

Određivanje koeficijenta otpora tečenju

Danila Lozzi-Kožar, Ivica Kožar

Ključne riječi

koeficijent otpora tečenja, kanal Botonega, jednodimenzijnski model tečenja, jednadžba kontinuiteta, Manningov koeficijent hrapavosti

Key words

flow resistance coefficient, Botonega channel, one-dimensional flow model, continuity equation, Manning's roughness coefficient

Mots clés

coefficient de résistance à l'écoulement, canal de Botonega, modèle d'écoulement unidimensionnel, équation de continuité, coefficient de rugosité de Manning

Ключевые слова

коэффициент сопротивления течению, канал Ботонег, одномерная модель течения, уравнение непрерывности, коэффициент шероховатости Маннинга

Schlüsselworte

Strömungswiderstandskoeffizient, Kanal Botonega, eindimensionales Strömungsmodell, Kontinuitätsgleichung, Mannings Rauigkeitskoeffizient

D. Lozzi-Kožar, I. Kožar

Prethodno priopćenje

Određivanje koeficijenta otpora tečenju

U cilju određivanja koeficijenta otpora tečenju provedena su mjerenja geometrijskih i hidrauličkih veličina na više presjeka duž odvodnog kanala Botonega. Načinjen je program za računalo u programskom okruženju MathCad za jednodimenzijnski model tečenja rješavanjem jednadžbe kontinuiteta i energijske jednadžbe uz opis otpora tečenju preko Manningove jednadžbe. Dobivene su vrijednosti Manningovog koeficijenta hrapavosti za različite protoke i uspoređene s podacima iz literature.

D. Lozzi-Kožar, I. Kožar

Preliminary note

Determination of flow resistance coefficient

Geometric and hydraulic measurements were made on several sections along the Botonega drainage channel in order to determine the flow resistance coefficient. A MathCad based computer program was developed for one-dimensional flow modelling purposes, and this through resolution of continuity and energy equations, while the Manning equation was used to describe flow resistance. The Manning's roughness coefficient values for various flow rates were obtained and compared with literature data.

D. Lozzi-Kožar, I. Kožar

Note préliminaire

Détermination du coefficient de résistance à l'écoulement

Les valeurs géométriques et hydrauliques ont été mesurées sur plusieurs tronçons le long du canal de drainage de Botonega dans le cadre de la détermination du coefficient de résistance à l'écoulement. Le logiciel basé sur MathCad a été développé pour la modélisation de l'écoulement unidimensionnel et cela à travers les équations de continuité et d'énergie, tandis que l'équation de Manning a été utilisée pour décrire la résistance à l'écoulement. Les valeurs de coefficient de rugosité de Manning pour les taux d'écoulement différents ont été obtenues et comparées avec les données de la littérature.

Д. Лоззи-Кожар, И. Кожар

Предварительное сообщение

Определение коэффициента сопротивления течению

С целью определения коэффициента сопротивления течению произведены измерения геометрических и гидравлических параметров в нескольких сечениях вдоль отводного канала Ботонег. Разработана компьютерная программа в программном обеспечении MathCad для одномерной модели течения посредством решения уравнения непрерывности и энергетического уравнения при описании сопротивления течению уравнением Маннинга. Проведен сравнительный анализ полученных коэффициентов шероховатости Маннинга по различным потокам с данными, приведенными в литературе.

D. Lozzi-Kožar, I. Kožar

Vorherige Mitteilung

Bestimmung des Strömungswiderstandskoeffizients

Im Ziel der Bestimmung des Strömungswiderstandskoeffizients führte man Messungen der geometrischen und hydraulischen Größen an mehreren Querschnitten längs des Ablaufkanals Botonega durch. Angefertigt wurde ein Computerprogramm im Programmumfang MathCad für das eindimensionale Strömungsmodell durch Lösung der Kontinuitäts- und energetischen Gleichung, mit Darstellung des Strömungswiderstands über Mannings Gleichung. Erhalten wurden Werte des Manningschen Rauigkeitskoeffizients für verschiedene Durchflüsse und diese verglich man mit Angaben aus der Literatur.

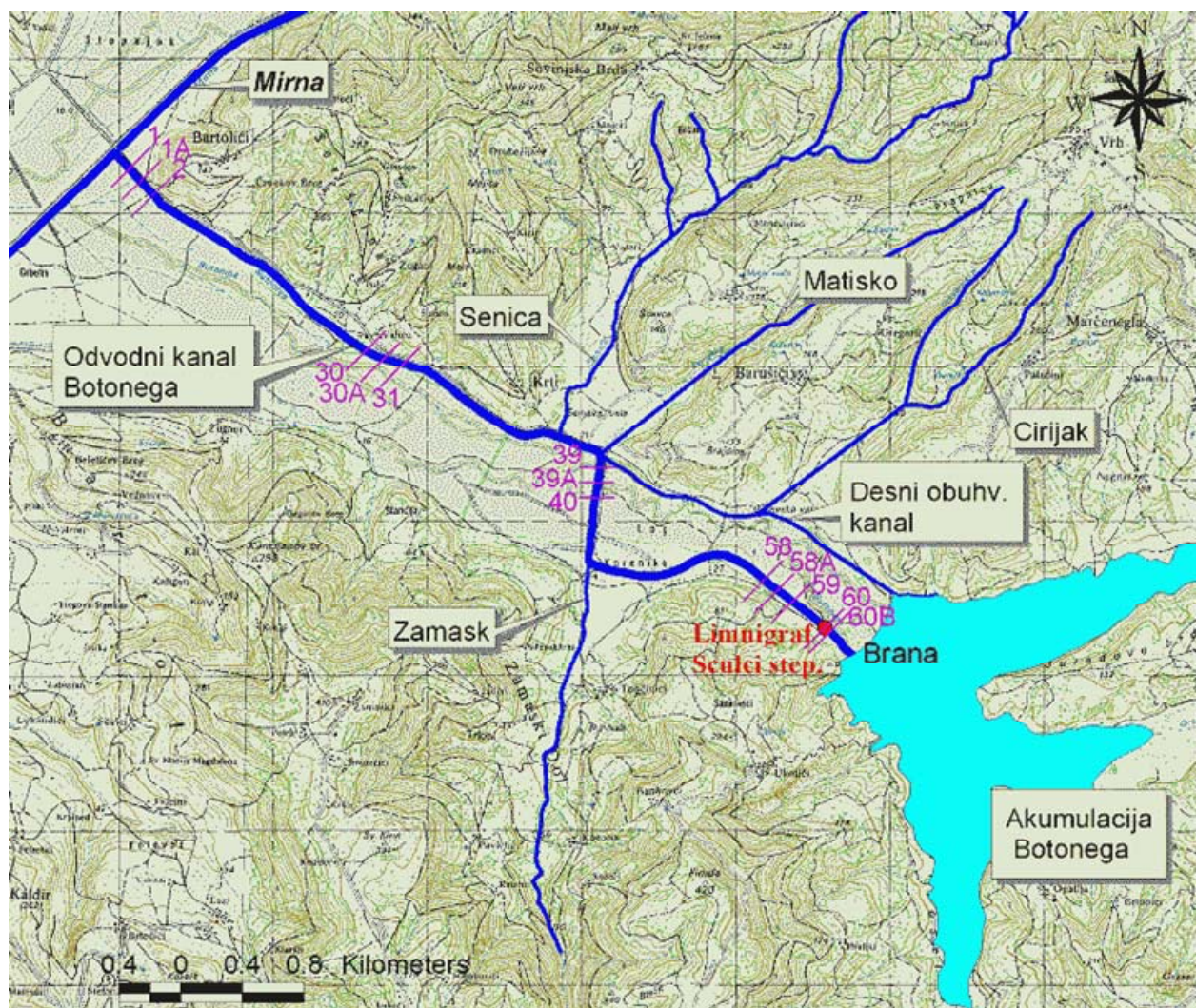
Autori: Mr. sc. **Danila Lozzi-Kožar**, dipl. ing. građ., Hrvatske vode VGO Rijeka; prof. dr. sc. **Ivica Kožar**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet

1 Uvod

Odvodno-obuhvatni kanal Botonega lijevi je pritok rijeke Mirne. Kanal ima dvojaku ulogu: preuzimanja vode iz evakuacijskih građevina brane Botonega (temeljni ispušt i preljev), kao i zaštite od vanjskih voda doline Botonega, tj. bujica Zamask, Senice, Matisko, Cirijak i pripadajućeg slijeva (slika 1.).

mostova, utok u Mirnu i utoci većih bujica obloženi betonskim šesterostranim prizmama.

Kako su uočene promjene u geometriji poprečnog presjeka kanala (kanal više nije pravilnog trapeznoga poprečnog presjeka), kao i u položaju osi kanala, a također je prisutna i erozija, izrađena je nova geodetska snimka postojećeg stanja kanala. Snimljeni su poprečni profili



Slika 1. Situacija – odvodno-obuhvatni kanal Botonega s oznakama mjesta mjerenja

Projektirani poprečni presjek kanala složenog je profila, tj. sastoji se od glavnog kanala trapeznog oblika s lijevom i desnom inundacijom i obrambenim nasipima (slika 2.) te padom nivelete od 1 do 1,5 ‰.

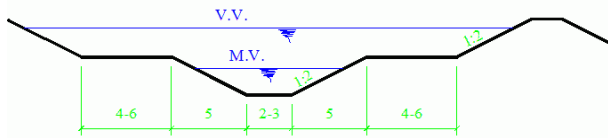
Glavni je kanal dimenzioniran na protok od 25 do 30 m³/s, a kanal s inundacijama na protok od 55 (uzvodno) do 98,54 m³/s (nizvodno), uz pretpostavku Manningova koeficijenta hrapavosti $n = 0,027$.

Kanal je izveden u zemljanom materijalu (glina), pokosi i nasipi su zatravljeni, dok su samo stube, korito ispod

na svakih 100 m, odnosno 50 m, te karakteristični profili na vodnim građevinama (stube, obloge, mostovi). Ukupna duljina trase kanala jest 6.233,9 km. Profil broj 1 je na stacionaži 0 +100 (100 m od utoka u Mirnu), a profil 63 je na stacionaži 6 + 233,90.

Kod većih ispuštanja vode iz akumulacije primijećeno je da dolazi do izlivanja vode iz glavnog kanala u inundaciju. Stoga je trebalo izračunati količinu vode koju kanal može prihvatiti, odnosno za kanal u sadašnjem stanju načiniti proračun protoka, tj. utvrditi

visine vode u kanalu za proizvoljne količine vode koje se ispuštaju iz akumulacije. Za modeliranje strujanja u kanalu potreban nam je matematički model. To može biti neki gotov programski paket, dok je u ovom radu razvijen 1D model tečenja načinjen programom za računalo u programskom okruženju MathCad.



Slika 2. Projektirani normalni profil kanala Botonega

Osim geometrijskih parametara kanala potrebno je odrediti i veličinu koja opisuje otpor tečenju, tj. koeficijent otpora tečenju kao na pr. Darcyjev, Chezyjev ili Manningov koeficijent hrapavosti. Ovdje smo se odlučili za Manningov koeficijent, odnosno pokušali smo ga odrediti mjerenjem na terenu.

Manningov koeficijent hrapavosti (ili Gauckler-Manningov koeficijent) jedan je od koeficijenata gubitaka energije, tj. opisuje gubitak energije zbog trenja vode i korita otvorenog vodotoka. Manningov koeficijent znatno varira i ovisi o velikom broju faktora kao što su: površinska hrapavost, vegetacija i obraslost korita, nepravilnosti kanala, grananje ili spajanje vodotoka, prepreke, veličina i oblik kanala, nagib kanala, visina vode i protok, sezonske promjene kod godišnjih doba, utjecaj temperature, erozija, suspendirani materijal. Odabir odgovarajuće vrijednosti Manningova koeficijenta veoma je važan za točnost proračuna strujanja u otvorenom vodotoku. Mnoge knjige i druge publikacije o hidraulici otvorenih kanala prikazuju fotografije vodotoka i daju tablice s vrijednostima Manningova koeficijenta hrapavosti n , koje možemo upotrijebiti za korita i terene približno sličnih svojstava [2] i [3].

Vrijednosti Manningova koeficijenta su empirijske. Treba naglasiti da Gauckler-Manningova formula vrijedi za jednoliko strujanje (*uniform equilibrium*) i za nejednoliko postupno promjenjivo strujanje (*non-uniform (gradually varied) flows*) te za turbulentno hrapavo strujanje vode (*fully rough turbulent flows*). Ne može se primijeniti za turbulentno glatko strujanje (*smooth turbulent flows*) niti za turbulentno prijelazno strujanje (*transition turbulent flows*) [9].

Provedena je kontrola primjenjivosti navedenih jednadžbi te je određen posmični Reynoldsov broj u svakom presjeku (*shear Reynolds number*)

$$Re^* = V^* \frac{\rho k_s}{\mu}, \text{ gdje je } V^* \text{ posmična brzina. Prvo je}$$

$$\text{proračunan Reynoldsov broj } Re = \rho \frac{VD_H}{\mu}, \text{ gdje je } \rho$$

gustoća fluida, V srednja brzina, μ dinamička viskoznost i D_H hidraulički promjer ($D_H=2R_H$). Veza i posmične

brzine V^* i srednje brzine V je $\frac{V^*}{V} = \sqrt{\frac{f}{8}}$. Uz poznati

Reynoldsov broj Re može se proračunati koeficijent posmika f rješavanjem nelinearne Coolebrok-White jednadžbe

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{k_s}{3,71D_H} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right), \text{ gdje je } k_s$$

parametar ekvivalentne hrapavosti (prema Chansonu [9] za zemljani kanal usvojeno je $k_s=3,0$). Veza koeficijenta posmika f i Manningova koeficijenta n dobije se preko Chezyjeva koeficijenta

$$C_{Chezy} = \sqrt{\frac{8g}{f}} \text{ i } n_{Manning}^2 = \frac{1}{C_{Chezy}^2} \sqrt{\frac{R_H}{2}}.$$

2 Mjerenja na odvodno-obuhvatnom kanalu Botonega

Mjerenja na odvodno-obuhvatnom kanalu Botonega provedena su radi određivanja koeficijenta otpora tečenju.

Mjerenja su organizirale Hrvatske vode, VGO Rijeka u veljači (2. 2.) i ožujku (8., 9., 10. i 15. 3.) 2006. godine. Mjerenja na temelju kojih smo proračunali Manningov koeficijent hrapavosti provedena su 9. ožujka 2006. Naime, ispuštanje vode iz akumulacije Botonega započelo je 9. ožujka 2006. u 7,30 sati i trajalo je do 8 sati sljedećega dana. Ispuštanje vode započelo je otvaranjem zapornice tako da je zapornica podignuta 90 cm, u 11 sati otvor zapornice namješten je na 60 cm, a u 14 sati pa sve do zatvaranja sljedećega dana otvor zapornice bio je 30 cm. Visina vode u akumulaciji na početku ispuštanja bila je 39,76 m n.m., a nakon zatvaranja zapornice 39,30 m n.m.



Slika 3. Mjerenje hidrometrijskim krilom na profilu 60B

Za tri različita otvora zapornice (90 cm, 60 cm, 30 cm) na profilu 60B, uzvodno od limnigrafa Šćulci (profil 60) (slika 1.) provedena su tri vodomerjenja. Na temelju broja okretaja vijka hidrometrijskog krila određene su brzine na pojedinim točkama profila 60B te proračunate srednje brzine vode (vidi poglavlje 4.).

Srednja brzina vode na mjerenom profilu za otvor zapornice od 90 cm iznosi 1,263 m/s, za otvor zapornice od 60 cm 1,20 m/s, a za otvor zapornice od 30 cm 0,945 m/s.

Iz geodetski izmjerena poprečnog presjeka profila 60B i geodetski izmjerene visine vode na navedenom profilu za tri različita otvora zapornice proračunan je protok.

Proračunani protok u odvodno-obuhvatnom kanalu Botonega za otvor zapornice od 90 cm iznosi 21,988 m³/s, za otvor zapornice od 60 cm 15,830 m³/s, a za otvor zapornice od 30 cm 8,557 m³/s.

Također je hidrometrijskim krilom određena srednja brzina i proračunani protoci na bujicama nizvodno od profila 60B i to za bujicu Zamask, desni obuhvatni kanal i bujicu Matisko te bujicu Senica (slika 1.), jer te bujice utječu u odvodno-obuhvatni kanal Botonega. Protok bujice Zamask na dan ispuštanja vode iz akumulacije bio je 0,282 m³/s, protok desnog obuhvatnog kanala i bujice Matisko 0,229 m³/s, a protok bujice Senica 0,233 m³/s. Vidljivo je da je protok narečenih bujica malen u odnosu na protok u kanalu Botonega tijekom ispuštanja vode. Doprinosi protoka nizvodnih bujica pridodani su protoku u odvodno-obuhvatnom kanalu Botonega i tako dobiveni ukupni protok u kanalu Botonega prikazan je u tablici 1.

Osim mjerenja hidrometrijskim krilom, istodobno su provedena geodetska mjerenja visina vode u glavnom kanalu tijekom ispuštanja vode iz akumulacije za tri različita otvora zapornice. Mjerenja su obavljena na profilima 58 do 59 na uzvodnom dijelu kanala, na profilima 39 do 40 na središnjem dijelu kanala te na nizvodnom dijelu kanala na profilima 1 do 2 i 30 do 31 (slika 1.). Na navedenim profilima kanala pobijani su kolčići koji su označili razinu vode u kanalu za tri različita protoka (tri različita otvora zapornice). Sljedećih su dana nakon zatvaranja zapornice geodetski izmjerene visine vode u kanalu.

Geodetska snimka poprečnih profila kanala izrađena je prije ispuštanja vode iz akumulacije.

Treba napomenuti da su sva mjerenja (hidrometrijskim krilom na glavnom kanalu te visine vode u kanalu) za tri različita otvora zapornice provedena tako da se čekalo stacioniranje protoka.

Mjerenja na profilu 60B izvedena su s metalnog mosta hidrometrijskim krilom na motki. To mjerenje proveli

su djelatnici Državnoga hidrometeorološkog zavoda. Sva druga mjerenja (mjerenja hidrometrijskim krilom na bujicama te mjerenja visine vode na određenim profilima za tri različita otvora zapornice) proveli su djelatnici Hrvatskih voda, VGO Rijeka.



Slika 4. Nizvodni dio kanala – protok ~ 9,068 m³/s, vidljiv je trag vode od prijašnjeg protoka ~22 m³/s

3 Modeliranje tečenja kanalom

Za model tečenja kanalom primijenit će se jednodimenzijanski model tečenja opisan u Jain [11] prema kojem je načinjen program za računalo u programskom okruženju MathCad [12].

Za početnu formulaciju tečenja u otvorenom kanalu mogu se rabiti de Saint-Venantove jednadžbe (uz napomenu da je s smjer dna kanala).

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial s} = 0$$

gdje je

$$H = z_0 + y \cos \theta + \frac{V^2}{2g}$$

Simboli su

Q - protok kroz kanal

A - poprečni presjek kanala

θ - pad dna

V - srednja brzina fluida u presjeku kanala

$(V = 1/d \int_0^d v dy$ pri čemu je v brzina u točki presjeka)

H – ukupna energija vodotoka (*total head*)

z_0 – geodetska visina

y – dubina (okomito na s).

Za potrebe određivanja Manningova koeficijenta, Saint-Venantova jednadžba jest pojednostavnjena uvođenjem određenih pretpostavki:

- tok je stacionaran (*steady varied flow*), odnosno, nema promjene srednje brzine ili dubine u vremenu ($\frac{\partial y}{\partial t} = 0$),
- tok je postupno promjenjiv (*gradually varied flow*), odnosno, pad dubine zadovoljava uvjet $\frac{\partial y}{\partial s} \ll 1$ (vidi Munson, Young, Okiishi [1]), postoji samo hidrostatski tlak.

Navedene pretpostavke omogućuju da se sustav parcijalnih diferencijalnih jednadžbi (1) napiše kao (skalarna nelinearna algebarska) jednadžba kontinuiteta

$$Q = VA = \text{konstantno} \quad (2.a)$$

i kao energijska (skalarna diferencijalna) jednadžba

$$\frac{dH}{ds} = \frac{d}{ds} \left(z_0 + y \cos \theta + \frac{V^2}{2g} \right) = -s_f \quad (2.b)$$

gdje je s_f pad energijske linije (*friction slope*) po jedinici duljine dna kanala.

Diferencijalna jednadžba (2.b) može se svesti na algebarsku jednadžbu i time se problem tečenja u otvorenom kanalu svodi na sustav od dvije nelinearne algebarske jednadžbe s dvije nepoznanice: Q ili V i A ili y . Algebarska se jednadžba dobiva integracijom jednadžbe (2.b) unutar granica $s=s_1$ i $s=s_2$ gdje 1 i 2 označavaju granice kontrolnog volumena

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{dH}{ds} ds = - \int_{s_1}^{s_2} s_f ds \quad \Rightarrow \quad H_2 - H_1 = S_f \quad (3)$$

gdje su 1 i 2 oznake prvog odnosno drugog presjeka zamišljenoga kontrolnog volumena vodotoka i S_f pad energijske linije između presjeka 1 i 2.

Kako u našem primjeru hidrauličke veličine mjerimo radi određivanja otpora tečenju, moramo izraz (3) preurediti i uvesti neku pretpostavku za vezu pada energijske linije i otpora tečenju. Ta se veza može dobiti ako usvojimo neki poznati izraz za pad energijske linije (otpor tečenju), na pr. Darcyjev, Chezyjev ili Gauckler-Manningov izraz

$$S_f = f_{Darcy} \frac{1}{4R} \frac{V^2}{2g},$$

$$S_f = \frac{1}{C_{Chezy}^2} \frac{V^2}{R}, S_f = n_{Manning}^2 \frac{V^2}{R^{4/3}} \quad (4)$$

gdje je R hidraulički radijus.

Za potrebe ovog rada usvojena je Manningova jednadžba, najviše zbog tradicionalnih razloga; naime, navedena jednadžba prevladava u praksi i ti su koeficijenti naj-dostupniji. S numeričkog stajališta svejedno je koja se jednadžba primjenjuje (parametri su isti: V , R i jedan koeficijent). Uz navedene pretpostavke sustav nelinearnih algebarskih jednadžbi koje opisuju tečenje u otvorenom kanalu (pisano uz naglašenu funkcijsku zavisnost pojedinih veličina) jesu:

jednadžba kontinuiteta

$$Q = V_1 A_1(y_1) = V_2 A_2(y_2) \quad (5.a)$$

energijska jednadžba

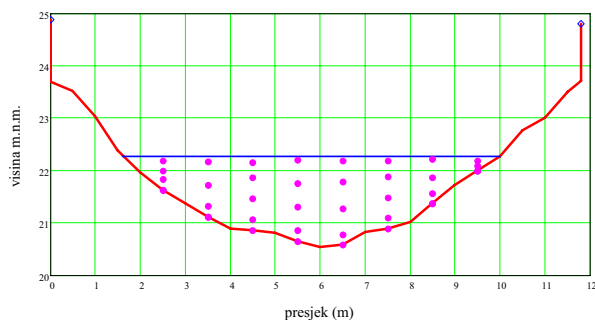
$$H_2(y_2, V_2) - H_1(y_1, V_1) = S_f(V) \quad (5.b)$$

Postupak određivanja Manningova koeficijenta provodi se preko pada energijske linije S_f i odgovarajuće jednadžbe (4). Veličina S_f određuje se iz nelinearnom sustava jednadžbi (5) tako da unutar kontrolnog volumena (prikladni odsječak kanala) odredimo protok Q , na pr. mjerenjem hidrometrijskim krilom na poznatom poprečnom profilu kanala. Krajevi kontrolnog volumena su poznati poprečni presjeci $A_1(y_1)$ i $A_2(y_2)$ gdje se proračunaju srednje brzine V_1 i V_2 iz nelinearne jednadžbe (5.a). Nakon toga se iz jednadžbe (5.b) odredi pad energijske linije S_f i napokon se iz odgovarajućeg izraza (4) odredi Manningov koeficijent.

Iz opisanog se postupka vidi da se nelinearne jednadžbe (5) mogu rješavati jedna po jedna što bitno pojednostavnjuje dobivanje rješenja (u našem primjeru Manningova koeficijenta).

4 Određivanje protoka

Protok određujemo mjerenjem brzina na nekom poznatom profilu vodotola. U našem slučaju hidrometrijskim krilom odredili smo brzine u pojedinim točkama profila 60B kanala Botonega. Na slici 5. prikazane su točke u kojima je provedeno mjerenje brzina hidrometrijskim krilom.



Slika 5. Mjerne točke za hidrometrijsko krilo na profilu 60B kanala Botonega

Rezultati mjerenja prikazani su na slici 6. Vidimo da su najveće brzine u sredini na površini vodotoka. Na temelju prikazanih rezultata mjerenja proračunana je srednja brzina u profilu tako da je presjek podijeljen na stupce (u kojima su provedena mjerenja [3]). Srednja je brzina određena kao geometrijska sredina brzina u stupcima prema jednadžbi

$$V = \frac{1}{A} \sum_k y_k \Delta x V_{S_k} \quad (6)$$

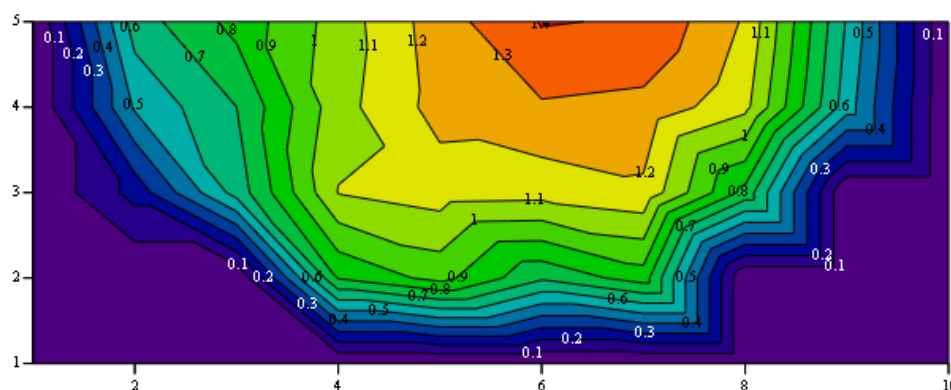
gdje je

A – ploština presjeka

y_k – dubina stupca

Δx – širina stupca k

V_{S_k} – srednja brzina vode u stupcu k .



Slika 6. Raspored brzina u presjeku 60B vodotoka prema rezultatima mjerenja hidrometrijskim krilom (protok ~8,5 m³/s)

Srednja brzina vode u stupcu određuje se uz pretpostavku logaritamske raspodjele brzine po visini (potrebno je podatke mjerenja interpolirati logaritamskom krivuljom, French [3]).

Pretpostavlja se da je protok određen jednadžbama (6.) i (5.a) konstantan unutar kontrolnog volumena vodotoka.

5 Rješavanje jednadžbe kontinuiteta

Da bismo riješili jednadžbu (5.b) trebaju nam brzine i dubine u dva poznata profila (na krajevima zamišljenoga kontrolnog volumena). Dubine se dobivaju mjerenjima, a srednje brzine potrebno je proračunati iz jednadžbe kontinuiteta (5.a). Osnovni je problem pri tome što je za proizvoljni profil jednadžba (5.a) nelinearna i u općem slučaju može se riješiti nekim numeričkim postupkom.

Za potrebe interpretacije rezultata mjerenja razvijen je računalni program u okruženju MathCad koji rješava jednadžbu kontinuiteta za proizvoljni presjek zadan geodetskim koordinatama. Navedeni program definira poprečni presjek kao poligon od n točaka, a visinu vode kao

pravac. Definirana je procedura koja traži presjecište tog pravca i zadanog poligona, a nakon toga definira se ploština, opseg i hidraulički polumjer za zadanu dubinu vode u poprečnom presjeku. Ta procedura definira funkcije $A(h)$, $O(h)$ i $R(h)$ i za zadani protok Q omogućuje numeričko određivanje potrebne dubine h . Proračun se provodi s pomoću implicitno zapisane jednadžbe kontinuiteta

$$F(h) = V_s A(h) - Q_{zadano} = 0 \quad (7)$$

Prema Newtonovu je postupku rješenje određeno iterativnim postupkom

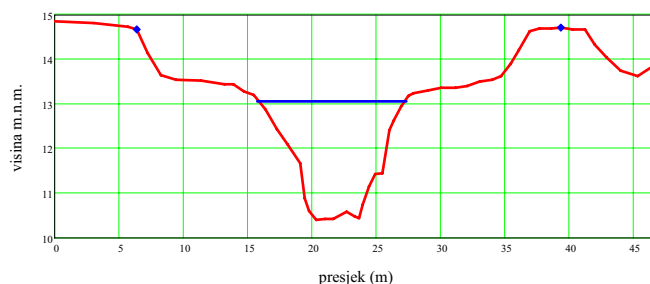
$$h_{i+1} = h_i - \frac{F(h_i)}{dF(h_i)} \quad (8)$$

pri čemu se derivacije funkcije (7) određuju numerički, najjednostavnije preko konačne razlike u sljedećoj točki

$$dF(h) = \frac{F(h + \Delta h) - F(h)}{\Delta h}$$

Slika 7. prikazuje poprečni presjek profila 1 i razinu vode koja odgovara zadanom protoku od $Q=25 \text{ m}^3/\text{s}$.

Kada je poznat protok Q i dubina h , možemo odrediti i kritičnu dubinu presjeka i Froudeov broj (primjeru na slici 7. odgovara $F_r=0,345$, što znači da je tok subkritičan).



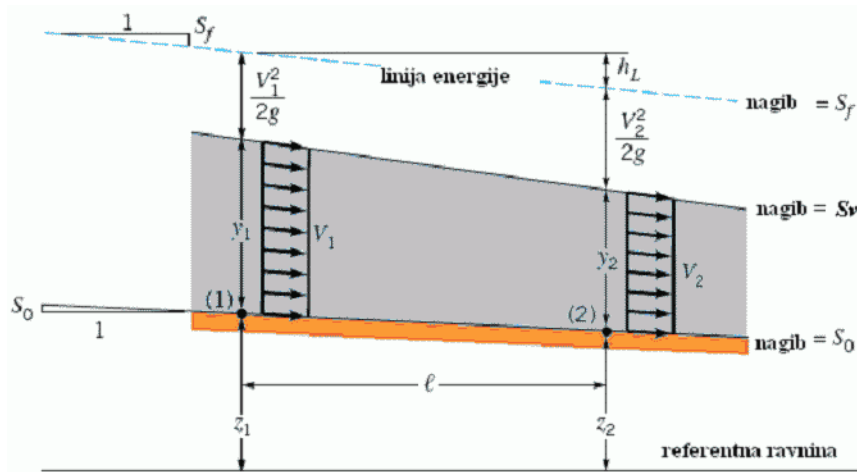
Slika 7. Poprečni profil 1 i razina vode koja odgovara protoku $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$

6 Rješavanje energijske jednadžbe

Pošto smo riješili jednadžbu (5.a) za dva susjedna profila imamo sve potrebne podatke za određivanje pada energijske linije S_f .

Kontrolni volumen koji odgovara jednadžbi (5.b) jest segment kanala prikazan na slici 8. Pretpostavlja se da je nagib dna kanala $S_0 = (z_1 - z_2)/l$ konstantan na promatranom dijelu. Dubine vode i brzine y_1, y_2, V_1, V_2 prikazane su na slici. Dubina vode mjeri se u vertikal-

nom smjeru, a udaljenost x je horizontalna. Kod većine je otvorenih kanala nagib dna S_0 vrlo malen, tako da je dno gotovo horizontalno. U tom slučaju možemo uzeti da su vrijednosti x i y udaljenost duž dna kanala i dubina okomita na dno.



Slika 8. Karakterističan segment kanala

Razlog zbog kojeg je u jednadžbi (5.b) s desne strane moguće uvrstiti $S_f = h_L/l$ razjašnjen je kod Liggetta [10]. Naime, u slučaju kad zanemarimo toplinski tok, pad energijske linije h_L jednak je gubitku mehaničke energije između dvaju razmatranih presjeka toka, a to je upravo jednako definiciji otpora tečenju.

Integriramo li jednadžbu (2.b) unutar granica 1 i 2 i uz pretpostavku ravnomjernog rasporeda brzine u poprečnom presjeku bilo kojeg dijela kanala, jednodimenzijaska diferencijalna jednadžba očuvanja energije (2.b) postaje algebarska jednadžba:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (9)$$

gdje je h_L gubitak energije zbog otpora tečenju između presjeka 1 i 2. Kako usvajamo da je tlak u svakom poprečnom presjeku dominantno hidrostatski, tako je

$$\frac{p_1}{\rho g} = y_1, \text{ a } \frac{p_2}{\rho g} = y_2 \text{ i } z_1 - z_2 = S_0 l \text{ pa jednadžba (9)}$$

postaje :

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + S_0 l = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad (10)$$

Ponovno uvodimo izraz za gubitak energije u odnosu na nagib energijske linije $S_f = h_L/l$. Linija energije je zbroj razine z (što predstavlja potencijalnu energiju izraženu geodetskom visinom), razine, $p/\rho g$ (energije tlaka) i razine $V^2/2g$ (kinetičke energije). Zbog toga jednadžbu (10) možemo napisati kao

$$S_f = \frac{y_1 - y_2}{l} - \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2gl} + S_0 \quad (11)$$

Izrazom (11) određujemo pad energijske linije potreban za određivanje Manningova koeficijenta.

7 Proračun Manningova koeficijenta

Kad imamo poznat pad energijske linije S_f , vrijednost Manningova koeficijenta hrapavosti računamo jednadžbom

$$n = \frac{1}{V} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_f} \quad (12)$$

gdje je

n - Manningov koeficijent hrapavosti

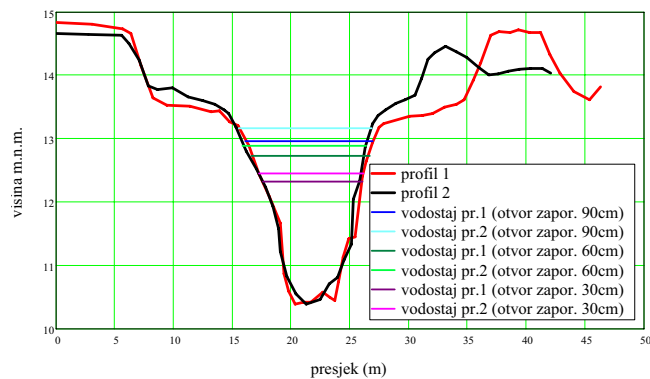
V - srednja brzina

R - hidraulički polumjer

Jednadžba (12) vezana je za poprečni presjek, što znači da pri uvrštavanju rezultata mjerenja imamo dvije mogućnosti; naime, V i R mogu biti određeni iz presjeka 1 ili presjeka 2. U ovom radu načinjen je proračun za obadva presjeka i pretpostavljeno je da njihova aritmetička sredina predstavlja traženi koeficijent hrapavosti. Kako se radi o mjerenjima na stvarnom vodotoku, pretpostavlja se da se koeficijent hrapavosti nalazi unutar nekih granica pa se može reći da rezultati presjeka 1 i 2 definiraju neke granice unutar kojih se nalazi Manningov koeficijent.

8 Rezultati i diskusija

Na temelju provedenih mjerenja proračunane su vrijednosti Manningova koeficijenta hrapavosti kanala Botonega i to samo za glavni kanala bez inundacija. U tablici 1. prikazani su rezultati proračuna.



Slika 9. Poprečni presjeci susjednih profila 1 i 2 s izmjerenim vodostajima za razne protoke

Tablica 1. Manningovi koeficijenti hrapavosti za razne protoke

Profil	Otvor zapornice (cm)	Protok (m ³ /s)	Razmak profila (m)	Tip kanala	Srednja brzina (m/s)	Manningov koeficijent hrapavosti <i>n</i>
1	90	22,732	50 (1-1A)	zemlj., trava	1,325	0,04037
1	60	16,574	50 (1-1A)	zemlj., trava	1,129	0,04143
1	30	9,301	50 (1-1A)	zemlj., trava	0,842	0,04459
1	90	22,732	100 (1-2)	zemlj., trava	1,325	0,03944
1	60	16,574	100 (1-2)	zemlj., trava	1,129	0,04139
1	30	9,301	100 (1-2)	zemlj., trava	0,842	0,04488
1A	90	22,732	50 (1A-2)	zemlj., trava	1,377	0,03596
1A	60	16,574	50 (1A-2)	zemlj., trava	1,219	0,03572
1A	30	9,301	50 (1A-2)	zemlj., trava	0,977	0,03641
30	90	22,732	50(30-30A)	zemlj., trava	1,465	0,03456
30	60	16,574	50(30-30A)	zemlj., trava	1,317	0,04284
30	30	9,301	50(30-30A)	zemlj., trava	0,974	0,0381
30	90	22,732	100(30-31)	zemlj., trava	1,465	0,04093
30	60	16,574	100(30-31)	zemlj., trava	1,317	0,04191
30	30	9,301	100(30-31)	zemlj., trava	0,974	0,04392
30A	90	22,732	50(30A-31)	zemlj., trava	1,197	0,04693
30A	60	16,574	50(30A-31)	zemlj., trava	1,053	0,05591
30A	30	9,301	50(30A-31)	zemlj., trava	0,788	0,06794
39	90	22,270	50(39-39A)	zemlj., trava	1,075	0,03691
39	60	16,112	50(39-39A)	zemlj., trava	0,982	0,03854
39	30	8,839	50(39-39A)	zemlj., trava	0,793	0,03907
39	90	22,270	100(39-40)	zemlj., trava	1,075	0,03294
39	60	16,112	100(39-40)	zemlj., trava	0,982	0,03595
39	30	8,839	100(39-40)	zemlj., trava	0,793	0,03646
39A	90	22,270	50(39A-40)	zemlj., trava	1,128	0,03003
39A	60	16,112	50(39A-40)	zemlj., trava	1,034	0,0314
39A	30	8,839	50(39A-40)	zemlj., trava	0,845	0,03103
58	90	21,988	50(58-58A)	zemlj., trava	1,173	0,04426
58	60	15,830	50(58-58A)	zemlj., trava	1,091	0,04663
58	30	8,557	50(58-58A)	zemlj., trava	0,883	0,04401
58	90	21,988	100(58-59)	zemlj., trava	1,173	0,04505
58	60	15,830	100(58-59)	zemlj., trava	1,091	0,04431
58	30	8,557	100(58-59)	zemlj., trava	0,883	0,04758
58A	90	21,988	50(58A-59)	zemlj., trava	1,266	0,04025
58A	60	15,830	50(58A-59)	zemlj., trava	1,203	0,03551
58A	30	8,557	50(58A-59)	zemlj., trava	1,039	0,03995
59	90	21,988	112,93(59-60)	zemlj., trava	1,165	0,03577
59	60	15,830	112,93(59-60)	zemlj., trava	1,073	0,04149
59	30	8,557	112,93(59-60)	zemlj., trava	0,837	0,05051

Proračunane su vrijednosti Manningova koeficijenta za tri različita protoka (kod otvora zapornice od 90, 60 i 30 cm) na mjerenim profilima na uzvodnom, središnjem i nizvodnom dijelu kanala. Manningov se koeficijent proračunao za razmak susjednih profila od 50 m (na pr. profil 1-1A i profil 1A-2) odnosno za razmak susjednih profila od 100 m (na pr. profil 1-2).

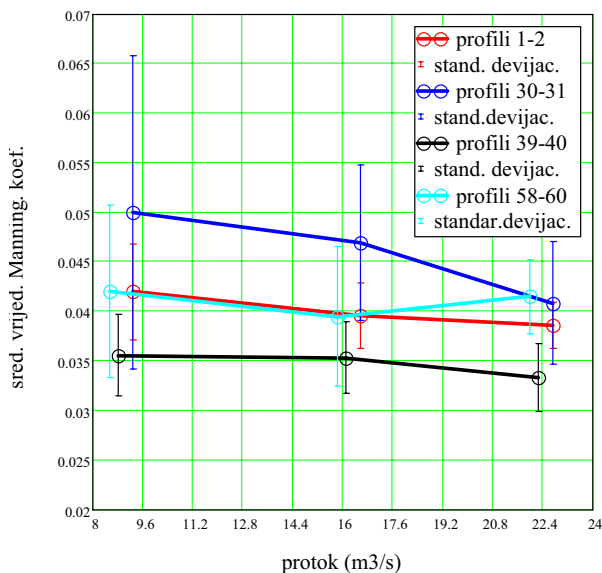
Na slici 9. vidimo poprečne presjeke nekih mjerenih mjesta, zajedno s izmjerenim visinama vode za tri različita protoka. Mjerenja dubine vode na susjednim profilima obavljena su istodobno.

Za proračunane Manningove koeficijente za tri različita protoka (oko 9 m³/s, 16 m³/s i 22 m³/s) također je proračunana i standardna devijacija, tj. odstupanje od srednje vrijednosti, što je prikazano na slici 10.

Srednja vrijednost Manningova koeficijenta kreće se u području od 0,0333 do 0,05 s minimalnom standardnom devijacijom od $2,325 \cdot 10^{-3}$ do maksimalno 0,016.

Dobivene vrijednosti Manningova parametra nešto su veće od onih u literaturi (0,028 – 0,035). To možemo objasniti time što se zapornica temeljnog ispusta povremeno otvara, tako da protok za koji je proračunan Ma-

nningov koeficijent (oba 22 m³/s, 16 m³/s, 9 m³/s) nije stalan, nego samo povremen. Protok u kanalu kod zatvorene zapornice ovisi o dotocima iz bujica i slijeva i puno je manji nego kod ispuštanja vode. (Tako je na pr. izmjeren protok dana 2. 2. 2006. u glavnom odvodnom kanalu Botonega bio od 0,118 m³/s do 0,284 m³/s.)



Slika 10. Srednja vrijednost Manningova koeficijenta sa standardnom devijacijom

Pretpostavlja se da je Manningov koeficijent veći zbog okomite komponente brzine tečenja od ulaska vode u stijenke kanala jer kanal nije bio natopljen vodom. Sloj trenja između vode i kanala deblji je nego u slučaju kada bi tlo bilo natopljeno vodom. Kada bi voda tekla dulje razdoblje (nego što je to bio slučaj kod ovog mjerenja) pretpostavlja se da bi Manningov koeficijent bio manji od izmjerenoga. Rezultati mjerenja i proračuna Manningova koeficijenta kod kanala za navodnjavanje, provedeni na Sveučilištu Shiraz,



Slika 11. Nizvodni dio kanala nakon zatvaranja zapornice

pokazali su da je kod prvog puštanja vode vrijednost Manninga n bila veća nego kod drugog i trećeg puštanja vode približno 60-70 % [4] (proračun se zasniva na jednadžbi očuvanja mase u obliku diferencijalne jednadžbe koja je riješena metodom konačnih razlika).

Zatvaranjem zapornice i smanjenjem razine vode u kanalu je bilo panjeva, a uočena je i erozija (slika 11.), što je također jedan od razloga nešto većeg Manningova parametra nego u literaturi.

Korisno je napomenuti da izrazi (4) pretpostavljaju nepromjenjivost koeficijenata po dubini kanala, što u stvarnosti nije tako. Na primjer, Dingmann [7] navodi izraz za zakon promjene Manningova koeficijenta po dubini presjeka. Iako taj izraz nije upotrijebljen u ovome radu, iz rezultata se vidi da je Manningov koeficijent različit za različite protoke, odnosno, da se smanjuje s povećanjem protoka kako je i predviđeno u Dingmannovu radu [7].

9 Zaključak

Modeliranje tečenja u otvorenim kanalima bitno je za određivanje kapaciteta kanala i predviđanje eventualnih razlijevanja (poplava). Osim geometrijskih karakteristika kanala, u jednadžbu jednodimenzijskog modela tečenja ulazi parametar koji povezuje sve utjecaje koji pružaju otpor strujanju vode. Odabir odgovarajućeg koeficijenta otpora tečenju nije jednostavan zadatak jer traži vremenski koordinirana mjerenja duž vodotoka, ali je veoma važan za točnost proračuna strujanja u otvorenim vodotocima.

Na specifičnoj lokaciji odvodno-obuhvatnog kanala Botonega pristupilo se mjerenjima geometrijskih i hidrauličkih parametara na više presjeka duž kanala tijekom ispuštanja vode iz akumulacije. Na temelju provedenih mjerenja proračunan je Manningov koeficijent hrapavosti za različite protoke.

Uz provjeru režima tečenja (turbulentno tečenje) te pretpostavke da su zadovoljeni uvjeti stacionarnog postupno promjenjivog toka, možemo se koristiti jednodimenzijski model strujanja rješavanjem jednadžbe kontinuiteta i energijske jednadžbe, uz opis otpora tečenju Manningovom jednadžbom. U slučaju da navedene pretpostavke nisu zadovoljene, određivanje parametara otpora tečenju bitno je složenije jer umjesto sustava nelinearnih algebarskih imamo sustav diferencijalnih jednadžbi.

Dobivene vrijednosti Manningova koeficijenta hrapavosti nisu konstantane duž vodotoka, a variraju i ovisno o dubini toka (o protoku), kao što neki radovi i pretpostavljaju (na pr. Dingmann [7]), pa to ostaje smjernica za nastavak rada na modeliranju jednodimenzijskog tečenja u kanalima.

LITERATURA

- [1] Munson, B. R.; Young, D. F.; Okiishi, T. H.: *Fundamentals of Fluid Mechanics Fourth Edition*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [2] Chow, V. T.: *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York, 1959.
- [3] French, R. H.: *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1985.
- [4] Sepaskhah, A.R.; Bondar, H.: Estimation of Manning Roughness Coefficient for Bare and Vegetated Furrow Irrigation, *Biosystems Engineering* (2002) 82(3), 351-357
- [5] HEC-RAS *River Analysis System Hydraulic Reference Manual*, Version 3.1, US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis, California, November 2002.
- [6] Bjerklie, D. M.; Dingmann, S. L.; Bloster, C. H.: *Comparison of constitutive flow resistance based on the Manning and Chezy equations applied to natural rivers*, Water Resources Research (2005), 41, W11502
- [7] Dingmann, S. L.: *Analytical derivation of at-a-station hydraulic-geometry relations*, Journal of Hydrology, (2006) Article in press
- [8] Zaghoul, N. A.; Anwar, M. N.: *Numerical integration of gradually varied flow in trapezoidal channel*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (1991) 88, 259-272
- [9] Chanson, H.: *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [10] Liggett, J. A.: *Critical Depth, Velocity Profiles, and Averaging*, Journal of Irrigation and Drainage, (1993), 119(2), 416-422
- [11] Jain, S. C.: *Open-channel flow*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- [12] MathCad 13 User manual, 2005.
- [13] Jović, V.: *Osnove hidromehanike*, 1. izdanje, Element, Zagreb, 2006.

Zahvala

Zahvaljujemo svima koji su sudjelovali u organizaciji mjerenja na odvodno-obuhvatnom kanalu Botonega, a posebno zahvaljujemo zaposlenicima Hrvatskih voda, VGO Rijeka koji su sudjelovali u mjerenju.