

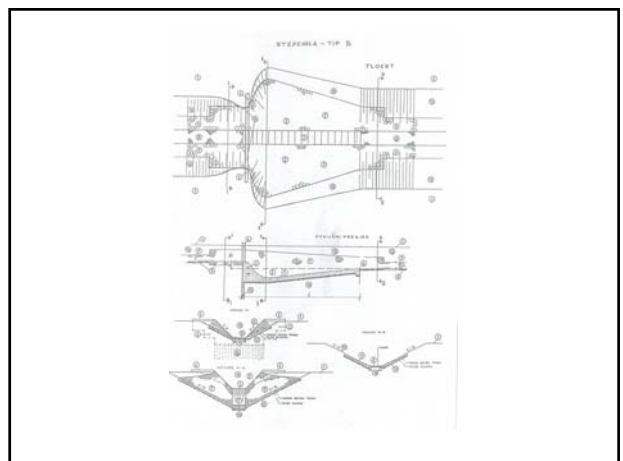
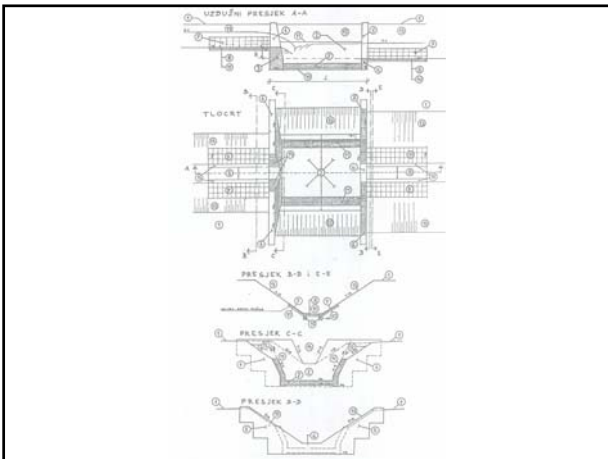
### 5.3 PROBLEM HIDRAULIKE HIDROTEHNIČKIH STEPENICA

1

### HIDROTEHNIČKA STEPENICA

Vodograđevina koja se izvodi na mjestu denivelacije dna vodotoka (koncentracija energetskeg pada) u svrhu zaštite njegovog korita od pojačanog erozijskog djelovanja na tome mjestu.

2





Relativno su učestala oštećenja na objektima koncentracije pada dna, tj. na stepenicama i kaskadama otvorenih kanala i reguliranih prirodnih vodotoka.

Jedan od uzroka oštećenja je pogreška u projektiranju koja proizlazi iz neadekvatnog tretmana kinetičke energije toka na mjestu koncentracije pada.

8

U projektiranju otvorenih kanala u prirodnim tlama i projektiranju regulacija malih vodotoka primjenjuju se danas dva kriterija dimenzioniranja korita za tokove s nepokretnim dnom.

To su kriterij granične brzine i kriterij dopuštene pokretne (erozijske) sile na dnu.

9

Kriterij granične brzine definiran je uvjetom da brzina toka ne smije doseći vrijednost granične brzine  $v_{gr}$  kod koje dolazi do pokretanja čestica materijala u kojem se izvodi korito.

Drugi kriterij (dopuštene pokretne sile) kaže da pokretna slika toka, određena izrazom  $S = \rho \cdot g \cdot R \cdot I$  izražena po jedinici omočene površine korita, ne smije dosegnuti vrijednost graničnoga napreznja materijala  $\tau_0$ , pri kojem dolazi do pokretanja čestica na omočenoj konturi korita.

Vrijednosti za  $v_{gr}$  i  $\tau_0$  utvrđene su eksperimentalno i za razne vrste materijala sadržane su u literaturi iz područja hidraulike otvorenih korita

10

Prirodni materijal, s izuzetkom stijena i krupnih kamenih zrna, imaju uglavnom male vrijednosti za  $v_{gr}$  i  $\tau_0$ , tako da otvoreni vodotok dimenzioniran po bilo kojem od dva spomenuta kriterija, s koritom u prirodnom materijalu, ima relativno male uzdužne padove i miran režim toka ( $Fr < 1$ ).

Ovisno o konfiguraciji terena duž kojeg se ovakav vodotok pruža, često je potrebno da se na manje ili više mjesta duž vodotoka načini koncentracija pada nivelete dna u obliku stepenice.

Današnja hidrotehnička praksa poznaje više tipova objekata s kojima se postiže denivelacija dna (mjesto koncentracije pada) sa zadovoljavajućom disipacijom kinetičke energije toka.

11

Bez obzira na tip objekta koncentracije pada dna vodotoka, karakteristično je da kod svih takvih mjesta dolazi do pojave kritičnog stanja toka ( $Fr = 1$ ) neposredno uzvodno od mjesta koncentracije pada.

U rijetkim slučajevima, gdje su uvjeti toka nizvodno od objekta da je cijeli objekt potopljen, formiranje slobodnoga potpunog prelijevanja je zapriječeno visokom razinom donje vode.

12

U svim slučajevima o kojima je prelijevanje na mjestu koncentracije pada slobodno, formira se, uzvodno od tog mjesta, linija depresije duž koje je tečenje u koritu ubrzano.

Ovoj pojavi potrebno je posvetiti odgovarajuću pažnju s obzirom na to da povećana brzina toka duž poteza depresije premašuje graničnu brzinu  $v_{gr}$ , što dovodi do erozije i oštećenja korita.

U praksi se rabe dva načina osiguranja korita do ovih oštećenja: (1) zaštita od poteza depresije odgovarajućom oblogom i (2) skraćanjem poteza depresije na minimum kontrakcijom preljevnog profila, tako da se na mjestu koncentracije pada formira veća kritična dubina od one koja bi se formirala na nekontrahiranom profilu. Time se ukupna veličina depresije smanjuje, a duljina linije depresije skraćuje.

13

U projektiranju otvorenih kanala i regulacija prirodnih vodotoka uobičajeno je da se potrebna kontrakcija preljevnog profila na objektima koncentracije pada nivelete dna proračuna tako da kritična dubina kontrahiranog profila bude jednaka graničnoj dubini toka  $h_{gr}$ , tj. dubini kod koje tečenje u koritu, uz određeni faktor sigurnosti, još ne doseže graničnu brzinu  $v_{gr}$ . Taj kriterij proračuna kontrakcije na vodnim tokovima korita koja su dimenzionirana po kriteriju granične brzine ili dopuštene pokretne sile nije u potpunosti ispravan.

14

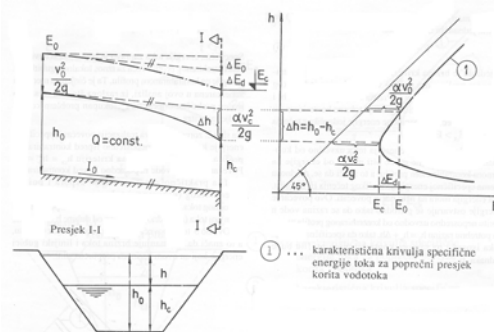
Pri hidrauličkom dimenzioniranju otvorenih korita uglavnom se primjenjuje jednodimenzionalni model proračuna jednolikoga stacionarnog tečenja koje se pojavljuje u slučajevima konstantnog protoka ( $Q = \text{const}$ ) i konstantnih geometrijskih parametara korita, tj. konstantnoga uzdužnog pada i konstantnoga poprečnog presjeka.

$$E_0 = h_0 + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \quad (1)$$

Specifična energija toka, interpretirana gornjim izrazom (1), u tom je modelu konstantna veličina. Na mjestu koncentracije pada dna vodotoka ta bi se energija, u slučaju zadržavanja konstantne geometrije korita (bez kontrakcije), smanjila do minimalnog iznosa (slika 1), pri kojem dubina ( $h_0$ ) i brzina toka ( $v_0$ ) poprimaju kritične vrijednosti  $h_c$  i  $v_c$ .

15

Slika 1



16

Kritična se dubina može proračunati iz poznatog općeg uvjeta za kritično stanje toka koji glasi:

$$\frac{\alpha Q^2 B}{g F^3} = 1 \quad (2)$$

Nastavno se uporabom izraza za protok ( $Q = F_c \cdot v_c$ ) može proračunati i kritična brzina, a time je određena i kritična (minimalna) specifična energija toka:

$$E_c = h_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} \quad (3)$$

17

Specifična energija jednolikog tečenja u korito reducirat će se dakle na iznos specifične energije kritičnog stanja toka  $E_c$  na mjestu koncentracije pada vodotoka. Fizikalni mehanizam ove redukcije odvija se tako što zbog povećanja brzine tečenja duž poteza depresije dolazi do povećanja linijskih gubitaka. Ukupan iznos redukcije energije bit će  $\Delta E = E_0 - E_c$ . Duljina poteza depresije i linija vodnog lica (linija depresije) duž tog poteza može se proračunati prema različitim modelima proračuna nejednolikog tečenja.

18

U današnjoj se projektantskoj praksi kontrakcija preljevno profila na objektima koncentracije pada dna vodotoka (stepenicama) proračunava prema kriteriju granične dubine toka ( $h_{gr}$ ), tj. dubine pri kojoj brzina toka u koritu još ne dostiže veličinu granične brzine  $v_{gr}$ . Taj kriterij proračuna kontrakcije neprihvatljiv je za vodne tokove korita kojih su dimenzionirana po tom istom kriteriju dopuštene pokretne sile. Razlog je tomu što ovako proračunati kontrahirani profil uzrokuje pojavu uspora uzvodno. Da će ovako proračunati kontrahirani profil uvjetovati pojavu uspora pokazuje se komparacijom potrebne specifične energije toka na kontrahiranom profilu (4) i specifične energije jednolikog tečenja u koritu (1).

$$E_{ck} = h_{ck} + \frac{\alpha v_{ck}^2}{2g} \quad (4)$$

19

Za otvorene vodotoke dimenzionirane po kriteriju granične brzine ili dopuštene pokretne sile dubina je toka u koritu, uz određeni faktor sigurnosti, upravo jednaka graničnoj dubini ( $h_0 = h_{gr}$ ), a kako je za kontrahirani preljevni profil proračunom po kriteriju granične dubine  $h_{ck} = h_{gr}$ , to slijedi da je i  $h_0 = h_{ck}$ . Nadalje, kontrahirani je protočni presjek dakako manji od protočnog profila ( $F_c < F_0$ ) pa prema jednadžbi kontinuiteta:

$$F_0 \cdot v_0 = F_c \cdot v_c \quad (5)$$

Slijedi da je brzina kritičnog stanja toka  $v_c$  na kontrahiranom preljevnom profilu veća od brzine jednolikog tečenja u koritu ( $v_c > v_0$ ). Prema tome proizlazi da bi i specifična energija kritičnog stanja toka na kontrahiranom profilu bila veća od specifične energije jednolikog tečenja u koritu ( $E_{ck} > E_0$ ).

20

Jasno je da specifična energija toka uzvodno od kontrahiranog profila ne može biti manja od energije na samom kontrahiranom profilu, a to znači da se, u odnosu prema specifičnoj energiji jednolikog tečenja  $E_0$  u koritu, ova energija mora na neki način povećati. Ovo povećanje energije ostvaruje se prirodno tako da se razina vode u koritu neposredno uzvodno od kontrahiranog profila povisi na potrebnu razinu  $h_1 = h_0 + \Delta h$ , tako da specifična energija toka ispred i na samom kontrahiranom profilu bude jednaka, tj.:

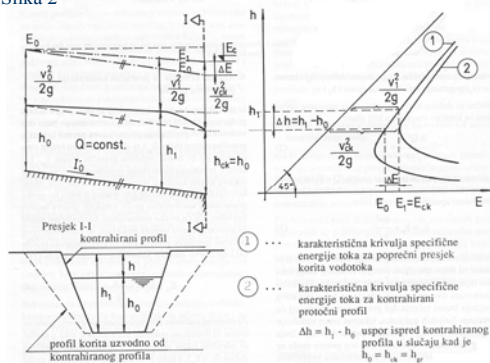
$$E_{ck} = E_1; \quad E_1 = h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \quad (6)$$

21

Specifična energija toka zapravo je neposredno uzvodno od kontrahiranog profila veća za iznos lokalnog gubitka od energije na kontrahiranom profilu. Ta je činjenica međutim zanemarena u ovoj analizi, iz razloga što ima relativno malen praktičan utjecaj na cjelokupan problem koji se ovdje razmatra.

22

Slika 2



23

Na slici 2 zorno se uočava realizacija povećanja specifične energije koja u koritu neposredno ispred kontrahiranog profila, proračunatog prema kriteriju  $h_{ck} = h_{gr} = h_0$ . Povećanje razine vode neposredno ispred kontrahiranog profila praktično znači stvaranje uspora i pojavu nejednolikog (usporednog) tečenja na dužem potezu uzvodnog toka. Duž ovog poteza dubina toka postupno se u smjeru toka (nizvodno) povećava od dubine  $h_0$  do dubine  $h_1$ . Ovisno o tome povećava se i protočni presjek u koritu, a to znači da se smanjuje brzina toka i linijski gubici energije koji su ovom brzinom proporcionalni.

24

Povećanjem dubine i smanjenjem linijskih gubitaka duž poteza uspora ostvaruje se neposredno ispred kontrahiranog profila potrebna energetska razina  $E_1 = E_{ck}$ , a formiranje kritičnog stanja toka s dubinom  $h_{ck} = h_0$  na kontrahiranom preljevnom profilu obrazuje se na vrlo kratkom potezu neposredno ispred kontrahiranog profila. Ovo formiranje kritičnog stanja toka analogno je formiranju preljevnog mlaza na preljevima gdje se povećanje kinetičke energije mlaza ostvaruje na račun smanjenja potencijalne energije, tj. sniženja razine vodnog lica. Usporna linija (dužina uspora i razina vodnog lica duž ovog poteza) može se i ovdje proračunati na osnovi matematičkog opisa stacionarnoga nejednolikog strujanja ili prema nekom od modela za proračun usporne linije.

25

Početni je uvjet proračuna veličina ukupnog uspora neposredno ispred kontrahiranog presjeka, tj.  $\Delta h = h_1 - h_0$ , gdje je  $h$  dubina jednolikog tečenja u koritu, a  $h_1$  određuje se iz uvjeta jednakosti specifične energije kritičnog stanja toka na kontrahiranom profilu i potrebne specifične energije toka u koritu neposredno ispred kontrahiranog presjeka.

Neosporno je da će kod otvorenih korita, dimenzioniranih po kriteriju granične brzine ili dopuštene pokretne sile toka, proračun kontrakcije preljevnog profila po kriteriju granične dubine dati takav kontrahirani profil koji će uvjetovati stvaranje uspora uzvodno od ovog profila.

26

Sa stajališta stabilnosti dna i pokosa korita ovaj nam uspor ne bi smetao jer uvjetuje manje brzine, odnosno manje pokretne sile toka u koritu. Stoga se u projektantskoj praksi često zanemaruje analiza ovog uspora, što je pogrešno jer se pritom ispuštaju iz vida dvije važne komponente projektiranja elemenata korita, i to:

- \*projektna dubina korita duž poteza uspora ne može ostati ista kao za jednoliko tečenje u koritu određeno postojećim padom dna, nego se dubina korita mora povećati ovisno o veličini uspora,
- \*proporcije objekata koncentracije pada dna vodotoka, bez obzira na tip objekta, upravno su proporcionalne sa specifičnom energijom toka na preljevnom profilu, a to znači da se izvedbom kontrahiranoga preljevnog profila koji stvara uspor u koritu zahtijeva i objekt koncentracije pada dna većih dimenzija.

27

Da bi se onemogućilo stvaranje depresije kontrakcija je svakako potrebna, a da bi se izbjeglo stvaranje uspora na kontrahiranom profilu potrebno je postaviti odgovarajući kriterij proračuna kontrakcije. Zadržat ćemo se na istoj razini aproksimacije jednodimenzionalne analize koja se za razmatrani problem rabi u današnjoj hidrotehničkoj praksi.

Postavimo li uvjet jednakosti specifične energije jednolikog toka u koritu sa specifičnom energijom kritičnog stanja toka na kontrahiranom profilu:

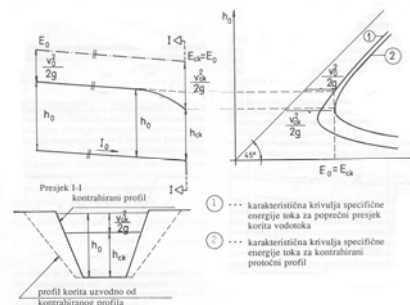
$$h_0 + \frac{\alpha v_o^2}{2g} = h_{ck} + \frac{\alpha v_{ck}^2}{2g} \quad (7)$$

28

Pa za taj uvjet proračunamo odgovarajuću kontrakciju, dobit ćemo kontrahirani profil za koji će kritična dubina  $h_{ck}$  biti manja od dubine jednolikog tečenja u koritu (slika 3), ali će pritom specifična energija toka u koritu biti jednaka specifičnoj energiji na kontrahiranom profilu. Takav kontrahirani profil neće uvjetovati stvaranje uspora, niti će uvjetovati formiranje depresije, iako je kritična dubina kontrahiranog profila manja od dubine toka u koritu.

29

Slika 3



30

Proračun parametra kontrahiranog profila po predloženom kriteriju moguć je uz pomoć jednadžbi uvjeta za kritično stanje toka na kontrahiranom profilu:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{F_c^3}{B_c} \quad (8)$$

I uvjeta jednakosti specifične energije toka u koritu i na kontrahiranom profilu:

$$h_o + \frac{\alpha v_o^2}{2g} = h_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} \quad (9)$$

31

Kako su u hidrotehničkoj praksi najčešća trapezna oblikovanja otvorenih kanala u prirodnim tlima i trapezna oblikovanja kontrakcije preljevnog profila, zadržat ćemo se na takvoj geometriji. Tada će kontrahirani profil biti potpuno određen sa tri parametra, i to: širinom dna  $b_c$ , nagibom pokosa 1:m i kritičnom dubinom  $h_c$ . Ovi parametri definiraju u jednadžbama (8) i (9) sljedeće veličine:

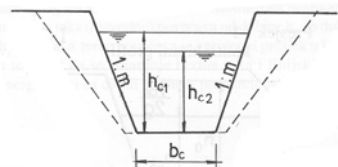
$$F_c = h_c (b + m \cdot h_c) \quad \text{protočnu površinu kontrahiranoga preljevnog profila (m}^2\text{)}$$

$$B_c = b_c + 2 m h_c \quad \text{širinu vodnog lica na kontrahiranom preljevnom profilu (m)}$$

$$v_c = \frac{Q}{F_c} \quad \text{kritičnu brzinu na kontrahiranom preljevnom profilu (m/s)}$$

32

Slika 4



33

Potrebno je dakle odrediti tri nepoznata parametra kontrahiranog profila trapeznog oblika, a na raspolaganju imamo samo dvije jednadžbe za proračun (8) i (9). Kao dodatni uvjet proračuna kontrakcije može se postaviti uvjet jednakosti specifične energije jednolikog toka u koritu i kritičnog stanja na preljevnom profilu, osim za  $Q_{\max}$  i za neki drugi protok. Povoljno je da to bude neki protok ( $Q_p$ ) relativno veće učestalosti pojavljivanja ( $p$ ).

34

Tada je:

$$\frac{\alpha Q_{\max}^2}{g} = \frac{F_{c1}^3}{B_{c1}}$$

uvjet kritičnog stanja toka na kontrahiranom profilu za maksimalni protok  $Q_{\max}$ ,

$$h_{o_{\max}} + \frac{\alpha v_{o_{\max}}^2}{2g} = h_{c1} + \frac{\alpha v_{c1}^2}{2g}$$

uvjet jednakosti specifične energije toka u koritu i na kontrahiranom profilu za maksimalni protok  $Q_{\max}$ ,

$$\frac{\alpha Q_p^2}{g} = \frac{F_{c2}^3}{B_{c2}}$$

uvjet kritičnog stanja toka na kontrahiranom profilu za protok  $Q_p$  učestalosti  $p\%$ ,

$$h_{op} + \frac{\alpha v_{op}^2}{2g} = h_{c2} + \frac{\alpha v_{c2}^2}{2g}$$

uvjet jednakosti specifične energije toka u koritu i na kontrahiranom profilu za protok  $Q_p$  učestalosti  $p\%$ .

35

Nepoznanice su parametri kontrahiranog profila:

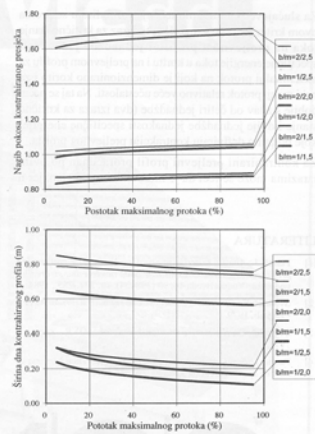
- $b_c$  ..... širina na dnu kontrahiranog profila,
- $m$  ..... nagib pokosa kontrahiranog profila,
- $h_{c1}$  ..... kritična dubina u kontrahiranom profilu za slučaj protoka  $Q_{\max}$ ,
- $h_{c2}$  ..... kritična dubina u kontrahiranom profilu za slučaj protoka  $Q_p$ .

Za proračun ovih parametara potrebno je naći rješenje sustava od četiri nelinearne jednadžbe s četiri nepoznanice!

U nastavku su dani rezultati proračuna za hipotetski slučaj sa analizom osjetljivosti rješenja na promjenu veličine protoka  $Q_p$ .

36

Slika 5



37

Iz grafičkog prikaza rezultata tog proračuna (slika 5) uočljivo je da vrijednosti parametara kontrakcije  $b_c$  i  $m_c$  bitno ovise o geometrijskim parametrima ( $b_o$  i  $m_o$ ) osnovnog korita, a relativno manje ovise o promjeni protoka u koritu.

Ovo navodi na zaključak da je za inženjersko određivanje parametara kontrakcije preljevnog profila dovoljno proračun provesti za jedan par vrijednosti  $Q_{max}$ ,  $Q_p$ .

38