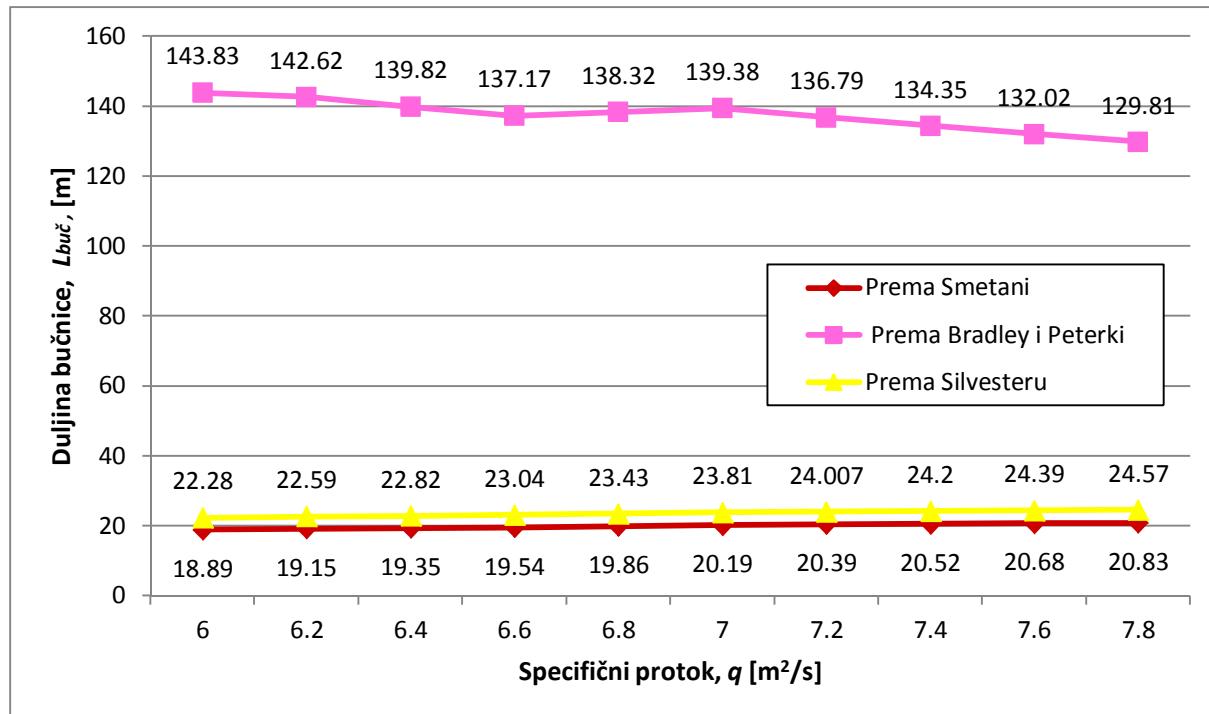
Na temelju Primjera 1. i 2. napravljena je analiza promjena vrijednosti prve i druge spregnute dubine h_1, h_2 , visine preljevnog mlaza h_p , specifične energije E_o , brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 , Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini Fr_1 i duljine bučnice prema izrazima po Smetani, Bradley i Peterki, te Silvesteru. Promatra se specifični protok u granicama od $q=6 \text{ m}^2/\text{s}$ do $q=7,8 \text{ m}^2/\text{s}$, dok su sljedeće geometrijske veličine nepromijenjene: koeficijent brzine φ , visina preljevnog praga p , širina korita b_p , dubina donje vode h_b , koeficijent protoka preljeva m , te Coriolisov koeficijent α .

Tablica 5. Određivanje duljine bučnice $L_{buč.}$ u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka q

	q [m^2/s]	φ [$/$]	p [m]	b_p [m]	h_b [m]	m [$/$]	α [$/$]	h_p [m]	E_o [m]	h_1 [m]	h_2 [m]	v_1 [m/s]	Fr_1 [$/$]
1	6	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	1,970	7,270	0,58	3,44	10,31	20,47
2	6,2	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	2,013	7,313	0,6	3,5	10,33	19,95
3	6,4	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	2,056	7,356	0,62	3,55	10,32	19,27
4	6,6	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	2,099	7,399	0,64	3,6	10,31	18,63
5	6,8	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	2,141	7,441	0,66	3,66	10,38	18,45
6	7	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	2,183	7,483	0,67	3,73	10,45	18,27
7	7,2	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	2,224	7,524	0,69	3,77	10,43	17,69
8	7,4	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	2,265	7,565	0,71	3,82	10,42	17,16
9	7,6	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	2,306	7,606	0,73	3,86	10,41	16,65
10	7,8	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	2,346	7,646	0,75	3,91	10,4	16,17

Duljina bučnice, $L_{buč.}$ [m]			
	Smetana	Bradley i Peterka	Silvester
1	18,89	143,83	22,28
2	19,15	142,62	22,59
3	19,35	139,82	22,82
4	19,54	137,17	23,04
5	19,86	138,32	23,43
6	20,19	139,38	23,81
7	20,39	136,79	24,01
8	20,52	134,35	24,20
9	20,68	132,02	24,39
10	20,83	129,81	24,57

Iz tablice 5. zaključuje se da se uslijed povećanja specifičnog protoka duljina bučnice prema izrazima Smetene i Silvestera povećavaju, dok se duljina bučnice prema izrazu Bradleya i Peterke smanjuje.



Slika 29. Grafički prikaz promjene duljine bučnice prema izrazima Smetene, Bradleya i Peterke, te Silvesteru u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka q

Utjecaj promjene specifičnog protoka q na promjenu duljine bučnice prema izrazima Smetane, Bradleya i Peterke, te Silvestera prikazan je na slici 29. Sa slike se uočava da se duljine bučnica dobivene po formulama Silvestera i Smetane približno jednake, dok se duljine bučnica prema formulama Bradleya i Peterke znatno razlikuju. Duljina bučnice prema izrazu Smetane za specifični protok $q=6 \text{ m}^2/\text{s}$ iznosi 18,89 m, što je ujedno i najmanja veličina duljine bučnice. Za isti specifični protok duljina bučnice prema izrazu Bradleya i Peterke iznosi 143,83 m što je najveća vrijednost duljine bučnice ukoliko se promatraju sve promatrane varijacije. Duljina bučnice za specifični protok $q=7,8 \text{ m}^2/\text{s}$ iznosi od 20,83 do 24,57 m ukoliko se promatraju izrazi prema Smetani i Silvesteru, dok prema izrazu Bradleya i Peterke duljina bučnice za isti specifični protok iznosi 129,81 m.

7.7 Podprimjer 2.2. Određivanje duljine bučnice u ovisnosti o promjeni visine preljevnog praga

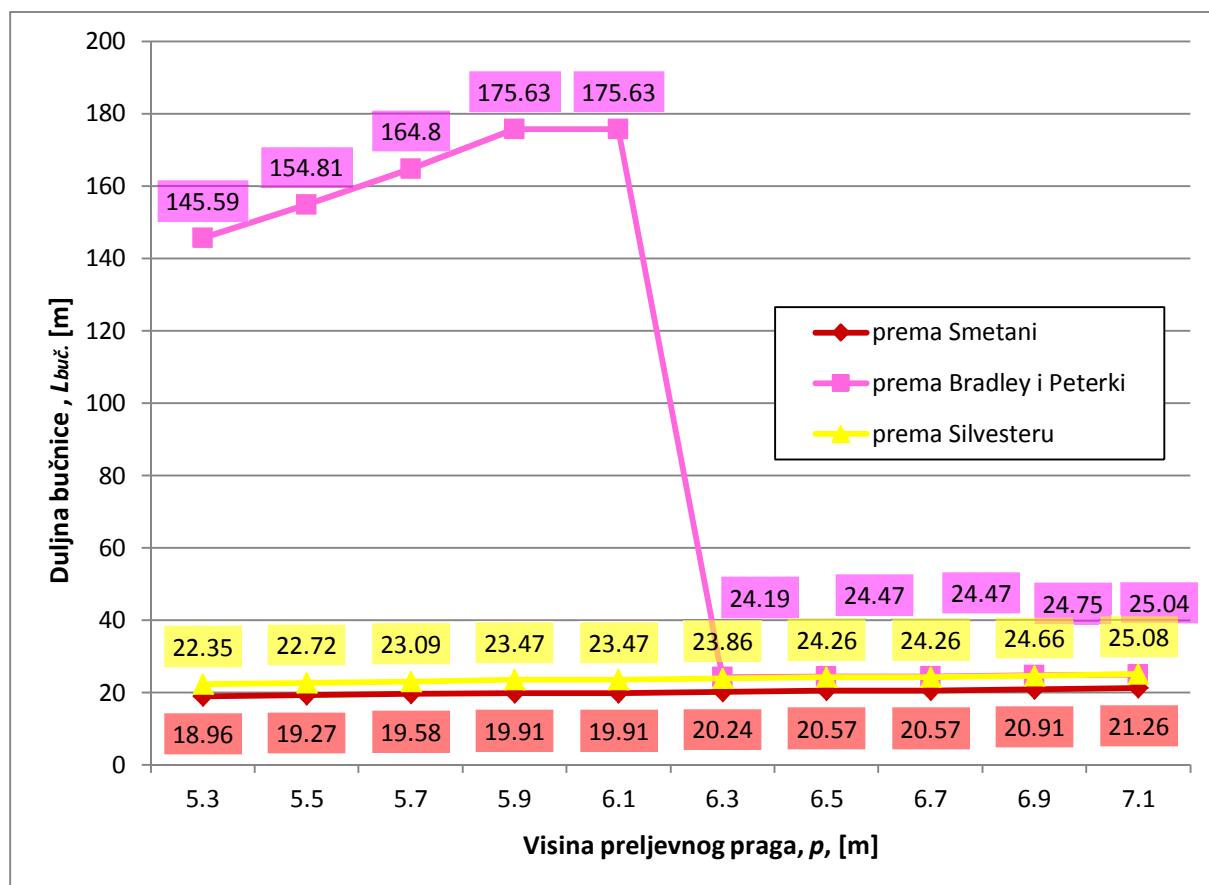
Na temelju Primjera 1. i 2. napravljena je analiza promjena vrijednosti prve i druge spregnute dubine h_1, h_2 , visine preljevnog mlaza h_p , specifične energije E_o , brzina na prvoj spregnutoj dubini v_1 , Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini Fr_1 i duljine bučnice prema izrazima po Smetani, Bradleyu i Peterki, te Silvesteru. Promatra se visina preljevnog praga u granicama od $p=5,3$ m do $p=7,1$ m, dok su sljedeće geometrijske veličine nepromijenjene: specifični protok q , koeficijent brzine φ , širina korita b_p , dubina donje vode h_b , koeficijent protoka preljeva m , te Coriolisov koeficijent α .

Tablica 6. Određivanje duljine bučnice $L_{buč.}$ u ovisnosti o promjeni visine preljevnog praga p

	q	φ	p	b_p	h_b	m	α	h_p	E_o	h_1	h_2	v_1	Fr_1
	[m ² /s]	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[-]
1	6	0,9	5,3	1,5	2	0,49	1,1	1,970	7,270	0,58	3,45	10,35	20,69
2	6	0,9	5,5	1,5	2	0,49	1,1	1,970	7,370	0,57	3,48	10,53	21,79
3	6	0,9	5,7	1,5	2	0,49	1,1	1,970	7,670	0,56	3,53	10,71	22,98
4	6	0,9	5,9	1,5	2	0,49	1,1	1,970	7,870	0,55	3,56	10,91	24,24
5	6	0,9	6,1	1,5	2	0,49	1,1	1,970	8,070	0,55	3,56	10,91	24,24
6	6	0,9	6,3	1,5	2	0,49	1,1	1,970	8,270	0,54	3,61	11,11	25,64
7	6	0,9	6,5	1,5	2	0,49	1,1	1,970	8,470	0,53	3,65	11,32	27,11
8	6	0,9	6,7	1,5	2	0,49	1,1	1,970	8,670	0,53	3,65	11,32	27,11
9	6	0,9	6,9	1,5	2	0,49	1,1	1,970	8,870	0,52	3,67	11,54	28,71
10	6	0,9	7,1	1,5	2	0,49	1,1	1,970	9,070	0,51	3,73	11,76	30,43

Duljina bučnice, $L_{buč.}$ [m]		
Smetana	Bradley i Peterka	Silvester
1	18,96	145,59
2	19,27	154,81
3	19,58	164,8
4	19,91	175,63
5	19,91	175,63
6	20,24	24,19
7	20,57	24,47
8	20,57	24,47
9	20,91	24,75
10	21,26	25,04

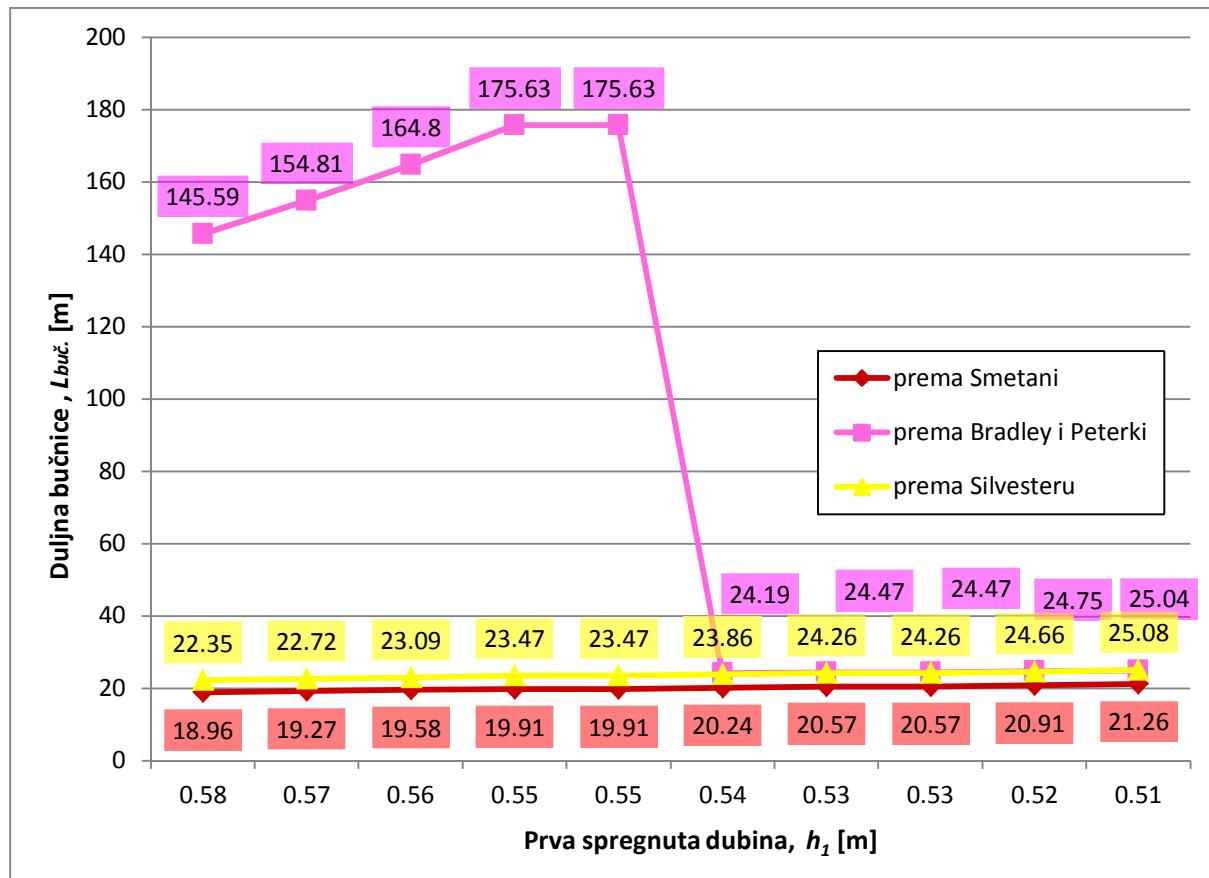
Iz tablice 6. zaključuje se da se uslijed povećanja specifičnog protoka duljina bučnice prema izrazima Smetene i Silvestera povećavaju, dok se duljina bučnice prema izrazu Bradleya i Peterke pri visini preljevnog praga od $p=5,3$ m do $p=6,1$ m smanjuje, a pri visini preljevnog praga od $p=6,3$ m do $p=7,1$ m se povećava. Do toga dolazi zbog Froudeovog broja Fr , odnosno potrebe za korištenjem druge formulacije iz izraza Bradleya i Peterke kada je vrijednost $25 < Fr < 200$. Na taj način uočava se mjerodavnost izraza Bradleya i Peterke koji je pritom puno realniji u odnosu na druge dobivene vrijednosti za duljinu bučnice (prema Smetani i Silvesteru), Slika 30.



Slika 30. Grafički prikaz promjene duljine bučnice prema izrazima Smetene, Bradleya i Peterke, te prema Silvesteru ovisnosti o promjeni visine preljevnog praga p

Utjecaj promjene visine preljevnog praga p na promjenu duljine bučnice prema izrazima Smetene, Bradleya i Peterke, te Silvestera prikazan je na slici 30. Sa slike se može uočiti da se duljine bučnica dobivene po formulama Silvestera i Smetane približno jednake, dok se duljine bučnica prema formulama Bradleya i Peterke znatno razlikuju do visine preljevnog praga $p=6,1$ m. Nakon iste visine preljevnog praga razlike između duljina bučnice postaju

minimalne. Za visinu preljevnog praga $p=7,1$ m duljine bučnica kreću se u rasponu od $L_{buč}=21,26$ m do $L_{buč}=25,04$ m. Nagli pad pravca promjene duljine bučnice prema Bradleyu i Peterki događa se zbog Froudeovog broja. Duljina bučnice prema izrazu Smetane za visinu preljevnog praga $p=5,3$ m iznosi 18,96 m, što je ujedno i najmanja veličina duljine bučnice. Za isti specifični protok duljina bučnice prema izrazu Bradleya i Peterke iznosi 145,59 m što je najveća vrijednost duljine bučnice ukoliko se promatraju sve moguće varijacije (razmatrani podprimjeri).

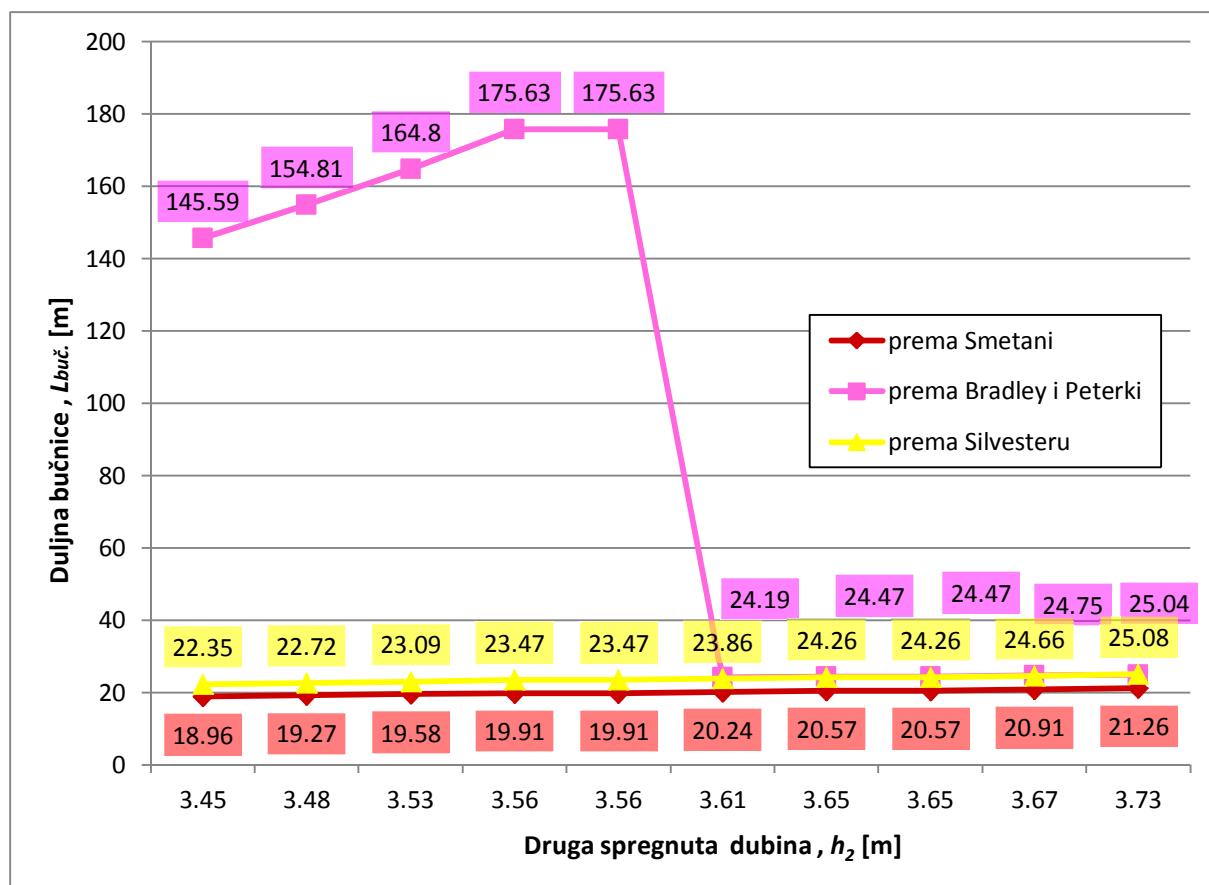


Slika 31. Grafički prikaz promjene duljine bučnice prema izrazima Smetane, Bradleya i Peterke, te prema Silvesteru u ovisnosti o promjeni prve spregnute dubine h_1

Na slici 31. prikazana je promjena duljine bučnice prema Smetane, Bradleya i Peterke te Silvesteru ovisno o promjeni prve spregnute dubine h_1 . Sa slike se vidi da je duljina bučnice pri vrijednosti prve spregnute dubine $h_1=0,51$ m od $L_{buč}=21,26$ m do $L_{buč}=25,04$ m. Duljina bučnice prema izrazu Smetane pri vrijednosti prve spregnute dubine $h_1=0,58$ m iznosi 18,96 m, što je ujedno i najmanja veličina duljine bučnice. Smanjivanjem prve spregnute dubine duljina bučnice prema izrazima Smetane, Silvestera i djelomično Bradley i Peterke se

povećava. Ovdje valja napomenuti da zbog smanjenja prve spregnute dubine dolazi do povećanja Froudeovog broja što u konačnici rezultira povećanje duljine bučnice za sva tri promatrana karakteristična slučaja određivanja. Uslijed povećane brzine na prvoj spregnutoj dubini jasno dolazi do povećanja kinetičke energije koja se na dionici vodnog skoka mora disipirati, pa samim time dolazi do logičnog prirasta duljine vodnog skoka, a samim time i duljine bučnice.

Promjena duljine bučnice prema Smetani, Bradleyu i Peterki, te Silvesteru ovisno o promjeni druge spregnute dubine prikazana je na slici 32. Sa slike se jasno vidi da je duljina bučnice pri vrijednosti druge spregnute dubine $h_2=3,73$ m od $L_{buč}=21,26$ m do $L_{buč}=25,04$ m. Duljina bučnice prema izrazu Smetane pri vrijednosti druge spregnute dubine $h_2=3,45$ m iznosi 18,96 m, što je ujedno i najmanja veličina duljine bučnice. Povećavanjem druge spregnute dubine duljina bučnice prema izrazima Smetane, Silvestera te Bradley i Peterke se povećava.



Slika 32. Grafički prikaz promjene duljine bučnice $L_{buč}$ prema izrazima Smetane, Bradleya i Peterke, te prema Silvesteru u ovisnosti o promjeni druge spregnute dubine h_2

7.8 Podprimjer 2.3. Određivanje duljine bučnice u ovisnosti o promjeni dubine donje vode i koeficijenta protoka na preljevu

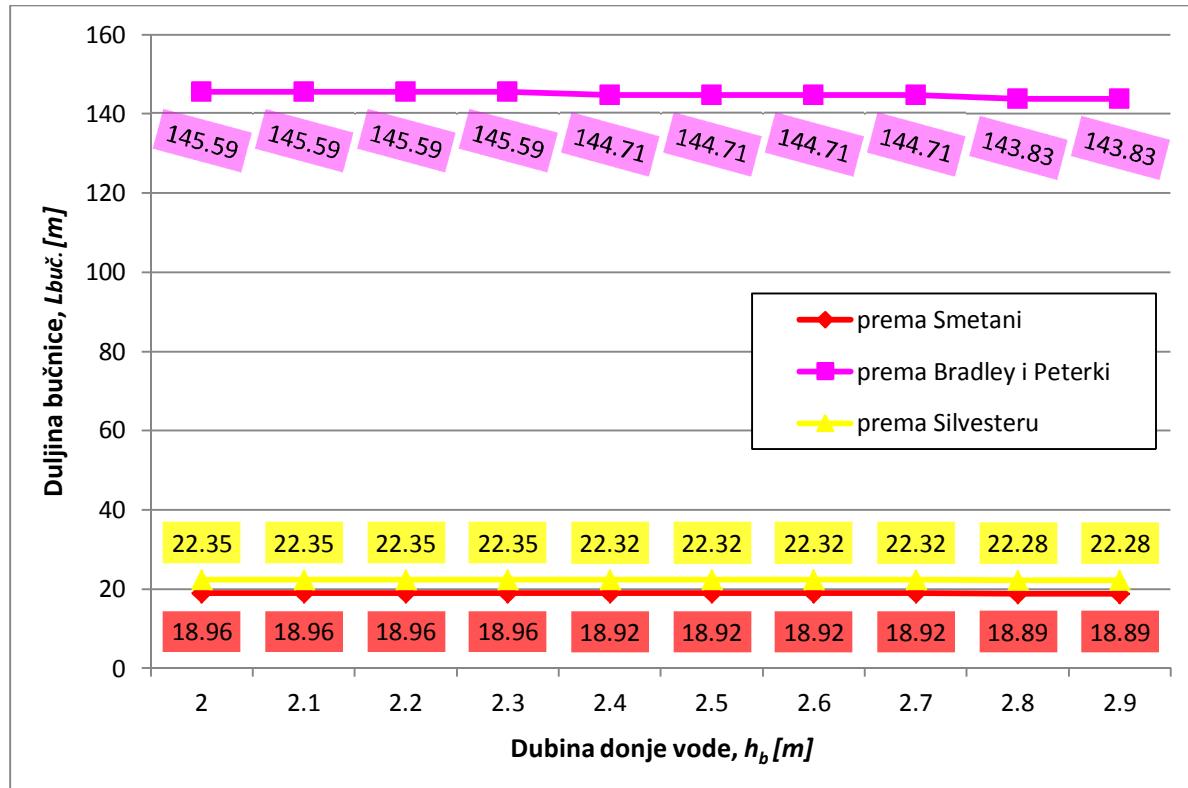
Na temelju Primjera 1. i 2. napravljena je analiza promjena vrijednosti prve i druge spregnute dubine h_1, h_2 , visine preljevnog mlaza h_p , specifične energije E_o , brzine v_1 na prvoj spregnutoj dubini, Froudeovog broja F_r na prvoj spregnutoj dubini i duljine bučnice prema izrazima po Smetani, Bradleyu i Peterki, te Silvesteru, pri promatranju dubina donje vode u granicama od $h_b=2,0 \text{ m}$ do $h_b=2,9 \text{ m}$, te promjeni koeficijenta protoka na preljevu od $m=0,472$ do $m=0,49$. U samom hidrauličkom proračunu slijedeće geometrijske veličine ostaju nepromijenjene: specifični protok q , koeficijent brzine φ , visina preljevnog praga p , širina korita b_p , te Coriolisov koeficijent α .

Tablica 7. Određivanje duljine bučnice $L_{buč.}$ u ovisnosti o promjeni dubini donje vode h_b i koeficijenta protoka na preljevu m

	q	φ	p	b_p	h_b	m	α	h_p	E_o	h₁	h₂	v₁	F_r
	[m ² /s]	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[-]
1	6	0,9	5,3	1,5	2	0,472	1,1	2,019	7,319	0,58	3,452	10,345	20,689
2	6	0,9	5,3	1,5	2,1	0,474	1,1	2,014	7,314	0,58	3,452	10,345	20,689
3	6	0,9	5,3	1,5	2,2	0,476	1,1	2,008	7,308	0,58	3,452	10,345	20,689
4	6	0,9	5,3	1,5	2,3	0,478	1,1	2,003	7,303	0,58	3,452	10,345	20,689
5	6	0,9	5,3	1,5	2,4	0,48	1,1	1,997	7,297	0,581	3,448	10,327	20,582
6	6	0,9	5,3	1,5	2,5	0,482	1,1	1,991	7,291	0,581	3,448	10,327	20,582
7	6	0,9	5,3	1,5	2,6	0,484	1,1	1,986	7,286	0,581	3,448	10,327	20,582
8	6	0,9	5,3	1,5	2,7	0,486	1,1	1,981	7,281	0,581	3,448	10,327	20,582
9	6	0,9	5,3	1,5	2,8	0,488	1,1	1,975	7,275	0,582	3,445	10,309	20,477
10	6	0,9	5,3	1,5	2,9	0,49	1,1	1,970	7,270	0,582	3,445	10,309	20,477

Duljina bučnice, $L_{buč.}$ [m]			
	Smetane	Bradley i Peterka	Silvester
1	18,96	145,59	22,35
2	18,96	145,59	22,35
3	18,96	145,59	22,35
4	18,96	145,59	22,35
5	18,92	144,71	22,32
6	18,92	144,71	22,32
7	18,92	144,71	22,32
8	18,92	144,71	22,32
9	18,89	143,83	22,28
10	18,89	143,83	22,28

Povećanjem dubine donje vode h_b i koeficijenta protoka na preljevu m duljina bučnice prema svim promatranim izrazima se smanjuju, ali u jako maloj mjeri.



Slika 33. Grafički prikaz promjene duljine bučnice $L_{buč}$ prema izrazima Smetane, Bradleya i Peterke, te prema Silvesteru u ovisnosti o dubini donje vode h_b i koeficijenta protoka na preljevu m

Na slici 33. prikazana je promjena duljine bučnice prema Smetani, Bradleyu i Peterki, te Silvesteru ovisno o promjeni dubini donje vode i koeficijenta protoka na preljevu. Najveća duljina bučnice dobije se za najmanju vrijednost dubine donje vode $h_b=2$ m te iznosi $L_{buč}=145,59$ m prema izrazu Bradley i Peterke. Za jednaku vrijednost dubine donje vode duljina bučnice prema Smetani i Silvesteru iznosi od $L_{buč}=18,96$ m do $L_{buč}=22,35$ m. Duljina bučnice prema izrazu Smetane pri najvećoj vrijednosti dubine donje vode $h_b=2,9$ m iznosi 18,96 m, što je ujedno i najmanja veličina duljine bučnice.

7.9 Podprimjer 2.4. Određivanje duljine bučnice u ovisnosti o promjeni širine preljeva, koeficijenta brzine i koeficijenta protoka na preljevu

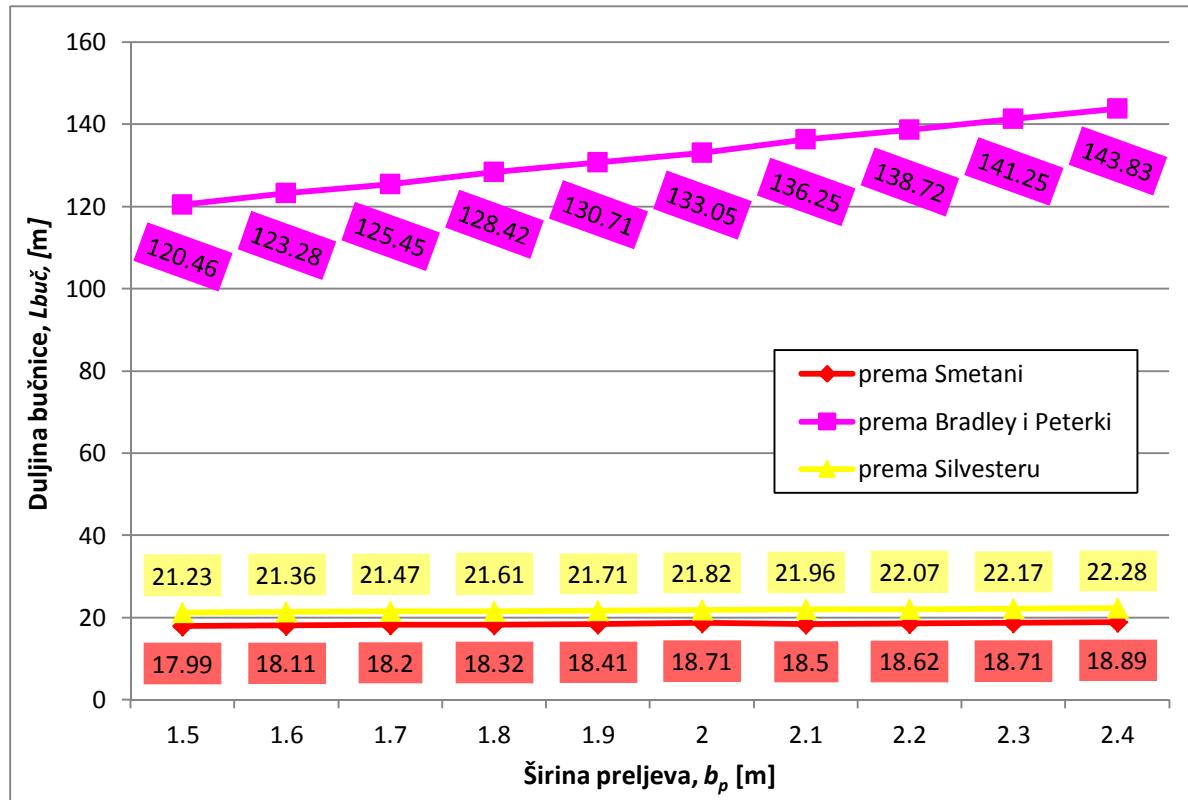
Na temelju Primjera 1. i 2. napravljena je analiza promjena vrijednosti prve i druge spregnute dubine h_1, h_2 , visine preljevnog mlaza h_p , specifične energije E_o , brzine v_1 na prvoj spregnutoj dubini, Froudeovog broja Fr_1 na prvoj spregnutoj dubini i duljine bučnice prema izrazima po Smetani, Bradleyu i Peterki, te Silvesteru. Promatrane su varijacije širine preljeva u granicama od $b_p=1,5$ m do $b_p=2,4$ m, te koeficijenti protoka na preljevu u granicama od $m=0,472$ do $m=0,49$ i koeficijenta brzine u granicama od $\varphi=0,855$ do $\varphi=0,9$. Sljedeće geometrijske veličine ostale su nepromijenjene: specifični protok q , visina preljevnog praga p , dubina donje vode h_b , te Coriolisov koeficijent α .

Tablica 8. Određivanje duljine bučnice $L_{buč.}$ u ovisnosti o promjeni širine preljeva b_p , koeficijenta protoka na preljevu m i koeficijenta brzine φ

	q [m ² /s]	φ [/]	p [m]	b_p [m]	h_b [m]	m [/]	α [/]	H_o [m]	E_o [m]	h_1 [m]	h_2 [m]	v_1 [m/s]	Fr_1 [/]
	[m ² /s]	[/]	[m]	[m]	[m]	[/]	[/]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[/]
1	6	0,855	5,3	1,5	2	0,472	1,1	2,019	7,319	0,612	3,339	9,804	17,61
2	6	0,86	5,3	1,6	2	0,474	1,1	2,014	7,314	0,608	3,353	9,868	17,96
3	6	0,865	5,3	1,7	2	0,476	1,1	2,008	7,308	0,605	3,363	9,917	18,22
4	6	0,87	5,3	1,8	2	0,478	1,1	2,003	7,303	0,601	3,377	9,983	18,59
5	6	0,875	5,3	1,9	2	0,48	1,1	1,997	7,297	0,598	3,387	10,03	18,87
6	6	0,88	5,3	2	2	0,482	1,1	1,991	7,291	0,595	3,398	10,08	19,16
7	6	0,885	5,3	2,1	2	0,484	1,1	1,986	7,286	0,591	3,412	10,15	19,55
8	6	0,89	5,3	2,2	2	0,486	1,1	1,981	7,281	0,588	3,423	10,2	19,85
9	6	0,895	5,3	2,3	2	0,488	1,1	1,975	7,275	0,585	3,434	10,26	20,16
10	6	0,9	5,3	2,4	2	0,49	1,1	1,970	7,270	0,582	3,445	10,31	20,47

Duljina bučnice, $L_{buč.}$ [m]			
	Smetane	Bradley i Peterka	Silvester
1	17,99	120,46	21,23
2	18,11	123,28	21,36
3	18,2	125,45	21,47
4	18,32	128,42	21,61
5	18,41	130,71	21,71
6	18,71	133,05	21,82
7	18,5	136,25	21,96
8	18,62	138,72	22,07
9	18,71	141,25	22,17
10	18,89	143,83	22,28

Duljina bučnice prema izrazima Smetane, Silvestera, Bradley i Peterke se povećava ukoliko se poveća vrijednost širine preljeva b_p , koeficijent brzine φ i koeficijenta protoka m na preljevu, što se zaključuje iz tablice 8.



Slika 34. Grafički prikaz promjene duljine bučnice $L_{buč.}$ prema izrazima Smetane, Bradleya i Peterke, te prema Silvesteru u ovisnosti o širini preljeva b_p , koeficijenta brzine φ i koeficijenta protoka na preljevu m

Na slici 34. prikazana je promjena duljine bučnice prema Smetani, Bradleyu i Peterki, te Silvesteru ovisno o promjeni širine preljeva, koeficijenta brzine i koeficijenta protoka na preljevu. Najveća duljina bučnice dobiva se za najveću vrijednost širine preljeva $b_p=2,4$ m te iznosi $L_{buč.}=143,83$ m prema izrazu Bradley i Peterke. Za jednaku vrijednost širine preljeva duljina bučnice prema Smetani i Silvesteru iznosi od $L_{buč.}=18,89$ m do $L_{buč.}=22,28$ m. Duljina bučnice prema izrazu Smetane pri najmanjoj vrijednosti širine preljeva $b_p=1,5$ m iznosi 17,99 m, što je ujedno i najmanja veličina duljine bučnice.

8. Zaključak

U ovom radu opisan je proces nastanka hidrauličkog (vodnog) skoka, njegovi tipovi, te mjere zaštite kanala pomoću raznih hidrotehničkih građevina kojima se disipira energija vodnog skoka i time umanjuje razorno djelovanje vodnog skoka na korito. Kako bi se bolje razumio hidraulički skok rad je započet opisom osnovnih elemenata i fizikalnih procesa tečenja u blago nagnutim kanalima sa stacionarnim i jednolikim strujanjem, te brzotocima.

Vodni skok nastaje pri prijelazu iz silovi tok u miran tok. Javlja se kod preljeva preko brane, pri istjecanju ispod zapornice ili promjeni pada dna kanala. Može nastati u obliku potopljenog vodnog skoka, odbačenog skoka ili u kritičnom obliku koji je prijelazni oblik između prethodno navedena dva oblika skoka. U praksi se zbog ekonomičnosti i funkcionalnosti nastoji osigратi potopljeni vodni skok. U slučaju kada nije moguće osigurati potopljeni vodni skok odnosno pojave odbačenog vodnog skoka potrebno je izvesti bučnicu. U bučnici mogu biti izgrađeni posebni objekti poput pragova ili disipacijskih zubi. Umjesto bučnice može se izgraditi udarni (odbojni) zid koji ima jednaku funkciju kao bučnica ili kombinacija udarnog zida i bučnice. Kako nije moguće disipirati svu energiju u bučnici obala i dno kanala zaštićuje se od djelovanja preostale energije nizvodno od bučnice pomoću kamenog nabačaja tkz. rip-rapa.

U posljednjem dijelu završnog rada obuhvaćena su dva računska primjera. Na prvom primjeru prikazan je proračun određivanja oblika vodnog skoka na preljevu praktičnog profila krivolinijskog obrisa pomoću spregnutih dubina. Na primjeru su osim načina određivanja spregnutih dubina prikazani način određivanja specifične energije preljeva, brzine i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini. U drugom primjeru prikazan je način određivanja duljine vodnog skoka i duljine bučnice na temelju najčešćih empirijskih formula u praksi (Smetana, Bradley i Peterka, Silvester). Za oba računska primjera dano je više podprimjera u kojima se kroz variranje pojedinih hidrauličkih parametara promatrala promjena ostalih parametara. Varirao se specifični protok na oba primjera, te se njegovim povećanjem zamjećuje povećanje prve spregnute dubine koja rezutira povećanjem brzine na prvoj spregnutoj dubini. Uslijed povećanja brzine na prvoj spregnutoj dubini dolazi do povećanja duljine bučnice. Ovisnosti pojedinih geometrijskih i kinematičkih parametara prikazani su kroz tablične i grafičke prikaze za svaki pojedini podprimjer.

9. Literatura

- [1] Jović, V.: *Osnove hidromehanike*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, Element, 2006.
- [2] Žic, E., Ožanić, N., Karleuša, B.: *Skripta zadataka iz kolegija Hidromehanika*, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 2010.
- [3] Lončar, A.: *Mehanika tekućina*, interna skripta iz kolegija Mehanika fluida, Građevinski fakultet Zagreb, Zagreb, 2012.
- [4] Agroskin, I.I.: *Hidraulika*, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb, 1969.
- [5] Shaughnessy, E.J., KatzI. M., Schaffer, J.P.: *Introduction to Fluid Mechanics*, Oxford University, 2005.
- [6] Stojić, P.: *Hidrotehničke građevine*, Građevinski fakultet Split, Split, 1998.
- [7] https://www.google.hr/search?q=rip-rap&biw=1336&bih=666&tbo=isch&source=univ&sa=X&ei=KnpzVYTPESA_R7Aa2rYGoDw&sqi=2&ved=0CCIQsAQ&dpr=0.85#imgrc=0zpLA7OvYZFLBM%253A%3BuVzE_3D3vWmxPM%3Bhttp%253A%252F%252Fupload.wikimedia.org%252Fwikipedia%252Fcommons%252F5%252F54%252FRip_Rap_at_Fairlight_-geograph.org.uk_-69686.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fcommons.wikimedia.org%252Fwiki%252FFile%253ARip_Rap_at_Fairlight_-geograph.org.uk_-69686.jpg%3B640%3B480, Preuzeto dana 6.6.2015.

10. Popis slika, tablica i grafikona

Popis slika	Strana
1. Prikaz fizikalnih parametara pri srujanju u strmom koritu	5
2. Strujanje u blago nagnutim koritima	7
3. Prikaz jednolikog strujanja	8
4. Dijagram specifične energije pri strujanju u brzotoku	14
5. Poprečni presjek prirodnog kanala	15
6. Krivulja specifične energije vodotoka(brzotoka) u zavisnosti o dubini vode	16
7. Specifična energija u složenom presjeku korita	18
8. Rasподjela tlačnih sila i sila količine gibanja	21
9. Hidraulički (vodni) skok	22
10. Krivulja specifične energije vodotoka	23
11. Potpuni vodni skok	24
12. Valoviti vodni skok	25
13. Potopljeni vodni skok	25
14. Slobodni površinski vodni skok	25
15. Potopljeni površinski vodni skok	26
16. Prikaz profila brzine u vodnom skoku	27
17. Disipacija energije u vodnom skoku	28
18. Prikaz bučnice sa disipacijskim zubima	29
19. Odbojni zid u funkciji regulacije korita od posljedica vodnog skoka	30
20. Prikaz kombinacije bučnice i odbojnog zida	30
21. Kaskade s jednom ili više stepnica	30

22.	Prikaz brzotoka u svrhu disipacije kinetičke energije kod vodnog skoka	31
23.	Primjena kamenog nabačaja (rip-rapa) u funkciji zaštite pokosa kanala i zaštite od erozijskog djelovanja	31
24.	Grafički prikaz ovisnosti promjene prve h_1 i druge spregnute dubine h_2 , brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini Fr_1 o promjeni specifičnog protoka q	36
25.	Grafički prikaz ovisnosti promjene prve h_1 i druge spregnute dubine h_2 , brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 i Froudeovog broja na prvoj spregnutoj dubini Fr_1 o promjeni specifičnog protoka q i koeficijenta protoka m	38
26.	Grafički prikaz ovisnosti promjene visine preljevnog mlaza h_p i specifične energije E_o o promjeni specifičnog protoka q i dubini donje vode h_b	40
27.	Grafički prikaz ovisnosti promjene prve i druge spregnute dubine h_1, h_2 o promjeni specifičnog protoka q i dubine donje vode h_b	41
28.	Grafički prikaz promjene a) brzine na prvoj spregnutoj dubini v_1 i b) Froudeovog broja Fr_1 na prvoj spregnutoj dubini ovisno o promjeni specifičnog protoka q i dubine donje vode h_b	42
29.	Grafički prikaz promjene duljine bučnice prema izrazima Smetene, Bradleya i Peterke, te Silvesteru u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka q	45
30.	Grafički prikaz promjene duljine bučnice prema izrazima Smetene, Bradleya i Peterke, te prema Silvesteruu ovisnosti o promjeni visine preljevnog praga p	47
31.	Grafički prikaz promjene duljine bučnice prema izrazima Smetane, Bradleya i Peterke, te prema Silvesteruu ovisnosti o promjeni prve spregnute dubine h_1	48
32.	Grafički prikaz promjene duljine bučnice prema izrazima Smetane, Bradleya	49

i Peterke, te prema Silvesteru u ovisnosti o promjeni druge spregnute dubine h_2

33. Grafički prikaz promjene duljine bučnice $L_{buč}$. prema izrazima Smetane, Bradleya 51

i Peterke, te prema Silvesteru u ovisnosti o dubine donje vode h_b i koeficijenta protoka na preljevu m

34. Grafički prikaz promjene duljine bučnice $L_{buč}$. prema izrazima Smetane, Bradleya 53

i Peterke, te prema Silvesteru u ovisnosti o širini preljeva b_p , koefivijenta brzine φ i koeficijenta protoka na preljevu m

Popis tablica	Strana
1. Vrijednosti Manningova koeficijenta hraptavosti za pojedine tipove obloženosti stijenki korita	10
2. Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka q i visine krune preljeva p	35
3. Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni širine preljeva b_p i koeficijenta protoka preljeva m	37
4. Određivanje spregnutih dubina u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka q i dubini donje vode h_b	39
5. Određivanje duljine bučnice $L_{buč}$. u ovisnosti o promjeni specifičnog protoka q	44
6. Određivanje duljine bučnice $L_{buč}$. u ovisnosti o promjeni visine preljevnog praga p	46
7. Određivanje duljine bučnice $L_{buč}$. u ovisnosti o promjeni dubini donje vode h_b i koeficijenta protoka na preljevu m	50
8. Određivanje duljine bučnice $L_{buč}$. u ovisnosti o promjeni širine preljeva b_p , koeficijenta protoka na preljevu m i koeficijenta brzine φ	52