

I vježba

Postupno promjenjivo tečenje u otvorenom koritu

Cilj ove numeričke vježbe je proračun oblika vodnog lica za stacionarno, nejednoliko, konzervativno tečenje u otvorenom koritu konstantnog (trapeznog) poprečnog presjeka. Oblik vodnog lica je definiran geometrijom poprečnog presjeka, protokom, hrapavošću korita, padom dna korita i dubinom vode u kontrolnom profilu.

Tečenje u otvorenim koritima se, obzirom na oblik vodnog lica, može podijeliti na jednoliko i nejednoliko. Jednoliko tečenje se može javiti samo pri stacionarnom tečenju u koritima konstantnog poprečnog presjeka, konstantnog pada dna i konstantne hrapavosti. Slobodno vodno lice je pri tome paralelno s dnom kanala. U prirodnim koritima se oblik i površina poprečnog presjeka, kao i pad kanala, često mijenjaju pa je pojava jednolikog tečenja u prirodnim koritima vrlo rijetka.

U svrhu predviđanja promjene dubine i brzine duž vodotoka ili udaljenosti do koje će se protezati utjecaj uspora nakon izgradnje nekog hidrotehničkog objekta (npr. ustave, akumulacije,...), u praksi se često računa oblik vodnog lica pri nejednolikom tečenju. Budući da se tečenje s postupnim promjenama odvija na dugačkim dionicama vodotoka, utjecaj trenja na kontaktu s koritom je značajan.

Postupno promjenjivo tečenje duž toka se javlja u slučajevima kad postoji promjena pada dna ili hrapavosti korita. Za nejednoliko tečenje je važno naglasiti da se pad dna kanala (I_0) ne podudara s padom vodnog lica (I) te se javlja promjena brzine i dubine duž korita.

Oblik vodnog lica pri postupno promjenjivom tečenju će biti izračunat tako što će se promatrana dionica korita podijeliti na niz manjih segmenata te će se u svakom segmentu zadovoljavati vladajuće jednadžbe. Ovaj postupak se zasniva na nizu pretpostavki od kojih su najznačajnije sljedeće:

- linijski gubitci u svakom računskom segmentu su isti kao i pri jednolikom tečenju
- brzina je konstantna (jednaka) po cijelom poprečnom protjecajnom profilu
- pad dna je manji od 10%
- koeficijent hrapavosti je konstantan na promatranoj dionici i neovisan je o dubini vode
- dubina vode se mijenja postupno duž korita počevši od nekog poznatog rubnog uvjeta (nema iznenadnog povećanja ili smanjenja dubine vode)
- promatrana dionica korita je dovoljno dugačka da dubina dosegne normalnu vrijednost
- postupnost promjene uključuje pretpostavku o okomitosti strujnih linija na živi presjek u svim presjecima toka (zakrivljenost strujnica je zanemarivo mala) što uvjetuje i pretpostavku hidrostatskog rasporeda tlaka u presjeku

1. Specifična energija presjeka i režim tečenja

Da bi se odredio režim toka potrebno je odrediti odnos kritične dubine i dubine u koritu, koji se mogu prikazati na dijagramu specifične energije.

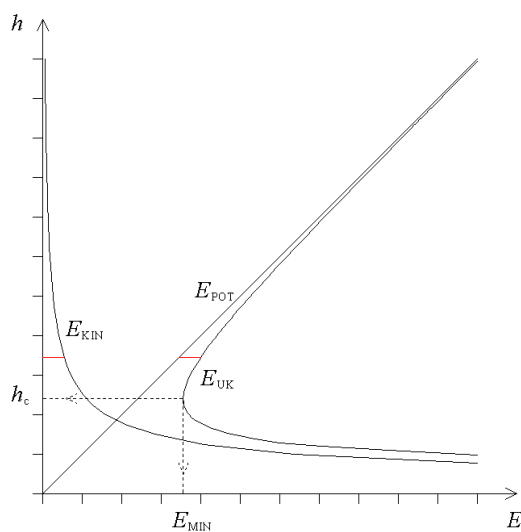
Specifična energija je energija toka u određenom presjeku u odnosu na dno korita te je definirana izrazom:

$$E = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2}$$

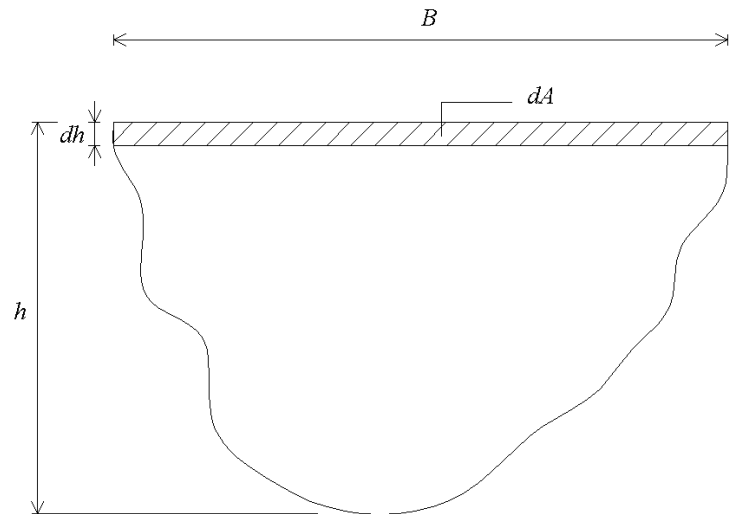
Minimum specifične energije se određuje postavljanjem uvjeta da je derivacija funkcije specifične energije jednaka nuli:

$$\frac{dE}{dh} = \frac{d}{dh} \left(h + \frac{\alpha v^2}{2g} \right) = \frac{d}{dh} \left(h + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \right) = 1 - \frac{\alpha Q^2}{gA^3} \cdot \frac{dA}{dh} = 0$$

Dubina kod koje specifična energija presjeka E za određeni protok postaje minimalna, naziva se *kritična dubina* (h_c).



Slika 1.1 Krivulja specifične energije za zadani protjecajni presjek i protok



Slika 1.2 Poprečni presjek korita

Prema slici 1.2 može se zaključiti da je:

$$\frac{dA}{dh} = B$$

Minimum specifične energije se može definirati kao:

$$\frac{dE}{dh} = 1 - \frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot A^3} \cdot \frac{dA}{dh} = 1 - Fr$$

pri čemu se član

$$\frac{\alpha \cdot Q^2 \cdot B}{g \cdot A^3} = Fr$$

naziva *Froudeov broj*. U dijelu stručne literature se lijevi član gornje jednadžbe označava kao kvadrat Froudeovog broja (Fr^2).

Minimum specifične energije i kritična dubina se javljaju kad je $Fr = 1$. Kritični pad I_c je onaj pad kod kojeg je pri jednolikom tečenju normalna dubina jednaka kritičnoj.

Pri jednolikom tečenju su sva tri pada, tj. pad linije energije, vodnog lica i dna korita jednaka, a dubina vode koja se javlja pri jednolikom tečenju se naziva *normalna dubina* (h_0).

Za određivanje protoka pri jednolikom tečenju dano je više matematičkih modela od kojih su tri najčešće u upotrebi:

Chezy: $Q = C \cdot A \cdot \sqrt{RI}$

Manning: $Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot A \cdot \sqrt{I}$

Strickler: $Q = K_s \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot A \cdot \sqrt{I}$

gdje je:

- A – površina protjecajnog presjeka (m^2)
- C – Chezyjev koeficijent ($m^{1/2} / s$)
- n – Manningov koeficijent hrapavosti ($s / m^{1/3}$)
- K_s – Stricklerov koeficijent glatkosti
- R – hidraulički radijus

Za računanje protoka se preporuča korištenje Manningove jednadžbe i Manningovog koeficijenta hrapavosti jer se pokazalo da Chezyjev koeficijent hrapavosti nije konstantan za jedno korito već da ovisi o hidrauličkom radijusu. Orijentacijske vrijednosti koeficijenta n i K su priložene u tablici 1.1, a nešto detaljniji prikaz (na engleskom jeziku) je dan kao prilog opisu ove vježbe.

2. Oblici vodnog lica kod postupno promjenjivog tečenja

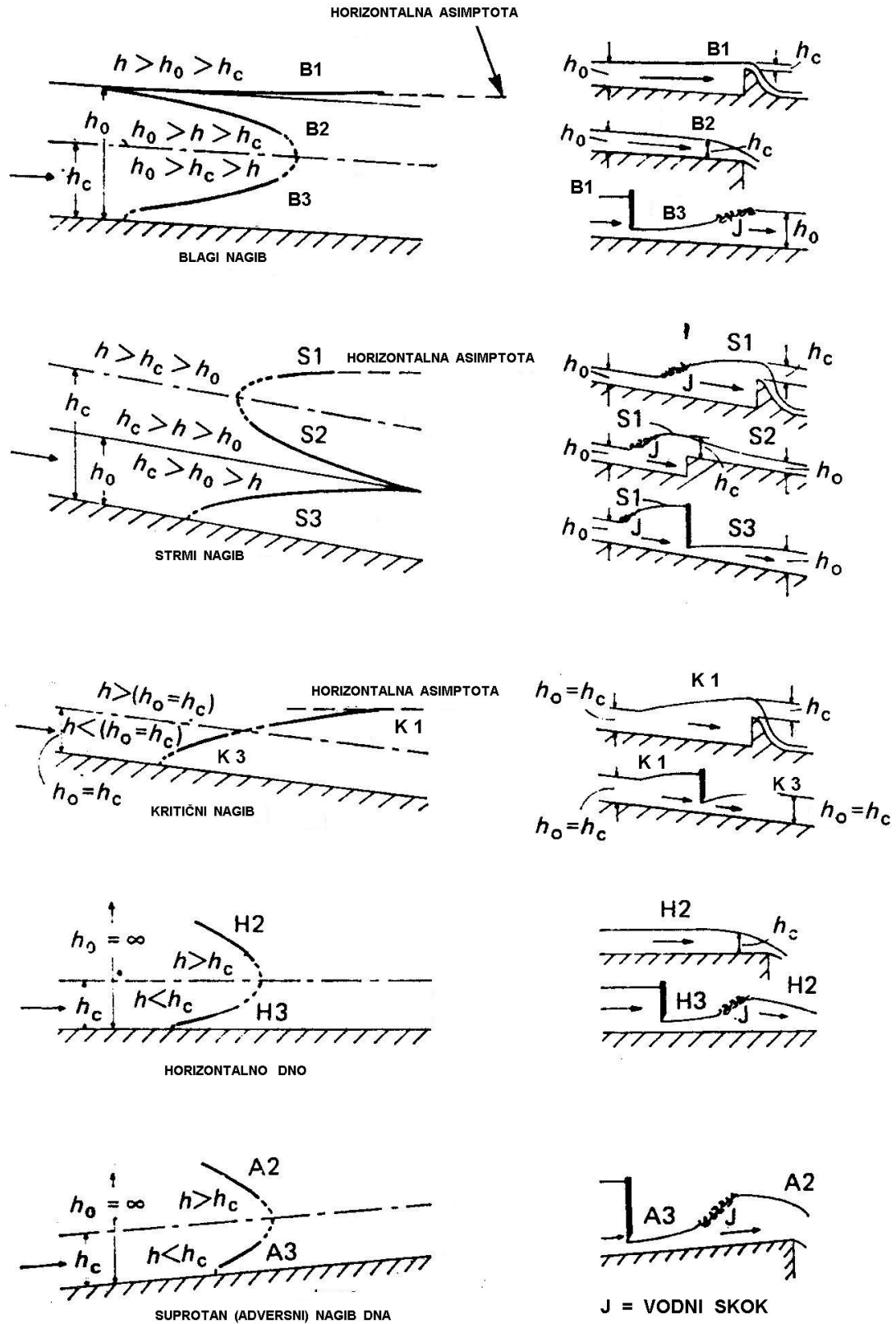
Za zadani oblik kanala i odabrani protok postoji samo jedna dubina pri kojoj se može javiti jednoliko tečenje. Ta dubina se naziva *normalna dubina*. *Kritična dubina* je dubina kod koje specifična energija presjeka (E) za dani protok postaje minimalna. Osim spomenute dvije dubine, u stacionarnom toku se može formirati niz drugih dubina koje formiraju razne oblike vodnog lica.

Prvi korak u računanju postupno promjenjivog tečenja je određivanje tipa krivulje vodnog lica koja će se formirati u koritu. Tip krivulje ovisi o nagibu dna korita, normalnoj dubini, kritičnoj dubini i dubini u kontrolnom profilu.

Kateg.	VRSTA STIJENKI	n	$K_s=1/n$
I	Osobito glatke površine – emajlirane ili glazirane	0.009	111
II	Vrlo dobro blanjane daske, dobro sastavljene; najbolja zaglađena cementna žbuka	0.010	100
III	Najbolja cementna žbuka (1/3 pijeska); cijevi od lijevanog željeza; dobro sastavljene željezne cijevi	0.011	90.9
IV	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; ponešto nečiste vodovodne cijevi	0.013	76.9
VI	Zaprljane cijevi (vodovodne i za otpadnu vodu); betonirani kanali u osrednjem stanju	0.014	71.4
VII	Srednje dobra obloga od opeke; tarac od klesanog kamena u srednjem stanju; dosta zaprljane cijevi za otpadnu vodu	0.015	66.7
VIII	Dobar tarac od lomljenog kamena; stara (oštećena) obloga od kamena; relativno grub beton	0.017	58.8
IX	Kanali pokriveni debelim stabilnim slojem mulja; kanali u zbijenom sitnom šljunku s neprekidnim tankim slojem mulja	0.018	55.6
X	Srednje dobar tarac od lomljena kamena; tarac od oblutka; kanali usječeni u kamenu, pokriveni tankim muljem	0.020	50.0
XI	Kanali u zbijenoj glini, lesu, šljunku i zemlji, pokriveni isprekidano tankim slojem mulja; veliki zemljani kanali u dobrom stanju	0.022	44.4
XII	Veliki zemljani kanali srednje održavanosti; rijeke (čisto pravolinijsko korito bez urušavanja obala)	0.025	40.0
XIII	Zemljani veliki kanali u nešto slabijem stanju i mali kanali u srednjem stanju	0.027	36.4
XIV	Zemljani kanali u slabom stanju (šaš, oblutice ili šljunak na dnu) ili prilično zarasli travom i s odronjavanjem obala	0.030	33.3
XV	Kanali s nepravilnim profilom, prilično zatrpani kamenom ili obrasli; rijeke u relativno dobrom stanju, s nešto kamena i šaši	0.035	28.6
XVI	Kanali u veoma lošem stanju; rijeke s većom količinom kamena i šaši, vijugavim koritima i pojavom plićaka	≥ 0.04	≤ 25

Tablica 1.1 Vrijednosti Manningovog koeficijenta hrapavosti n

Podjela oblika vodnih lica se zasniva na nagibu dna kanala i na odnosu razine vode prema normalnoj i kritičnoj dubini. Nagib dna kanala može biti strm (**S**) ($I_0 > I_c$), kritičan (**K**) ($I_0 = I_c$), blag (**B**) ($I_0 < I_c$), horizontalan (**H**) ($I_0 = 0$) ili suprotan (**A**) (adversni) ($I_0 < 0$). Profili se dalje klasificiraju ovisno o dubini vode koja može biti veća ili manja od normalne i veća ili manja od kritične. Ako je dubina vode veća od normalne (h_0) i kritične dubine (h_c), tip vodnog lica se može označiti indeksom 1, ako je dubina u profilu između h_0 i h_c tip vodnog lica se može označiti indeksom 2, a ako je dubina manja i od kritične i od normalne tada oblik vodnog lica dobiva indeks 3.



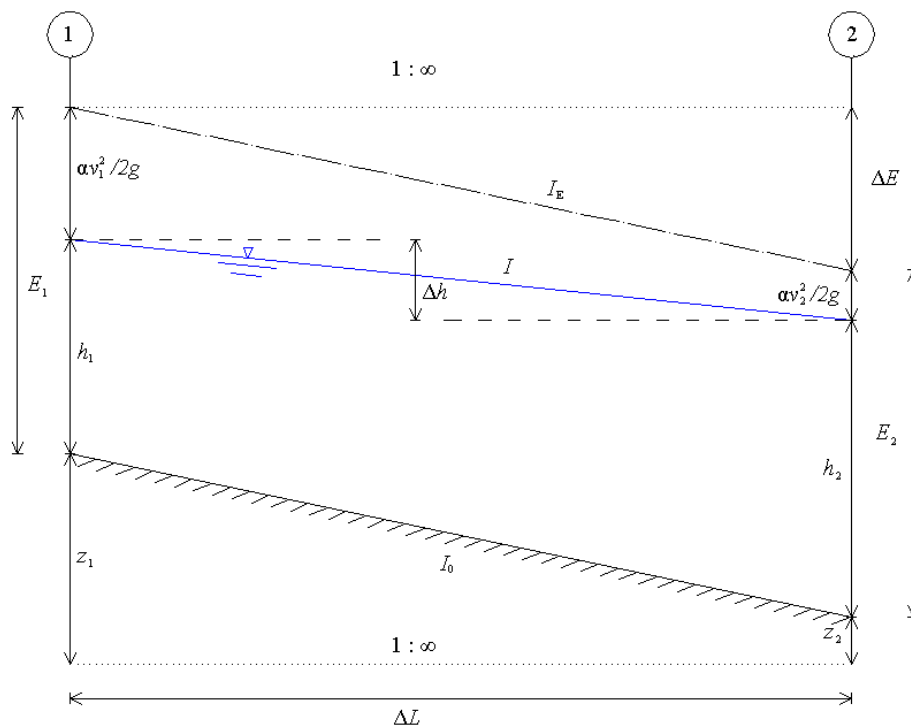
Slika 1.3 Oblici vodnog lica

Normalno tečenje nije moguće u kanalu s horizontalnim i adversnim padom dna pa krivulje $H1$ i $A1$ ne postoje. Kod kritičnog pada su dubine h_0 i h_c identične pa krivulja $K2$ ne postoji. Kombiniranjem padova dna kanala i mogućim dubinama vode je definirano 12 profila vodnog lica koji se mogu javiti u otvorenom koritu i koji su shematski prikazani na slici 1.3. Shematski prikazi su jako distorzirani. U praksi je često teško vizualno odrediti oblik vodnog lica.

3. Proračun oblika vodnog lica

Uobičajeni pristup modeliranju nejednolikog tečenja se zasniva na podjeli promatrane dionice korita (u našem slučaju od profila s normalnom dubinom do kontrolnog profila) na niz proračunskih segmenata na kojima trebaju biti zadovoljene dinamička i jednadžba kontinuiteta.

U prikazanom primjeru će se usvojiti da je tečenje konzervativno što uključuje pretpostavku o konstantnosti protoka duž toka ($\partial Q / \partial l = 0$). Ova pretpostavka u prirodi nije uvijek zadovoljena jer postoje pritoci i infiltracija vode u podzemlje, koje u tom slučaju pri proračunu treba uzeti u obzir.



Slika 1.4 Oznake za dva poprečna presjeka jednog računskog segmenta

Između dva računaska presjeka treba biti zadovoljen zakon održanja energije koji se u visinskom obliku (Bernoullijeva jednadžba) može napisati:

$$\frac{d}{dl} \left(z + h + \frac{\alpha \cdot Q^2}{2g \cdot A^2} \right) - I_E = 0$$

I_E označava pad linije energije toka koji nastaje prijelazom dijela mehaničke energije u toplinsku energiju djelovanjem sile trenja.

Coriolisov koeficijent α predstavlja korekciju kinetičke energije presjeka izračunate preko srednje brzine koji se uvodi zbog nejednolikog rasporeda brzine u poprečnom presjeku toka. Koeficijent α ima vrijednost $\alpha \geq 1$, a u hidrotehničkoj praksi se za otvorena korita najčešće usvaja $\alpha = 1.1$.

Jednadžba kontinuiteta kaže da je protok u svim računskim profilima pri stacionarnom i konzervativnom tečenju jednak.

Na osnovi izračunate vrijednosti normalne i kritične dubine može se odrediti pad dna kanala. U slučaju da je $h_0 > h_c$ u programu će se računati vodno lice za korito sa blagim nagibom (tip krivulje B na slici 1.3) a u slučaju da je $h_c > h_0$ u programu će se određivati oblik vodnog lica u koritu strmog nagiba (tip krivulje S).

Proračun počinje od kontrolnog profila u kojem je za svaku dubinu vode h jednoznačno određen protok Q .

Kao kontrolni profil se u praksi najčešće koristi ustava s preljevom ili ispustom, naglo suženje, široki prag ili drugi hidrotehnički objekt u koritu rijeke kod kojeg dolazi do promjene režima tečenja (iz mirnog u burni), odnosno u kojima je poznata konsumpcijska krivulja. U praksi se često za početak proračuna uzima i profil s poznatom konsumpcijskom ($Q - h$) krivuljom koja predstavlja srednju vrijednost ovisnosti protoka i dubine.

U slučaju da je u koritu miran režim tečenja proračun se može provesti od nizvodnog prema uzvodnom profilu ili obrnuto.

U burnom toku se poremećaj (utjecaj) ne može širiti uzvodno jer je brzina vode veća od brzine poremećaja (malih valova):

$$v > w = \sqrt{g \cdot h}$$

Zbog toga se u burnom toku kontrolni profil odabire uzvodno od promatrane dionice vodotoka, a u mirnom toku većinom nizvodno.

3.1 Numerička shema

Jednadžba nejednolikog stacionarnog toka se može riješiti približno (ali do po volji točno) rješavanjem vladajućih jednadžbi, numeričkim metodama. Proračun se vrši za određenu dionicu, ili do profila na kojem se uspostavlja približno normalna dubina. Kao što je napomenuto, promatrana dionica korita se dijeli na niz računskih segmenata omeđenih protjecajnim profilima (označenih indeksima 1, 2 ili $k, k+1$) na međusobnom razmaku ΔL . Sam proračun se može zasnivati na usvajanju razmaka ΔL između dva računski profila te računanjem razine u idućem profilu ili usvajanjem razlike u razinama između dva protjecajna presjeka Δh te računanjem njihovog međusobnog razmaka.

Jedan od načina za iterativno rješavanje vladajuće jednadžbe je da se uz poznati odsječak ΔL i na osnovu poznatih dubina i brzina vode (h^k, v^k) u jednom presjeku (presjeku k), traži dubina (h^{k+1}) i brzina (v^{k+1}) vode u idućem presjeku (presjeku $k+1$). Kao početni presjek se usvaja kontrolni profil u kojem su dubina i brzina unaprijed zadani (poznati). Kako su veličine v^{k+1} i I_E u funkciji h^{k+1} , dolazi do **implicitnog oblika** diferencijalne jednadžbe.

Ukoliko se kao poznata veličina odabere Δh , traži se odsječak ΔL što se može izraziti u **eksplicitnom obliku**. Međutim, prednost eksplicitnosti ove metode dolazi do izražaja samo kod pravilnih kanala sa stalnim padom. U ovom primjeru će biti prikazana eksplicitna shema.

Prema skici 1.4 može se pisati :

$$I_0 \cdot \Delta L + E_1 = E_2 + I_E \cdot \Delta L$$

Iz toga slijedi za eksplicitnu metodu:

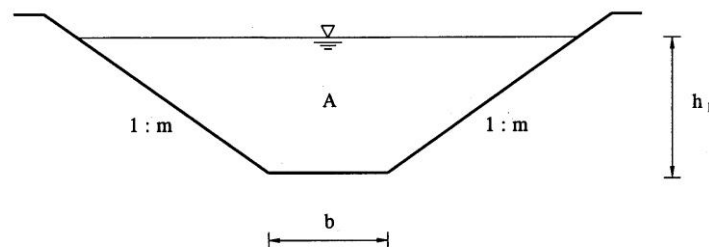
$$\Delta L = \frac{E_2 - E_1}{I_0 - I_E} \quad \left(E = h + \frac{\alpha \cdot Q^2}{2gA^2} \right)$$

Uvedemo li pretpostavku da se na dionicama malih promjena Δh zadržavaju uvjeti jednolikog tečenja pad linije energije se može proračunati nekom od jednadžbi za jednoliko tečenje uz osrednjavanje površine i hidrauličkog radijusa za protjecajne presjke k i $k+1$. Sam postupak će biti prikazan u nastavku.

4. Primjer

Za navedene podatke i za korito prema skici treba izračunati i grafički prikazati liniju slobodne vodne površine u otvorenom vodotoku pri nejednolikom stacionarnom strujanju.

Poprečni presjek korita:



$$\begin{aligned} Q &= 10.0 && (\text{m}^3/\text{s}) \\ I_0 &= 0.00034 && (1) \\ b &= 3.0 && (\text{m}) \\ h_k &= 3.5 && (\text{m}) \text{ dubina vode u kontrolnom presjeku} \\ m &= 1.5 && (1) \\ n &= 0.025 && (\text{s}/\text{m}^{1/3}) \text{ Manningov koeficijent hrapavosti} \end{aligned}$$

4.1 Određivanje režima i tipa tečenja

Prvi korak u proračunu postupno promjenjivog tečenja je određivanje oblika krivulje vodnog lica koja će se formirati u koritu a koja ovisi o padu dna kanala te o dubini vode u kontrolnom profilu i njegovom odnosu prema normalnoj i kritičnoj dubini.

4.1.1 Kritična dubina

Kritična dubina se određuje rješavanjem jednačbe:

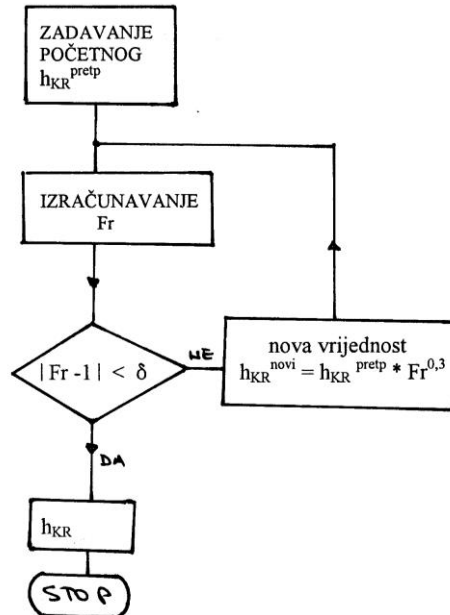
$$Fr = \frac{\alpha \cdot Q^2 \cdot B}{g \cdot A^3} = 1$$

Za trapezno korito vrijedi:

$$\begin{aligned} \text{Širina vodnog lica} & B = b + 2mh \\ \text{Površina protjecajnog presjeka} & A = h \cdot (b + mh) \end{aligned}$$

U primjeru će se usvojiti $\alpha = 1.0$.

Obično se koristi iterativni postupak u kojem se pretpostavlja kritična dubina, izračuna Froudeov broj te se na osnovu dobivenog rezultata po potrebi korigira prvobitno pretpostavljena vrijednost kritične dubine. Iterativni postupak za proračun kritične dubine h_c prikazan je na dijagramu toka:



Slika 1.5 Dijagram toka za iterativno određivanje kritične dubine (korištena oznaka h_{KR} umjesto h_c)

Proračun je prikazan u sljedećoj tablici:

h_{pretp} (m)	$B = b + 2mh$ (m)	$A = h(b + mh)$ (m ²)	Fr (¹)	h_{novi} (m)
0.6	4.8	2.34	3.819	0.897
0.897	5.691	3.898	0.98	0.891
0.891	5.673	3.864	1.003	0.892
0.892	5.676	3.869	0.999	0.892

Tablica 1.2 Iterativni postupak određivanja kritične dubine

Kao rezultat proračuna dobivena je kritična dubina $h_c = 0.892$ m.

4.2.1 Normalna dubina

Normalna dubina se određuje rješavanjem jednadžbe za jednoliko tečenje. U primjeru se koristi Manningova formula:

$$Q = A \cdot 1/n \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

Za trapezno korito vrijedi:

$$\text{Površina živog (protjecajnog) presjeka} \quad A = h \cdot (b + mh)$$

$$\text{Omočeni obod} \quad O = b + 2h\sqrt{1+m^2}$$

$$\text{Hidraulički radijus} \quad R = A/O$$

Normalna dubina se može izračunati iterativno koristeći isti tok proračuna kao i za proračun kritične dubine, s tim da se nova vrijednost normalne dubine vode h_0 odredi iz:

$$h_0^{novi} = h_0^{pretp} \cdot (Q/Q')^{0.5}$$

gdje je:

Q - zadani protok

Q' - protok dobiven za dubinu vode h_0^{pretp}

Proračun normalne dubine dan je u slijedećoj tablica:

h_0^{pretp} (m)	A (m^2)	O (m)	R (m)	Q (m^3/s)	h_0^{novi} (m)
4.0	36.0	17.4	2.07	43.7	1.927
1.927	11.35	9.95	1.141	9.14	2.015
2.015	12.139	10.267	1.182	10.01	2.014

Tablica 1.3 Iterativni postupak određivanja normalne dubine

Kao rezultat proračuna dobivena je normalna dubina $h_0 = 2.014$ m.

Dubina vode u kontrolnom profilu je zadana sa $h_k = 3.5$ m pa vrijedi $h_k > h_0 > h_c$ te se radi o usporu u mirnom toku (linija *BI* na slici 1.3).

4.2 Proračun linije slobodnog vodnog lica

U ovom primjeru će biti prikazana shema prikladna za tablični zapis odnosno za izradu programa u Microsoft Excelu. Koristiti će se pristup zasnovan na određivanju razlika između dubine u kontrolnom profilu (h_k) i normalne dubine (h_0) te definiranju dubine u računskim presjecima. Numeričkim postupkom će se određivati razmak između presjeka.

Tablica se sastoji od 14 stupaca (tablica 1.4). Sama tablica može biti i znatno kraća, ali ovdje se prikazuje u 14 stupaca zbog postupnosti i preglednosti. U svakom redu su podatci za jedan računski profil.

1. *Stupac*: (dubina vode u računskom profilu h - odabrani korak Δh). Za potrebe vježbi se može usvojiti da između dubine vode u kontrolnom profilu i normalne dubine bude 5 do 6 odsječaka Δh (ne moraju biti isti). Prva dubina vode (dubina unesena u prvom redu) je dubina vode u kontrolnom profilu. U sljedećim koracima dubina vode se povećava ili smanjuje za Δh zavisno da li je normalna dubina veća od kontrolne dubine ili manja. U prikazanom primjeru će se usvojiti da je $\Delta h = 0.3$ m
2. *Stupac*: površina protjecajnog presjeka A se može izračunati na osnovu jednadžbe

$$A = h \cdot (b + mh)$$
3. *Stupac*: omočeni obod O je za trapezno korito definiran jednadžbom

$$O = b + 2h \sqrt{(1 + m^2)}$$
4. *Stupac*: hidraulički radijus R predstavlja odnos površine protjecajnog presjeka i omočenog oboda $R = A/O$
5. *Stupac*: srednja brzina toka v se računa kao kvocijent protoka i površine protjecajnog presjeka

$$v = Q/A$$
6. *Stupac*: kinetička energija izražena u visinskom obliku $v^2/2g$
7. *Stupac*: vrijednost specifične energije u presjeku $E = h + v^2/2g$
8. *Stupac*: razlika specifične energije između dva računsa presjeka $\Delta E = E_2 - E_1$
9. *Stupac*: srednja vrijednost površine protjecajnog presjeka $A_{sr} = (A_2 + A_1)/2$
10. *Stupac*: sadrži srednju vrijednost hidrauličkog radijusa $R_{sr} = (R_2 + R_1)/2$
11. *Stupac*: može se iskoristiti za računanje člana $A_{sr}^2 \cdot R_{sr}^{4/3}$
12. *Stupac*: može sadržavati vrijednost pada linije energije

$$I_E = \frac{Q^2 \cdot n^2}{A_{sr}^2 \cdot R_{sr}^{4/3}}$$

13. *Stupac*: razlika između pada dna i pada linije energije $I_0 - I_E$
14. *Stupac*: proračun razmaka između dva računsa profila $\Delta L = \Delta E / (I_0 - I_E)$

Nakon što je izračunat razmak između kontrolnog profila sa dubinom vode $h_k = 3.5$ m i prvog profila sa dubinom vode $h = 3.2$ m može se prijeći na idući korak, tj. na računanje razmaka između profila s dubinom $h = 3.2$ m i profila s dubinom $h = 2.9$ m (idući red u tablici 1.4).

Na kraju se sumiraju svi ΔL , čime se dobiva ukupna duljina utjecaja, tj. ukupna duljina uspora. Negativni ΔL označava da se radi o uzvodnom utjecaju.

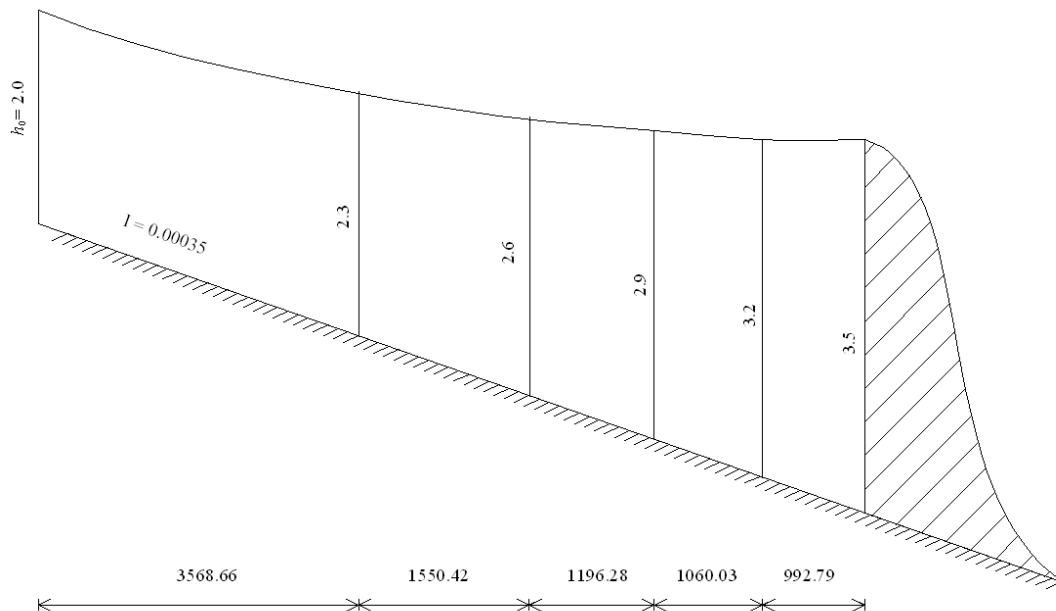
h	A	O	R	v	$\frac{v^2}{2g}$	E	ΔE	A_{sr}	R_{sr}	$A_{sr}^2 R_{sr}^{4/3}$	I_E	$I_0 - I_E$	ΔL
[m]	[m ²]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m]	[m ^{16/3}]	[1]	[1]	[m]
3,5	28,88	15,62	1,849	0,346	0,006	3,506	-0,298	26,92	1,783	1566,27	0.00003990	0.0003001	-992.79
3,2	24,96	14,54	1,717	0,401	0,008	3,208	-0,297	23,14	1,651	1044,19	0.00005986	0.0002801	-1060.03
2,9	21,32	13,46	1,584	0,469	0,011	2,911	-0,295	19,63	1,517	671,44	0.00009308	0.0002469	-1196.28
2,6	17,94	12,37	1,450	0,557	0,016	2,616	-0,293	16,39	1,382	413,29	0.00015123	0.0001888	-1550.42
2,3	14,84	11,29	1,314	0,674	0,023	2,323	-0,288	13,42	1,244	240,97	0.00025936	0.0000806	-3568.66
2,0	12,00	10,21	1,175	0,833	0,035	2,035							

$\Sigma \Delta L = -8368.18$

Tablica 1.4 Tablični proračun vodnog lica

5. Grafički prikaz rezultata

Grafička linija vodnog lica obično se radi u distorziranom mjerilu, gdje je mjerilo za visine veće od mjerila za dužine.



Slika 1.6 Skica oblika vodnog lica

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
Diplomski studij

Ak.god.

Predmet: **HIDRAULIKA**

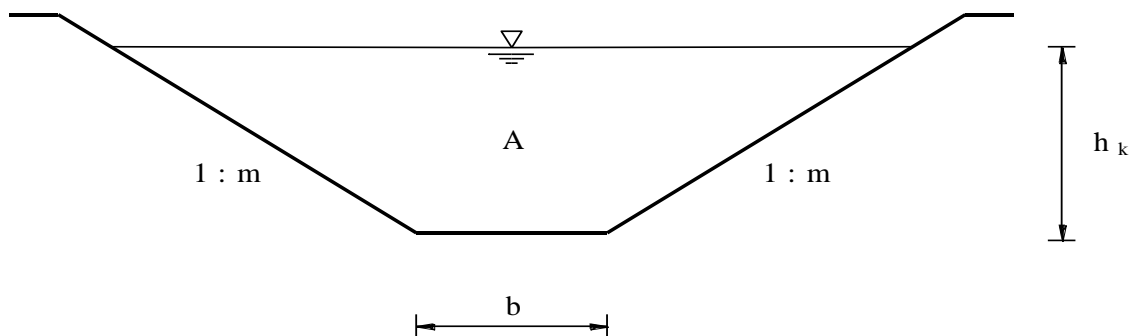
Student :

Mat. broj :

Zadatak 1 : Postupno promjenjivo tečenje u otvorenom koritu

Za navedene karakteristike otvorenog korita prikazanog na slici, izračunaj i grafički prikaži liniju slobodne vodne površine na uspornoj dionici uzvodno od kontrolnog profila.

Q	=	(m ³ /s)
I_0	=	(1)
b	=	(m)
h_k	=	(m) Dubina vode u kontrolnom profilu
m	=	(1)
n	=	(s/m ^{1/3}) Manningov koeficijent hrapavosti



Zadano:

Pregledao:

Rok predaje:

Prilog: Manningovi koeficijenti hrapavosti

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<i>A. Natural Streams</i>			
1. Main Channels			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. Flood Plains			
a. Pasture no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2. Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4. Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
3. Mountain Streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
B. Lined or Built-Up Channels			
1. Concrete			
a. Trowel finish	0.011	0.013	0.015
b. Float Finish	0.013	0.015	0.016
c. Finished, with gravel bottom	0.015	0.017	0.020
d. Unfinished	0.014	0.017	0.020
e. Gunite, good section	0.016	0.019	0.023
f. Gunite, wavy section	0.018	0.022	0.025
g. On good excavated rock	0.017	0.020	
h. On irregular excavated rock	0.022	0.027	
2. Concrete bottom float finished with sides of:			
a. Dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.020
b. Random stone in mortar	0.017	0.020	0.024
c. Cement rubble masonry, plastered	0.016	0.020	0.024
d. Cement rubble masonry	0.020	0.025	0.030
e. Dry rubble on riprap	0.020	0.030	0.035
3. Gravel bottom with sides of:			
a. Formed concrete	0.017	0.020	0.025
b. Random stone in mortar	0.020	0.023	0.026
c. Dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
4. Brick			
a. Glazed	0.011	0.013	0.015
b. In cement mortar	0.012	0.015	0.018
5. Metal			
a. Smooth steel surfaces	0.011	0.012	0.014
b. Corrugated metal	0.021	0.025	0.030
6. Asphalt			
a. Smooth	0.013	0.013	
b. Rough	0.016	0.016	
7. Vegetal lining			
	0.030		0.500

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<i>C. Excavated or Dredged Channels</i>			
1. Earth, straight and uniform			
a. Clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
b. Clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
c. Gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.030
d. With short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
2. Earth, winding and sluggish			
a. No vegetation	0.023	0.025	0.030
b. Grass, some weeds	0.025	0.030	0.033
c. Dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030	0.035	0.040
d. Earth bottom and rubble side	0.028	0.030	0.035
e. Stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.040
f. Cobble bottom and clean sides	0.030	0.040	0.050
3. Dragline-excavated or dredged			
a. No vegetation	0.025	0.028	0.033
b. Light brush on banks	0.035	0.050	0.060
4. Rock cuts			
a. Smooth and uniform	0.025	0.035	0.040
b. Jagged and irregular	0.035	0.040	0.050
5. Channels not maintained, weeds and brush			
a. Clean bottom, brush on sides	0.040	0.050	0.080
b. Same as above, highest stage of flow	0.045	0.070	0.110
c. Dense weeds, high as flow depth	0.050	0.080	0.120
d. Dense brush, high stage	0.080	0.100	0.140