

## PREGLED I PRIMENA REZULTATA SAVREMENIH HIDRAULIČKIH ISTRAŽIVANJA U PROJEKTOVANJU PRELIVA VISOKIH BRANA

Živodar ERČIĆ  
Energoprojekt, Beograd  
E-mail: erra@eunet.yu

### REZIME

U radu se ukratko opisuju neki od hidrauličkih problema koji se susreću pri projektovanju preliva visokih brana. Pojave o kojima je reč su kavitacija i kavitaciona erozija, ovazdušenje vodnog toka i erozija rečnog dna nizvodno od brane. Posebno se govori o eroziji usled udara u rečno dno slobodno padajućeg mlaza vode. Detaljnije je izložen uticaj pomenutih pojava na oblik i dimenzije stepenastog preliva kao i na rasipanje energije u njima. Prikazuju se rezultati savremenih eksperimentalnih istraživanja vezanih za napred pomenute pojave.

**Ključne reči:** kavitacija, aeracija, erozija, stepenasti prelivi

### 1. UVOD

Štete usled delimičnog ili potpunog rušenja brane mogu da budu veoma velike, čak katastrofalne. Najčešći uzroci rušenja brane su hidrološke, hidrauličke, konstruktivne i seizmičke prirode. U ovom radu se analiziraju uzroci hidrauličke prirode koji mogu da ugroze sigurnost preliva, odnosno brane. Smatra se da je, sa hidrauličke tačke gledišta, preliv siguran ako pronosi merodavne protoke u rečno korito nizvodno od brane bez ugrožavanja sigurnosti brane i njenih pratećih objekata i bez izazivanja neprihvatljivih šteta uzvodno i nizvodno od pregradnog profila.

Hidraulička sigurnost preliva uglavnom zavisi od ispravne procene sledećih vrednosti:

- propusne moći prelivnog praga uzimajući u obzir prilazne uslove;
- dubine čiste vode ili mešavine voda-vazduh i koncentracije vazduha u vodi;
- kavitacionog potencijala vodnog toka i zaštite betonskih površina od erozije;

- pulzacija hidrodinamičkih pritisaka i
- rasipanja energije vodnog toka i procene moguće, odnosno prihvatljive erozije rečnog korita nizvodno od brane.

Međusobni uticaj ovih veličina mora se uzeti u obzir pri određivanju oblika i dimenzija preliva.

U ovom radu se analiziraju napred navedeni uticaji na oblik i dimenzije ulaznog, tranzitnog i završnog dela površinskih preliva visokih brana.

Propusna moć preliva zavisi od oblika i geometrijskih karakteristika ulaznog dela (prelivni prag i prilazna deonica). Određivanje optimalne vrednosti ovih karakteristika je jedan od glavnih zadataka projektanta. Iako su danas raspoloživi brojni rezultati istraživanja, (naročito za oblik prelivnog praga) ne može se zaključiti da je problem kapaciteta preliva rešen za sve praktično moguće slučajeve, uglavnom zbog različitog uticaja prilazne deonice. Zbog toga se propusna moć preliva za svaki konkretni slučaj mora određivati pomoću fizičkog ili numeričkog modela. Danas je raspoloživ veći broj komercijalnih 2D i 3D numeričkih modela [1,2]. Jedan od takvih je CFD (computational fluid dynamics) softverski paket FLOW-3D u kome se koristi FAVOR (Fractional Area/Volume of Fluid) metoda za rešavanje RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) jednačina [3]. Ali, i pored većeg broja raspoloživih komercijalnih 2D i 3D numeričkih modela, još uvek je rasprostranjenija upotreba fizičkog modela pomoću kojih se određuju optimalne dimenzije ulaznog dela preliva za zadati merodavni protok. Što se tiče oblika prelivnog praga, danas se smatra da prelivni prag, oblikovan za  $H_d=0.75 H_{max}$  ima optimalan odnos između efikasnosti preliva i troškova njegove izgradnje a da, pri tome, maksimalni negativni pritisak na pragu ne dostiže neprihvatljivu veličinu. Detaljnija razmatranja u vezi sa određivanjem geometrijskih karakteristika ulaznog dela preliva nisu u sadržaju ovog rada.

Tranzitni deo preliva je ili betonska građevina (brzotok) sa relativno glatkim ili makro-ropavim (stepenastim) dnom ili slobodno padajući mlaz vode. Glavni hidraulički parametri koji se određuju na ovom delu preliva su dubina čiste vode ili mešavine voda-vazduh, kavitacioni potencijal toka, zaštita od kavitacione erozije i veličina energije koja se rasipa u tranzitnom delu preliva.

Završni deo preliva je ili betonski objekat ili prirodna eroziona jama. U završnom delu se rasipa energija toka, koja je preostala na kraju tranzitnog dela preliva. Osnovni hidraulički problemi u završnom delu preliva su određivanje geometrije i oblika objekata u kojima se rasipa energija, pulzacije hidrodinamičkih pritisaka, ovazdušenje vodne mase, kavitacioni problemi, erozija tla i određivanje ukupne koncentracije rastvorenog gasa u vodi.

S obzirom na svoje specifične osobenosti, prelivi sa stepenastim tranzitnim delom (stepenasti prelivi) i prelivi sa slobodno padajućim mlazom vode i prirodnom erozionom jamom kao slapištem, razmatraju se u posebnom poglavlju ovog rada.

U radu se najpre razmatra problem nadimanja vodnog toka koji struji preko relativno glatkog dna brzotoka zbog uvlačenja vazduha u tok. U nastavku se analiziraju problemi u vezi sa zaštitom od kavitacije betonskog dna brzotoka i prikazuju rezultati dosadašnjih empirijskih istraživanja. Sledi poglavlje o klasičnim betonskim slapištima, tipa hidraulički skok, i problemima vezanim za pulzacije pritiska, kavitaciju, ukupnu koncentraciju rastvorenog gasa u vodi i eroziju tla. Izlaganje se nastavlja sa opisom procesa erozije usled udara slobodno padajućeg mlaza u rečno dno i prikazom dosadašnjih rezultata eksperimentalnih istraživanja ovog problema. Na kraju rada prikazani su hidraulički problemi kod stepenastih preliva kao i rezultati odgovarajućih eksperimentalnih istraživanja.

Rad je podeljen u dva dela. U ovom broju časopisa objavljuje se prvi deo u kome se razmatraju problemi u vezi sa prirodnim površinskim ovazdušavanjem vodnog toka, kavitacijom i zaštitom brzotoka od kavitacione erozije.

## 2. UVLAČENJE VAZDUHA U TOK VODE U BRZOTOKU.

Strujanje vode velikom brzinom u otvorenom kanalu je karakteristično po fenomenu uvlačenja atmosferskog vazduha u tok koji se meša sa vodom i stvara tok «bele

vode» sa uzburkanom i slabo definisanom slobodnom površinom.

Interesovanje za fenomen uvlačenja vazduha u vodni tok uglavnom je vezano za projektovanje brzotoka, pa se i u ovom radu ovaj fenomen razmatra kao faktor koji utiče na oblike i dimenzije brzotoka.

Uvlačenje atmosferskog vazduha u tok vode u brzotoku dešava se samo kada su ispunjena sledeća dva uslova:

- vodni tok je potpuno turbulentan i
- nivo tubulencije je dovoljno veliki da može da savlada i površinske napone i efekte gravitacije.

Prvi uslov je ispunjen počev od profila u kome turbulentni granični sloj izbija na površinu vode.

Drugi uslov je ispunjen kod svih brzotoka već pri brzinama od 10÷15 m/sek.

Kvalitativno i kvantitativno poznavanje fenomena uvlačenja vazduha u tok vode u brzotoku posebno je važno za projektante zbog:

- (a) povećane dubine mešavine voda-vazduh u odnosu na dubinu vode bez vazduha što uslovljava povećanu visinu bočnih zidova brzotoka;
- (b) uticaja uvučenog vazduha na oblik i dimenzije slapišta;
- (c) moguće zaštite betona od kavitacione erozije ukoliko uvučeni vazduh dopre do betonske površine u potrebnoj koncentraciji;
- (d) redukcije lokalnog koeficijenta trenja jer vazduh redukuje efekat smičućih napona pa se brzina mešavine voda-vazduh povećava u odnosu na tok vode bez vazduha;
- (e) vrlo značajnog udela ovazdušenog toka u brzotoku u opštem prelazu (transferu) atmosferskih gasova u vodu, posebno kiseonika i azota; prelaz prvog daje pozitivne efekte, dok velika zasićenost vode azotom može da izazove negativne posledice.

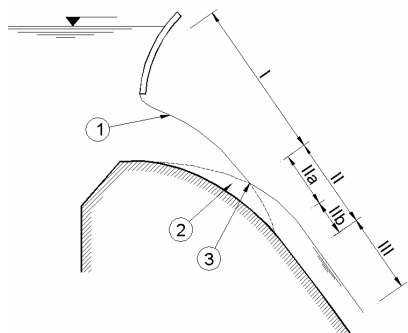
Fenomen uvlačenja vazduha u vodni tok u brzotoku se već duže vreme eksperimentalno izučava i opisuje u brojnoj tehničkoj literaturi. Interesovanje istraživača za ovaj fenomen počelo je još 1926. godine ali su prvi uopšteni rezultati istraživanja objavljeni tek 1960. godine [4]. Istraživanja su bila intenzivirana u 80-im godinama prošlog veka [5]. Tokom zadnjih 15 godina publikovano je nekoliko obimnijih radova [6, 7, 8, 9]. Od radova novijeg datuma interesantan je rad [10] u kome se navodi da su sadašnja znanja o razvoju koncentracije vazduha duž brzotoka ograničene. U

pomenutom radu se, na osnovu preliminarnih rezultata modelskih istraživanja, zaključuje da je neophodno da se ponovo razmotri strujanje u brzotoku kako na deonici sa promenljivom, tako i na deonici sa ustaljenom koncentracijom vazduha.

## 2.1. Struktura vodnog toka u brzotoku

Na osnovu do sada izvršenih ispitivanja na hidrauličkim modelima i izvedenim brzotocima identifikovana su sledeća tri osnovna režima strujanja u podužnom pravcu (Slika 1):

- deonica I: režim bez uvlačenja vazduha u vodu; počev od uzvodne ivice preliva na ovoj deonici se razvija turbulentni granični sloj koji izbija na površinu vode na nizvodnoj granici deonice I;
- deonica II: uvučena količina vazduha u vodni tok se postepeno povećava a raspodela koncentracije vazduha varira duž ove deonice i postaje jednolika na donjoj granici deonice II; većina istraživača starije generacije deli deonicu II na dva dela, na deo u kome vazduh ne dopire do dna brzotoka (parcijalno ovazdušen tok) i deo u kome vazduh dopire do dna (potpuno ovazdušen tok); ipak, danas se, na osnovu najnovijih merenja, smatra da je vodni tok potpuno ovazdušen već neposredno nizvodno od tačke u kojoj granični sloj izbija na površinu ali je na ovom delu deonice II koncentracija vazduha pri dnu veoma mala; koncentracija vazduha pri dnu raste nizvodno.
- deonica III: tok je ovazdušen do dna a raspodela koncentracije vazduha po dubini je konstantna duž toka; konstatni su i svi ostali parametri toka.



Slika 1. Položaji deonica I, II i III u podužnom profilu brzotoka

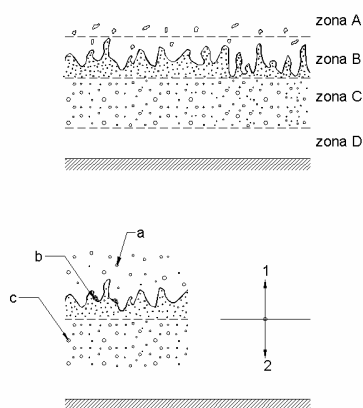
I – neovazdušeni vodni tok; II – postepeno promenljivo strujanje ovazdušenog vodnog toka; III - jednoliko strujanje ovazdušenog vodnog toka  
1 – slobodna površina vode; 2 – turbulentni granični sloj; 3 – kritična tačka

Parametri toka za svaku deonicu posebno određivani su eksperimentalno. Najveći obim istraživanja se odosi na određivanje donje granice deonice I i parametara toka na deonici III. Parametri toka na deonici II su eksperimentalno istraživani u nešto manjem obimu.

Vertikalna struktura ovazdušenog toka se u tehničkoj literaturi različito opisuje. U radovima [4, 5] se navodi da vertikalnu strukturu čine sledeće četiri zone (Slika 2):

- zona A: gornja zona koja sadrži kapi vode izbačene iz zone B u atmosferu;
- zona B: zona mešanja, sa povšinskim talasanjem slučajne amplitude i frekvencije, u kojoj se nalazi kontinualna vodna površina;
- zona C: međuzona u koju ne prodiru talasi ali prodiru mehuri vazduha uvučeni u tok iz atmosfere;
- zona D: donja zona u koju ne prodiru mehuri vazduha.

Na donjem delu deonice II i celoj deonici III izostaje zona D po definiciji. Granica između zona C i D se u mnogim slučajevima ne može definisati zbog male koncentracije vazduha na granici.



- 1 - Region visokog sadržaja vazduha
- 2 - Region niskog sadržaja vazduha
- a- Izbačaji mešavine voda-vazduh
- b- Penasta struktura
- c- mehurići i grozdovi vazduha

Slika 2. Vertikalna struktura mešavine voda-vazduh

Opis vertikalne strukture u radovima [6, 11] nešto je različit. Tako se u radu [11] navodi da merenja savremenim aparatima ukazuju da se ovazdušeni tok ponaša kao homogena mešavina za  $c < 0.90$ . Pomenuta merenja sugerišu dva regiona u ovazdušenom toku: region sa niskim sadržajem vazduha ( $c < 0.3 \div 0.4$ ) i region sa visokim sadržajem vazduha ( $c > 0.3 \div 0.4$ ) (Slika 2). Prvi region čine individualni mehuri vazduha nepravilnog oblika, grozdovi mehura i paketi vazduha, svi kontinualno okruženi vodom. U regionu sa visokim sadržajem vazduha struktura toka je kompleksnija. Čine je izbačaji mešavine vazduh-voda u atmosferu i penasta struktura koja se sastoji od velikih grozdova vazdupnih mehura, odvojenih međugraničnim opnama. Ova

emulzija klizi po spoljnoj granici homogenog toka. Obe komponente regiona sa visokim sadržajem vazduha su trenutne tvorevine koje stalno menjaju oblike i veličine tokom vremena.

Sa hidrauličke tačke gledišta najuticajni parametri na oblik i dimenzije brzotoka su:

- lokacija tačke u kojoj počinje ovazdušenje vodnog toka;
- koncentracija vazduha pri dnu brzotoka;
- prosečna koncentracija vazduha u vodi;
- dubina ovazdušenog toka i
- brzina mešavine voda-vazduh.

Takođe su od interesa i raspodele koncentracije vazduha i brzina u preseku upravnom na dno brzotoka.

Numeričke metode i empirijske zavisnosti na osnovu kojih se određuju napred navedeni parametri prikazuju se u sledećem tekstu.

## 2.2. Neovazdušeni tok (deonica I)

U regionu uzvodno od preliva tok je miran i smatra se da je bezvrtložan. Ali, počev od krune preliva počinje da se razvija turbulentni granični sloj po dnu brzotoka kao posledica usporavajućeg uticaja čvrste granice na strujanje vode. Debljina turbulentno graničnog sloja se povećava nizvodno i u nekoj tački brzotoka postaje jednaka dubini vode tj. izbija na površinu vode. Od ove tačke, nazvane «kritična tačka» počinje uvlačenje vazduha u vodu.

Dubina i brzina vode na deonici I računaju se primenom poznate energetske jednačine na strujanje vode između dva susedna preseka. Na osnovu ovako izračunate linije nivoa vode određuje se položaj kritične tačke u kojoj je debljina turbulentnog graničnog sloja ( $\delta_i$ ) jednaka dubini vode ( $d_i$ ).

Položaj ( $x_i$ ), brzina na površini vode ( $u_i$ ) i dubina ( $d_i$ ) vode u kritičnoj tački mogu se direktno odrediti pomoću sledećih empirijskih zavisnosti [6]:

$$\frac{x_i}{d_{cs}} = 13.5 \cdot (\sin \theta)^{0.08} \cdot \left(\frac{d_{cs}}{k_s}\right)^{0.069} \quad 2.2.1$$

$$\frac{u_i}{\sqrt{2g \cdot d_{cs}}} = 3.68 \cdot (\sin \theta)^{0.54} \cdot \left(\frac{d_{cs}}{k_s}\right)^{0.035} \quad 2.2.2$$

$$\frac{d_i}{d_{cs}} = \frac{0.22}{(\sin \theta)^{0.04}} \cdot \left(\frac{d_{cs}}{k_s}\right)^{-0.035} \quad 2.2.3$$

$$d_{cs} = (q^2 / g \sin \theta)^{1/3} \quad 2.2.4$$

U gornjim jednačinama je  $k_s$  – ekvivalentna visina rapavosti betonskog dna brzotoka prema Nikuradzeu,  $\theta$  ugao između nagnutog dna brzotoka i horizontale;  $q$  – specifični protok preliva ( $m^3/sec/m'$ ).

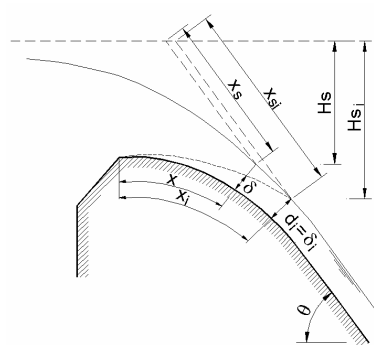
Generalniji oblik jednačine porasta debljine graničnog sloja je

$$\delta / x_s = 0.021 \cdot (x_s / H_s)^{0.11} \cdot (k_s / x_s)^{0.10} \quad 2.2.5$$

S obzirom da je  $\sin \theta = H_s / x_s$  gornja jednačina se može napisati i u obliku:

$$\delta / x_s = 0.0212 \cdot (\sin \theta)^{-0.11} \cdot (x_s / k_s)^{-0.10}$$

Definicije parametara, korišćenih u gornjim jednačinama prikazane su na Slici 3.



Slika 3. Definicije parametara

Gornje jednačine važe za slobodni površinski preliv konstantne širine i konstantnog pada dna brzotoka.

Osnovni parametri turbulentnog graničnog sloja u kritičnoj tački za brzotoke sa laganom i postepenom promenom širine i pada dna mogu se proceniti na osnovu sledeće diferencijalne jednačine, uz korišćenje koncepta o lokalnoj ravnoteži [6].

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{\delta}{x} \cdot (0.90 - 0.11 \cdot x \cdot \cot \theta) \cdot \frac{d\theta}{dx} - \frac{x}{w} \cdot \frac{dw}{dx} \quad 2.2.6$$

U gornjoj jednačini je  $\delta$  - debljina graničnog sloja;  $x$  – rastojanje od početka formiranja graničnog sloja;  $W$  – lokalna širina preliva, postepeno promenljiva duž deonice I.

Gornji empirijski odnosi se mogu koristiti za brzotoke sa nagibom dna od  $5^\circ$  do  $70^\circ$ .

## 2.3. Definicije osnovnih parametara ovazdušenog vodnog toka

U najvećem broju objavljenih stručnih radova koriste se sledeće definicije osnovnih parametara kojima se

opisuje strujanje ovazdušenog vodnog toka u brzotoku na deonicama II i III.

- (a) Koncentracija vazduha u vodi izražava se kao vremenski osrednjen odnos proticaja vazduha i proticaja mešavine voda-vazduh.
- (b) Ekvivalentna dubina ( $d$ ) je srednja dubina vodne faze pod pretpostavkom da voda i vazduh struje odvojeno ali istom brzinom koju ima mešavina voda-vazduh. Dubina ( $d$ ) se razlikuje od normalne dubine za vodu bez vazduha jer je brzina vodne faze pri dubini ( $d$ ) veća od brzine bez vazduha pri normalnoj dubini. Dubina ( $d$ ) je definisana izrazom

$$d = \int_0^{Y_{90}} (1 - C) dy \quad 2.3.1$$

- (c) Karakteristična dubina ovazdušenog toka je dubina upravna na dno na kojoj lokalna koncentracija vazduha ima neku unapred izabranu vrednost (90%, 95% ...). Većina istraživača je ustanovila da se na modelima i izgrađenim brzotocima dobro definiše dubina  $Y_{90}$  na kojoj je lokalna koncentracija vazduha 90%. Zbog toga se u istraživanjima najčešće koristi dubina  $Y_{90}$  kao karakteristična dubina ovazdušenog vodnog toka.

- (d) Koncentracija vazduha ( $\bar{C}$ ) osrednjena po dubini, definisana je izrazom

$$\bar{C} = \frac{1}{Y_{90}} \int_0^{Y_{90}} C dy$$

Vežu parametara  $\bar{C}$ ,  $d$  i  $Y_{90}$  definiše izraz

$$d = (1 - \bar{C})Y_{90} \quad 2.3.2.$$

- (e) Srednja brzina vodne faze ( $U_w$ ) je definisana jednačinom

$$U_w = q_w/d \quad 2.3.3.$$

gde je  $q_w$  – specifični protok vode ( $m^3/\text{sek}/m$ )

Iz prethodne dve jednačine proizilazi da je:

$$q_w = (1 - \bar{C})U_w Y_{90}$$

- (f) Karakteristična brzina ovazdušenog toka ( $V_{90}$ ) je brzina sa dijagrama raspodele brzina na rastojanju  $Y_{90}$ , mereno od dna brzotoka. Definisana je izrazom:

$$\frac{q_w}{Y_{90} V_{90}} \int_0^1 (1 - C)(y)^{1/6} dy \quad 2.3.4.$$

Veza  $Q_w / Y_{90} V_{90} = f(C)$  za jednoliko strujanje ovazdušenog vodnog toka prikazana je tabelarno [16].

Pored navedenih, više istraživača je koristilo i nekoliko dodatnih parametara. Definicije ovih parametara su prikazane u literaturi [4, 5, 12].

#### 2.4. Jednoliko strujanje ovazdušenog vodnog toka (deonica III)

Duž ove deonice svi parametri toka su konstantni. Ovaj tip strujanja se formira znatno nizvodno od kritične tačke. Određivanje udaljenosti početka deonice III od kritične tačke nije bilo predmet obimnijih eksperimenata. Prema istraživanjima publikovanim u literaturi [12], deonica III počinje na udaljenosti od oko 150  $d$ , gde je  $d$  – dubina toka u kritičnoj tački. Brzotoci sa dužinom većom od 150- $d$  se veoma retko sreću u praksi, pa se takođe retko formira jednoliko strujanje ovazdušenog vodnog toka, naročito na brzotocima sa specifičnim protokom većim od 50  $m^3/\text{sek}/m$ .

Ipak, najveći broj eksperimenata i najobimnija istraživanja realizovana su za ovu deonicu jer je najprostija za izučavanje, a eksperimentalno ustanovljeni parametri jednolikog toka mogu se, vrlo efikasno, koristiti za određivanje parametara toka na deonici II koja je znatno interesantnija za projektante brzotoka.

Jednoliko strujanje ovazdušenog vodnog toka opisano je u većem broju stručnih radova [4, 5, 6, 7, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Dubina ovazdušenog toka ( $Y_{90}$ ), raspodela koncentracije vazduha i raspodela brzine po dubini su glavni karakteristični parametri toka. Ovi parametri se određuju pomoću sledećih empirijskih zavisnosti.

- (a) Koncentracija vazduha

Prema literaturi [4, 6, 8, 14] prosečna koncentracija vazduha ( $\bar{C}_e$ ) je zavisna samo od pada dna kanala. Raspodela koncentracije vazduha  $c = f(y)$  po dubini toka ( $y$ ) se može opisati izrazom (literatura [18, 19]).

$$C_e = 1 - \tanh^2 \left[ k' - \frac{y'}{2D'} \right] \quad 2.4.1.$$

gde je:  $y' = y/Y_{90}$ ;  $D'$  – bezdimenzionalni koeficijent difuznosti mehura vazduha;  $K'$  – integraciona konstanta;  $\tanh(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$ .

Koeficijenti  $K'$ ,  $D'$  i odnos  $f_e/f$  prikazani su u tabeli 1 u zavisnosti od  $\bar{C}_e$  [19].

Tabela 1

$\bar{C}_e$	D'	K'	$f_e/f$
(1)	(2)	(3)	(4)
0.0	0.0	$+\infty$	1.0
0.01	0.007312	68.70445	1.0
0.05	0.036562	14.0029	1.0
0.10	0.073124	7.16516	0.9969
0.15	0.109704	4.88517	0.973
0.20	0.146489	3.74068	0.9216
0.30	0.223191	2.567688	0.7824
0.40	0.3111	1.93465	0.6449
0.50	0.423441	1.508251	0.5176
0.60	0.587217	1.178924	0.3893
0.70	0.878462	0.896627	0.2474

U literaturi [16] je tabelarno prikazan odnos između ugla nagiba dna brzotoka ( $\theta$ ) i srednje koncentracije vazduha ( $C_e$ ) (Tabela 2).

Tabela 2

$\theta$	$\bar{C}$	$\frac{q_w}{V_{90}Y_{90}}$	E
7.5	0.161	0.688	1.075
15.0	0.241	0.609	1.097
22.5	0.310	0.554	1.085
30.0	0.410	0.467	1.105
37.5	0.569	0.335	1.148
45.0	0.622	0.301	1.097
60.0	0.680	0.241	1.249
75.0	0.721	0.206	1.318

U literaturi [4] je predložena sledeća zavisnost između ugla  $\theta$  i srednje koncentracije  $\bar{C}_e$ :

$$\bar{C}_e = 0.75 (\sin \theta)^{0.75}$$

#### (b) Koeficijent trenja

Uvučeni vazduh redukuje napone smicanja između slojeva toka zbog čega se Darcy – Weisbach-ov koeficijent trenja u ovazdušenom toku ( $f_e$ ) smanjuje u odnosu na koeficijent trenja ( $f$ ) u toku bez vazduha. Eksperimentalno utvrđeni odnos između vrednosti  $\bar{C}$  i  $f_e/f$  prikazan je u tabeli 2 [19]. Prema tome, kada je poznat koeficijent trenja ( $f$ ) za tok sa ekvivalentnom dubinom ( $d_e$ ) lako se određuje koeficijent trenja u

ovazdušenom toku. Preporučuje se da se pri proceni koeficijenta trenja ( $f$ ) koristi zavisnost  $f = \varphi(4d_e/k_s)$  koja se može naći u odgovarajućim priručnicima. U tom slučaju se jednačine  $f = \varphi(\cdot)$  i  $d_e = \Psi(\cdot)$  iz sledeće tačke moraju rešavati simultano.

#### (c) Ekvivalentna dubina ( $d_e$ )

Ekvivalentna dubina vodne faze ( $d_e$ ) određuje se pomoću sledeće jednačine:

$$d_e = \left[ \frac{q_w^2 f_e}{8g \sin \alpha} \right]^{1/3} \quad 2.4.2.$$

U gornjoj jednačini je poznat specifični protok ( $q_w = Q/B$ ) i nagib dna ( $\sin \alpha$ ) a koeficijent trenja ( $f_w$ ) ili je poznat ili se određuje simultano sa jednačinom 2.4.2.

#### (d) Prosečna brzina ( $V_w$ ) i dubina ovazdušenog toka ( $Y_{90}$ )

Ova dva parametra se određuju pomoću jednačina 2.3.2 i 2.3.3 za već određene vrednosti  $q_w$ ,  $d_e$  i  $\bar{C}_e$ .

#### (e) Karakteristična brzina ( $V_{90}$ )

Ovaj parametar jednolikog strujnja ovazdušenog vodnog toka može se odrediti pomoću jednačine 2.3.4. [15]. Nezavisno promenljive u ovoj jednačini su unapred zadate ( $q_w$ ) ili određene u prethodnim postupcima ( $C_{ei}$ ,  $Y_{90}$ ) dok su vrednosti integrala sa desne strane jednačine date u tabeli 2 u zavisnosti od nezavisno promenljive  $\bar{C}_e$ .

#### (f) Raspodela brzine ovazdušenog toka po dubini

Eksperimentalna istraživanja na modelima i izvedenim brzotocima ukazuju da se raspodela brzine po dubini ovazdušenog toka na deonici jednolikog strujanja može iskazati sledećom jednačinom (literatura [6, 7]):

$$V(y) = V_{90} (y / Y_{90})^{1/6} \quad 2.4.3.$$

gde je  $y$  – upravna udaljenost tačke od dna u kojoj se određuje vrednost  $V(y)$ .

Sve nezavisno promenljive u gornjoj jednačini su ili unapred izabrane ( $y$ ) ili već određene ( $V_{90}$ ,  $Y_{90}$ ).

U brojnoj tehničkoj literaturi su, sem navedenih, prikazane i druge grafički i analitički izražene zavisnosti, prilagođene eksperimentalnim podacima, pomoću kojih se takođe mogu odrediti karakteristični parametri jednolikog strujanja ovazdušenog vodnog toka.

## 2.5. Postepeno promenljivo strujanje ovazdušenog vodnog toka (deonica II)

Ova vrsta strujanja ostvaruje se na delu brzotoka između kritične tačke i deonice sa jednolikim strujanjem ovazdušenog toka. Duž deonice II postepeno su promenljivi svi parametri toka pa se ovazdušeni tok može upoređivati sa postepeno promenljivim tokom vode bez vazduha s tom razlikom što su u ovazdušenom toku nepoznati i koncentracija vazduha i gustina mešavine.

Osnovni parametri strujanja na ovoj deonici su srednja koncentracija vazduha ( $\bar{C}$ ), raspodele koncentracija vazduha i brzine u poprečnom preseku upravnom na dno, koeficijent trenja ( $f$ ), ekvivalentna dubina vodne faze ( $d$ ), srednja brzina vodne faze ( $U_w$ ), karakteristična brzina ovazdušenog toka ( $V_{90}$ ) i dubina ovazdušenog toka ( $Y_{90}$ ). Za razliku od parametara za jednoliko strujanje koji su konstantni duž deonice III, svi nabrojani parametri na deonici II su promenljivi i zavise od udaljenosti profila od kritične tačke.

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja [13] pokazuju da je opravdano učiniti sledeće pretpostavke pri opisu postepeno promenljivog ovazdušenog toka:

- mehanizam uvlačenja i ispuštanja vazduha, kao i jednačine koje opisuju ovu pojavu, iste su kao za jednoliki ovazdušeni tok;
- uticaj sadržaja vazduha na otpore kretanju je isti kao za jednoliki ovazdušeni tok;
- raspodela vazduha je u lokalnoj ravnoteži u svakoj tački brzotoka tako da može da se primeni ista raspodela vazduha u preseku upravnom na dno kao u jednolikom toku koja isključivo zavisi od pada dna brzotoka.

Postepeno promenljivo strujanje ovazdušenog toka ima i sledeće osobine [6,15]:

- prirast količine vazduha duž toka je postepen i mali;
- promena brzine duž toka je postepena i mala
- raspodela pritiska je kvazi-statička.

U procesu određivanja karakterističnih parametara postepeno promenljivog strujanja ovazdušenog toka neophodno je da se najpre odrede ekvivalentna dubina ( $d$ ) i srednja koncentracija ( $\bar{C}$ ) u bilo kom preseku deonice II. Poznavanje ova dva parametra omogućava proračun svih ostalih lokalnih parametara, koristeći pri tome koncept o lokalnoj ravnoteži (tačka C, gore).

Parametri  $d$  i  $\bar{C}$  u bilo kom preseku brzotoka na deonici II određuju se pomoću jednačine kontinuiteta za vazdušnu fazu mešavine voda – vazduh i energetske jednačine za vodnu fazu mešavine. Ova energetska jednačina je proširena jednačina za postepeno promenljivi vodni tok bez vazduha u kojoj se ovazdušeni tok posmatra kao kontinualni fluid sa promenljivom gustinom i brzinom duž toka.

Prema literaturi [16] odgovarajuće diferencijalne jednačine su

– jednačine kontinuiteta

$$\frac{d}{dx'} \bar{C} = (1 - \bar{C}) \cdot \left[ \frac{u_R \cdot d_* \cdot \cos \theta}{q_w} (\bar{C}_e - \bar{C}) (1 - \bar{C}) + \frac{\bar{C}}{W'} \frac{dW'}{dx'} \right] \quad 2.5.1.$$

- energetska jednačina

$$\frac{d}{dx'} d' = \frac{\sin \theta \left( 1 + d' \frac{d\theta}{dx'} - S_f + E \frac{d'}{W'} \frac{F_*^2}{d'^3} \frac{dW'}{dx'} \right)}{\cos \theta - E \frac{F_*^2}{d'^3}} \quad 2.5.2.$$

U gornjim jednačinama su:  $d_* = d$  u tački  $x = 0$ ;  $x' = x/d_*$ ;  $d' = d/d_*$ ;  $W' = W/d_* \cdot x$ ,  $x$  – rastojanje profila od kritične tačke;  $d$  – lokalna ekvivalentna dubina vodne faze,  $W$  – lokalna širina brzotoka koja se postepeno povećava ili smanjuje duž deonice II;  $q$  – specifični protok ( $m^3/\text{sek}/m$ );  $E$  – koeficijent korekcije kinetičke energije koji zavisi od lokalne vrednosti  $\bar{C}$  (tabela 2):  $F_*^2 = q^2/d_*^3$   $S_f = (q_w^2 f_e)/(8g d^2)$  – pad energetske linije.

U literaturi [6] se preporučuje da se u jednačini 2.5.1 koristi vrednost  $U_R = 0.4$  m/s.

Jednačine 2.5.1 i 2.5.2 su dve obične simultane diferencijalne jednačine koje, povezane sa vrednostima  $f_e/f = \varphi_1(\bar{C})$  i  $\bar{C} = \varphi_2(\theta)$  – tabelle 1 i 2 – mogu biti rešene koristeći eksplicitnu numeričku šemu. Rešenja su lokalne vrednosti  $d$  i  $\bar{C}$  u bilo kojoj tački duž deonice II. Proračunate vrednosti ovih parametara omogućavaju da se izračunaju lokalne vrednosti parametara  $Y_{90}$  (jednačina 2.3.2),  $V_{90}$  (jednačina 2.3.4 i tabela 2), integracione konstante  $K'$  i  $D'$  (tabela 1), raspodela koncentracije vazduha (jednačina 2.4.1) i raspodela brzine (jednačina 2.4.3).

Proračun počinje od profila kroz kritičnu tačku u kome treba pretpostaviti da je  $\bar{C} = 0$ , premda je ova pretpostavka konzervativna. Naime, merenjima u prirodi je pokazano da podužni vrtlozi koji se formiraju u jezeru i na deonici I uvlače vazduh u vodni tok tako da srednja koncentracija vazduha u profilu kroz kritičnu tačku iznosi oko 5%.

## 2.6. Nedostajuća znanja

Na kraju poglavlja o prirodnom ovazdušenju vodnog toka u brzotoku ističe se potreba da se nastavi istraživački rad o uticaju nekih karakteristika brzotoka na uvlačenje vazduha iz atmosfere u vodni tok i ispuštanje uvučenog vazduha iz vodnog toka. Prema dosadašnjim saznanjima najvažniji, još uvek nedovoljno tačno definisani uticaji su: eventualni stojeći talasi na strmim brzotocima zbog kojih je normalno strujanje u brzotoku znatno modifikovano, rapavost brzotoka, promena pravca kretanja toka u osnovi, promena geometrije brzotoka (smanjenje ili povećanje širine brzotoka duž toka), promena pada dna brzotoka, vertikalne krivine dna brzotoka i uticaj blagog nagiba dna brzotoka (manjeg od  $7.5^\circ$ ).

Takođe su ostali neizučeni uticaji nekih pretpostavki na verodostojnost parametara koji definišu postepeno promenljivo strujanje ovazdušenog toka (deonica II) a čije su vrednosti određene na osnovu tih pretpostavki.

## 3. KAVITACIONA EROZIJA BETONSKIH POVRŠINA BRZOTOKA

U mnogim brzotocima visokih brana voda struji brzinama od 10 m/s. Šta više, tipične brzine za većinu ovih brzotoka kreću se u granicama od 20 m/s do 40 m/s.

S druge strane, svi brzotoci po pravilu sadrže neke nedostatke, neravnine i oštećenja zbog:

- pogrešno izabranog tipa i oblika elemenata brzotoka, kao što su spojnice, krivine, završna obrada betona itd. (faza projektovanja);
- načina gradnje jer se neravnine na betonskoj oblozi praktično ne mogu odstraniti ni primenom najsavremenijih tehnologija gradnje;
- neravnomernog sleganja pojedinih delova brzotoka, uticaja klimatske i hemijske prirode, vandalizma ili ređe, abrazije betona (faza eksploatacije).

Neravnine na betonskoj površini, formirane na napred navedene načine, mogu da budu pojedinačne (izolovane), linijske-upravne na tok, linijske-paralelne sa tokom, uniformno raspoređene na većoj površini kao i kombinacija uniformnih i izolovanih neravnina umerenih visina.

Napred navedene neravnine na betonskoj površini treba razlikovati od uobičajene rapavosti betonske površine. Naime, visina neravnina je dosta veća od apsolutne rapavosti betona. Pojedinačne ili linijske neravnine

izolovano štrče iz rapavog betona a tekstura uniformno raspoređenih neravnina ne sadrži pojedinačne ili linijske neravnine. Primer za kombinaciju uniformno raspoređenih i individualnih neravnina je betonska površina oštećena abrazijom.

Površinske neravnine izazivaju skretanje strujnica i povećanje lokalnih brzina. Usled toga formiraju se zone niskog pritiska i, ako je povećanje brzine dovoljno veliko, lokalni pritisak može da padne ispod vrednosti lokalnog pritiska vodene pare. U tom momentu vodni tok gubi homogenost i prelazi iz tečnog u gasovito stanje. Pri tome se u vodnom toku obrazuju mehuri ispunjeni vodenom parom koje vodni tok pronosi nizvodno od neravnine. Lokalni pad pritiska može da se javi i kod veoma uglačanih betonskih površina i očigledno uniformnog toka ako je brzina vode dovoljno velika (obično veća od 25 m/s). Tada se, u smućenoj zoni pri dnu, nastaloj usled trenja o betonsku oblogu, znatno povećava intenzitet turbulencije koja prouzrokuje velike fluktuacije pritiska ( $p'(t)$ ). Fluktuacije mogu da budu toliko velike da trenutni pritisak  $p = \bar{p} \pm p'(t)$  može povremeno da padne i ispod vrednosti lokalnog pritiska vodene pare. Prema tome, napred opisano narušavanje homogenosti vodnog toka i pojava mehura ispunjenih vodenom parom može da se desi i pri srednjem pritisku  $\bar{p}$  većem od atmosferskog.

Kada formirani mehuri, nošeni vodnim tokom, ponovo dođu u region visokog pritiska postaju nestabilni i kolapsiraju a vodena para se brzo vraća u tečno stanje. Kolapsiranje mehura generiše mikromlazeve velike brzine prostiranja sa izuzetno velikim vršnim pritiscima ekstremno kratkog trajanja.

Proces u kome voda, pri konstantnoj temperaturi, prelazi u gasovito stanje usled smanjenja pritiska (formiranje mehura) i ponovo se vraća u tečno stanje (kolaps mehura) naziva se *kavitacija*.

Kavitacija ne mora da bude štetna ukoliko proces generiše samo zvuk (oštar prasak) ili vibracije, odnosno ukoliko mehuri kolapsiraju unutar vodne mase, dovoljno daleko od čvrste granice vodnog toka. Ali, ako mehur kolapsira u blizini čvrste granice, vršni pritisci velike učestalosti, tipične vrednosti od 10 000 m vodnog stuba, deluju na beskonačno malu površinu čvrste granice u ekstremno kratkom vremenu. Neprekidni udari pomenutog reda veličine i zamor materijala oštete, pre ili kasnije, skoro svaki materijal. Proces otkidanja i odnošenja materijala od koga je izgrađena čvrsta granica naziva se *kavitaciona erozija*.



Prema rezultatima dosadašnjih istraživanja na obim kavitacionih oštećenja najviše utiču sledeći faktori:

(1) – **Izvori kavitacije.** Najčešći izvori kavitacije kod brzotoka su pojedinačne (izolovane) i linijske neravnine. Obim kavitacionog oštećenja zavisi, između ostalog, i od tipa, oblika i visine neravnine. Za neke oblike neravnina, kavitaciona oštećenja mogu i da izostanu ukoliko kavitacioni mehuri kolapsiraju unutar vodne mase. Pojedinačne (izolovane) neravnine su znatno štetnije od ravnomerno raspoređenih neravnina. Vodni tok preko krive granice koja sadrži neki tip neravnine ima različite kavitacione karakteristike u odnosu na tok preko ravne granice koja sadrži isti tip neravnine.

(2) - **Brzina toka.** Opšte usvojena i potvrđena pretpostavka je da tok dobija kavitacioni potencijal kada brzina vode pređe neku granicu. Eksperimentima je utvrđeno da kavitaciona oštećenja mogu početi pri brzinama čiste vode od  $12 \div 15$  m/s. Obim kavitacionih oštećenja za isti tip i visinu kavitacionog izvora raste sa porastom brzine i funkcija je petog do sedmog stepena brzine.

(3) - **Stepen razvoja kavitacije.** U zavisnosti od izvora kavitacije i brzine vodnog toka, kavitacija može da bude u fazi početne, razvijene i superkavitacije. Najveća oštećenja se dešavaju u fazi razvijene kavitacije. U druga dva stepena razvoja kavitacije oštećenja su znatno manja i mogu čak i da izostanu, naročito pri dovoljno visokoj kavitacionoj otpornosti materijala i kratkom dejstvu kavitacije.

(4) - **Sadržaj vazduha u vodi.** Ublažavajući efekat vazduha na obim kavitacionih oštećenja posledica je promena brzine prostiranja zvuka u vodi koja okružuje kolapsirajući mehur vodene pare zbog prisustva ravnomerno raspodeljenih malih mehura vazduha. Obim kavitacionih oštećenja opada sa povećanom koncentracijom vazduha u vodi.

(5) - **Otpornost materijala na kavitaciona oštećenja.** Ova otpornost zavisi od čvrstoće, duktilnosti i homogenosti materijala. Elastičniji materijal je otporniji na kavitaciona oštećenja. U literaturi [20] je iznet podatak da, pri brzini od 30 m/s, kavitacija napravi rupu dubine 13 mm za dva sata u običnom betonu. Ista rupa se napravi u «polimer» betonu posle 125 sati, a u nerđajućem čeliku posle oko 6000 sati. Rupa iste dubine se formira 7 puta brže u običnom čeliku u odnosu na nerđajući, a oko 25 puta brže u aluminijumu ili bakru.

(6) – **Dužina vremena dejstva kavitacije.** Prirast obima kavitacione erozije bilo kog materijala menja se sa vremenom dejstva kavitacije. U prvom periodu dejstva odošenje materijala se ne dešava (period je poznat pod nazivom «zona inkubacije») Sledi period u kome se prirast obima erozije brzo povećava sa vremenom dejstva i na kraju ovog perioda dostiže maksimalnu stopu prirasta (akumulaciona zona). Zatim dolazi period u kome prirast erozije opada (atenuaciona zona) a sledi ga period u kome je prirast erozije konstantan (ustaljena zona). Dubina oštećenja nizvodno od neravnina će, pri konstantnom protoku, težiti da dostigne nepromenljivu vrednost posle dovoljno dugog vremena dejstva kavitacije.

Brojna iskustva pokazuju da se kavitaciona erozija kod površinskih brzotoka obično javlja iza pojedinačnih (izolovanih) slučajno raspoređenih neravnina na površini betona i iza linijskih neravnina kao što su spojnice upravne na vodni tok. Moguća je i pojava kavitacionih oštećenja na površini ravnomerno raspodeljenih neravnina kao i iza vertikalnih krivina. Pulzacije pritisaka, indukovane velikim intenzitetom turbulencije unutar vrtloga u smičućim zonama vodnog toka, stvaraju idealne uslove za razvoj kavitaciono-erozionog procesa.

Činjenica da se kavitacija javlja skoro na svim prelivima visokih brana uslovlila je potrebu da se definiše pod kojim se okolnostima ona javlja i kakav je efekat te pojave.

U praksi je najviše u upotrebi kavitacioni broj ( $\sigma$ ) kao parametar koji kvantifikuje fenomen jer se upoređuje sa kritičnom vrednošću kavitacionog broja ( $\sigma_i$ ), pri kome nastaje kavitacija. Kritični kavitacioni broj ( $\sigma_i$ ) se određuje eksperimentalnim putem [20,21].

Kavitacioni broj je hidrodinamički parametar i definisan je izrazom:

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\rho \cdot v_0^2 / 2g}$$

gde je:  $p_0 = p_a + p_g$  - apsolutni lokalni pritisak u tački na granici toka;  $p_a$  - lokalni atmosferski pritisak;  $p_g$  - pijezometarski pritisak u tački na granici toka (poželjno da je izmeren na hidrauličkom modelu);  $p_v$  - lokalni pritisak vodene pare;  $\rho$  - gustina vode;  $V_0$  - prosečna brzina vodnog toka ili brzina na visini neravnine ili brzina koja se lako meri (na primer, na granici turbulentnog graničnog sloja), što se naglašava i uzima u obzir u analizama.

Premda jedan hidrodinamički parametar kao što je kavitacioni broj ne opisuje svu kompleksnost pojave kavitacionog fenomena, ipak je to izuzetno koristan kvantitativni parametar koji ukazuje na mogućnost oštećenja betonske površine. Naime, brzotok se može smatrati sigurno zaštićenim od kavitacije ako je kavitacioni broj vodnog toka veći od kritičnog kavitacionog broja ( $\sigma_i$ ), pri najvećim brzinama i najmanjem pritisku u bilo kom delu objekta.

Kod brzotoka sa naglom promenom geometrije čvrste granice (pragovi, žljebovi, nagla promena pada dna i dr.) formira se kavitacija za vrednosti kavitacionog broja manjeg od  $\sigma_i = 2$ . Za ovu kritičnu vrednost kavitacionog broja i barometarski pritisak na površini mora, brzina pri kojoj se javlja početna kavitacija iznosi oko 10 m/s. Prema tome, preporučivo je da se pri projektovanju brzotoka ispita mogućnost pojave kavitacije za sve slučajeve u kojima je brzina vodnog toka veća od 10 m/s.

Distribucija brzine po vertikali upravnoj na dno brzotoka (pod uticajem je stepena razvoja turbulentnog graničnog sloja) je činilac koji bi takođe trebalo uzeti u obzir pri proceni rizika od kavitacije. Naime, za male neravnine, visine nekoliko milimetara, brzina toka na nivou neravnina je manja od prosečne brzine vodnog toka ako je granični sloj dobro razvijen, što je, generalno, uobičajeno kod brzotoka. Prema literaturi [21] početna kavitacija se javlja pri brzini vodnog toka od oko 10,3 m/s ako je visina neravnine 6 mm,  $\sigma_i = 1.6$ , a turbulentni granični sloj vrlo tanak. Ali, ako je turbulentni granični sloj debeo 1.0 m, a neravnina je istog tipa i visine, početna kavitacija će se pojaviti tek pri brzini od oko 20 m/s.

Kod brzotoka sa nagnutim dnom i kružnim vertikalnim krivinama piježometarski pritisak mora biti korigovan zbog nagiba dna i centrifugalne sile. U ovom slučaju se za procenu kavitacionog rizika koristi kavitacioni broj vodnog toka izračunat po formuli

$$\sigma = \frac{p_a / \gamma - p_v / \gamma + h \cdot \cos \theta + \frac{h}{g} \cdot \frac{v^2}{R}}{v^2 / 2g} \quad 3.2.$$

gde je:  $\theta$  - ugao između nagiba dna brzotoka i horizontale;  $R$  - poluprečnik kružne krivine (pozitivan za konkavnu krivinu);  $h$  - dubina vode normalna na dno brzotoka.

Ubrzanje vode blizu dna u konkavnim krivinama teži da eliminiše turbulentni granični sloj, pa brzine u blizini dna ponovo postaju velike. U regionu neposredno

nizvodno od završetka krivine pritisak se brzo smanjuje a turbulencija povećava, zbog čega kavitacija ima veću šansu da se pojavi. Za vrlo velike brzine (oko 40 m/s) i velike specifične protoke (20-30 m<sup>3</sup>/s) turbulentni granični sloj ne može znatnije da smanji rizik od kavitacije [21].

Osmatranja razvoja kavitacione erozije betona na izgrađenim brzotocima pokazuju da intenzivnija kavitaciona erozija počinje pri nekom kritičnom kavitacionom broju ( $\sigma_e$ ) manjem od kritičnog kavitacionog broja ( $\sigma_i$ ) pri kome počinje kavitacioni proces.

Za projektante brzotoka posebno je važna vrednost jedinstvenog kritičnog kavitacionog broja ( $\sigma_e$ ), primenljivog na celoj betonskoj površini brzotoka bez obzira što se na toj površini nalaze mnogobrojne, slučajno raspoređene neravnine raznih tipova, oblika i visina i različitih kritičnih kavitacionih brojeva.

Dosadašnje praktična iskustva potvrđuju da se na celoj betonskoj površini brzotoka (prave deonice i vertikalne krivine) može koristiti jedinstven kritični kavitacioni broj  $\sigma_e = 0.25$ , definisan pomoću prosečne brzine vode u razmatranom poprečnom preseku brzotoka. Ova vrednost jedinstvenog kavitacionog broja može se koristiti pri strujanju vode preko dobro obrađenih betonskih površina bez naglih vertikalnih neravnina, odnosno sa neravninama promenljive visine na dužini 20 puta većoj od maksimalne visine neravnine [20,22].

Ukoliko je kavitacioni broj vodnog toka manji od 0.25 potrebno je da se preduzmu mere za sprečavanje ili ublažavanje kavitacionih oštećenja.

U vodnom toku koji struji velikom brzinom preko jednoliko rapave betonske površine sa relativno malom apsolutnom rapavošću, početna kavitacija se može javiti na bilo kom delu rapave površine ako je kavitacioni broj vodnog toka ( $\sigma$ ) manji od kritičnog kavitacionog broja  $\sigma_i = 4f$ , gde je  $f$  - Darsi-Vajsbahov (Darcy-Weisbach) koeficijent rapavosti. Obično je  $\sigma > \sigma_i$  zbog male apsolutne rapavosti, pa je i kavitacioni rizik mali, izuzev pri brzini vode većoj od 40 m/s.

Pojava kavitacije u vodnom toku brzotoka visokih brana praktično se ne može izbeći. Suprotno ovome, kavitaciona oštećenja betona mogu se sprečiti ili, bar, ublažiti na više načina. U praksi se koristi fina obrada betona, promena geometrije brzotoka, korišćenje materijala otpornih na kavitaciona oštećenja, povećanje

apsolutne rapavosti betona i uvođenje vazduha u donju zonu vodnog toka. Takođe se koriste i kombinacije nekih od navedenih postupaka. Ako se primenom navedenih postupaka ne postigne željeni rezultat, mora se razmotriti mogućnost promene generalnog koncepta preliva (na primer, zamena preliva sa brzotokom prelivom sa slobodno padajućim mlazom).

Kritični kavitacioni broj ( $\sigma_c$ ) se znatno smanjuje odgovarajućom površinskom obradom betona ukoliko se na betonskoj površini formiraju samo neravnine u obliku rampi sa nagibom 1:20. Međutim, u toku eksploatacionog perioda objekta mogu da se formiraju nove neravnine neodgovarajućeg oblika pod dejstvom atmosferskih, klimatskih i hemijskih uticaja. Prema tome, finom površinskom obradom betona ne postiže se željeni efekat ako se ne osigura odgovarajuće održavanje i popravka betona.

Pijezometarski pritisak u tački na dnu brzotoka, odnosno kavitacioni broj ( $\sigma$ ), može se povećati promenom geometrije brzotoka. Na pravim deonicama brzotoka pritisak će se povećati postepenim smanjenjem širine brzotoka primenom konvergentnih bočnih zidova jer se kod brzotoka sa konstantnom širinom, piezometarski pritisak smanjuje a brzina povećava duž brzotoka, odnosno smanjuje kavitacioni broj vodnog toka. Kod brzotoka sa vertikalnim krivinama oblik krivine može da se formira tako da se, duž krivine, održi konstantan kavitacioni broj vodnog toka ili da se formira unapred određena distribucija pritiska. U prvom slučaju se određuje poluprečnik krivine pri kome je kavitacioni broj vodnog toka konstantan na celoj dužini krivine. Postupak je pogodan pri određivanju poluprečnika krivine odskoka. U drugom slučaju određuje se jednačina za vertikalnu krivinu u kojoj se recipročna vrednost poluprečnika krivine postepeno menja počev od nule na krajevima pa do maksimalne vrednosti u centru krivine. Metoda je pogodna za određivanje oblika vertikalne krivine koja počinje i završava se na brzotoku. U oba slučaja koriste se iste jednačine kretanja tečnosti. Odgovarajući računarski programi prikazani su u literaturi [20].

Kavitaciona oštećenja se mogu ublažiti primenom specijalnih betona [23]. Ova vrsta betona je skupa pa se obično koriste pri popravkama oštećenih delova običnog betona. Ponašanje ovih betona pri naprezanjima termičke prirode nije zadovoljavajuće.

Povećanje apsolutne rapavosti betona je postupak kojim se smanjuje brzina vode, odnosno povećava kavitacioni broj vodnog toka. Prvi utisak je da ovaj postupak nije

saglasan sa težnjom da betonska površina bude što glađa. Međutim, treba imati u vidu da apsolutna rapavost betona obično nije izvor kavitacije već su to neravnine na rapavoj betonskoj površini. Ispitivanja na dve deonice tunelskog brzotoka brane Glen Canyon, sa apsolutnom rapavošću od 0.015 mm i 1,5 mm, pokazala su da je na deonici sa većom rapavošću, potencijalno oštećenje betona 3,2 puta manje od onoga na deonici sa manjom rapavošću [20]. Takođe je utvrđeno da je efekat povećanja rapavosti na povećanje kavitacionog broja toka veći od efekta promene krivine dna. Interesantna su i zapažanja prikazana u radu [24] u kome se iznosi da u toku eksploatacije brzotoka brane Zhexi (Kina) nije bilo kavitacionih oštećenja zbog neravnine locirane nizvodno od dela brzotoka sa ručno povećanom apsolutnom rapavošću betona. Suprotno ovome, beton je bio oštećen zbog prisustva neravnine istog oblika i visine, locirane nizvodno od dela brzotoka sa malom apsolutnom rapavošću.

Uvođenje vazduha u donje zone vodnog toka u brzotoku je relativno jeftin i uspešan postupak za kontrolu kavitacione erozije. Poznato je da će vrlo mala količina vazduha, rasuta unutar vodne mase, značajno smanjiti kavitaciono-erozioni potencijal vodnog toka. Eksperimentima je utvrđeno da će koncentracija vazduha od 3% zaštititi beton čvrstoće 40 mP a koncentracija od 10% beton čvrstoće 10 mP. Ovaj postupak ima sledeće prednosti u odnosu na ostale:

- nije potrebna pažljiva obrada betonskih površina niti upotreba specijalnih betona;
- kasniji nastanak neravnina na površini betona neće dovesti do kavitacione erozije betona.

#### 4. UVOĐENJE VAZDUHA U DONJE SLOJEVE VODNOG TOKA U BRZOTOKU

Osnovni princip uvođenja vazduha u donje slojeve vodnog toka je jednostavan: vodni tok treba izdići iznad dna i u nastalu šupljinu konstantno dovoditi vazduh iz atmosfere. Turbulentni vrtlozi će uvlačiti vazduh u vodu kroz donju slobodnu površinu izdignutog toka a uvučeni vazduh će struja vode pronositi nizvodno. Negativni pritisak koji se formira u šupljini usled odnošenja vazduha učiniće da vazduh iz atmosfere stalno dotiče u šupljinu.

Fenomenom ovazdušenja (aeracije) donjih slojeva vodnog toka bavili su se brojni istraživači. U zadnjih 25 godina publikovano je mnogo radova na ovu temu od kojih se u ovom radu navodi samo jedan deo [7, 8, 9, 16, 22, 23 i od 25 do 37]. Realizovana istraživanja su omogućila da se, na osnovu generalne analize

mehanizma uvlačenja vazduha u vodni tok i podataka iz opita na modelima i izgrađenim brzotocima, mogu približno proceniti karakteristike sistema za ovazdušenje donjih slojeva vodnog toka. Ipak je, zbog kompleksnosti fenomena, još uvek neophodno da se na ovaj način određene karakteristike potvrde ili, čak, odrede ispitivanjima na hidrauličkom modelu odgovarajuće razmere.

Svaki sistem za uvođenje vazduha u donje slojeve vodnog toka mora da ima sledeće dve komponente:

- element za odvajanje vodnog toka od dna brzotoka (tzv. aerator) koji je ugrađen u dno sa ciljem da generiše uvlačenje vazduha u vodni tok i
- sistem za dovođenje atmosferskog vazduha u šupljinu koji ima funkciju da dovede atmosferski vazduh u količini zahtevanoj od prvog elementa.

Osnovni tipovi elemenata ugrađenih na dnu brzotoka su rampa, prag i žljeb. Ovi tipovi se primenjuju samostalno ili u kombinaciji. Samostalna primena žljeba se ne koristi u praksi zbog mogućeg potapanja, u kom slučaju žljeb postaje izvor kavitacije. Rampe i pragovi, kao i kombinacije ova dva tipa, su najpogodniji i najpraktičniji elementi za formiranje diskontinuiteta na dnu brzotoka. Ponekad se koristi i kombinacija sva tri osnovna tipa uz obavezno dreniranje žljeba. U ovom slučaju žljeb ima ulogu objekta za dovod i raspodelu vazduha po širini brzotoka. Rampama se postiže dobro ovazdušenje toka pri malim specifičnim protocima ( $m^3/s/m$ ). Lako se postavljaju na već izgrađenim brzotocima ali izazivaju velike poremećaje toka nizvodno. Pragovi su pogodni za velike specifične protoke a poremećaji toka nizvodno su manji u odnosu na rampe. Kombinacijom praga i rampe se postiže dobro ovazdušenje vodnog toka u širem intervalu promene specifičnih protoka.

Što se tiče sistema za dovod atmosferskog vazduha ispod mlaza, do sada su u praksi korišćeni diskontinuiteti na bočnim zidovima brzotoka (rampa, prag, žljeb) kao i vertikalna okna u bočnim zidovima sa ili bez galerije ispod praga.

Detaljniji opis aeratora i sistema za dovod vazduha izložen je u literaturi [27, 36].

Svaki od navedenih tipova aeratora i sistema za dovod vazduha ima svoje prednosti i nedostatke koje treba iskoristiti do maksimuma ili svesti na minimum. Osnovno je da se ovi elementi prilagode strujanju vode i konstruktivnim karakteristikama brzotoka. Čak i delimične greške u projektovanju i izvođenju ovih

objekata utiće na funkcionisanje sistema i mogu dovesti do stanja u kome sistem za zaštitu od kavitacione erozije postaje uzrok velikih kavitacionih opterećenja koja mogu ugroziti funkcionalnost pa čak i stabilnost celog preliva.

Unošenje vazduha u donje slojeve vodnog toka u brzotoku menja neke karakteristike strujanja nizvodno od aeratora, što se mora uzeti u obzir pri projektovanju brzotoka i objekata za disipaciju energije. Najvažnije posledice su povećanje hidrodinamičke sile u oblasti udara odskočnog mlaza u dno, povećan intenzitet uvlačenja atmosferskog vazduha kroz gornju slobodnu površinu, povećana dubina mešavine voda-vazduh zbog uvučenog vazduha kroz donju slobodnu površinu toka i povećanja brzina toka u odnosu na tok ovazdušen samo sa gornje strane (veća količina uvučenog vazduha pa je još manji koeficijent trenja a izostaje i trenje o dno na dužini odskoka).

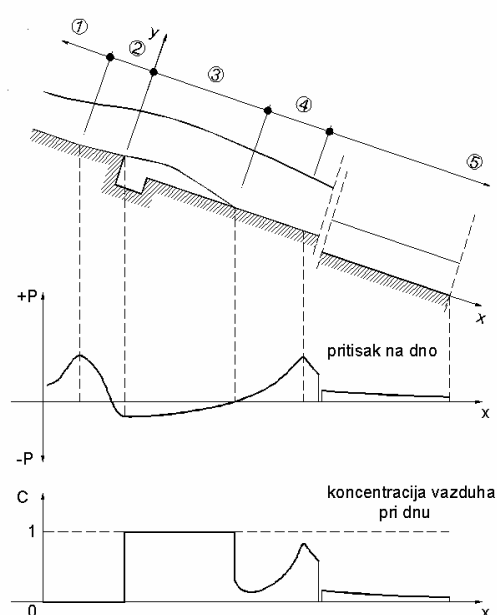
Mehanizam uvlačenja vazduha u vodni tok iz šupljine iza aeratora još uvek nije sasvim poznat. Teoretska i eksperimentalna ispitivanja ukazuju da je uvlačenje vazduha u vodni tok dominantno fenomen smicanja. Naime, najveći deo vazduha iz šupljine unose vrtlozi formirani duž donje slobodne površine odskočnog mlaza, počev od kraja rampe pa do udara mlaza u dno. Vrtlozi uglavnom nastaju zbog naglog pada pritiska na kraju aeratora, promene raspodele brzine, turbulentnih fluktuacija u prilaznom toku i uzvodnih poremećaja strujanja zbog prisustva rampe [22, 27]. Ispod odskočnog mlaza odvijaju se još dva procesa: uvlačenje vazduha vrtlozima u uzvodnom valjku koji se formira usled udara mlaza u dno i recirkulacija vazduha u šupljini [28]. Ova dva procesa unose znatno manji deo od ukupno unete količine vazduha u tok.

Eksperimenti pokazuju da se nizvodno od aeratora povećava intenzitet unošenja atmosferskog vazduha kroz gornju slobodnu površinu toka zbog povećanog nivoa turbulencije na gornjoj granici toka i inercijalnih efekata, nastalih usled promene geometrije dna brzotoka. Količina uvučenog vazduha kroz gornju slobodnu površinu je istog reda veličine kao ona uvučena iz šupljina pa se ne može zanemariti pri određivanju ukupne količine vazduha unetog u vodu nizvodno od aeratora [28].

Duž brzotoka sa sistemom za ubacivanje vazduha u donje slojeve toka izdvaja se nekoliko regiona sa različitim karakteristikama strujanja i odnosima voda-vazduh. S obzirom na procese koji se u njima dešavaju izgleda da je najprikladnija podela na sledećih pet

regiona: prilazni region, region aeratora, region ovazdušenja (aeracije), region udara odskočnog mlaza u dno brzotoka i region postepeno promenljivog strujanja toka. Neki od istraživača izostavljaju region aeratora [26], dok drugi sastavljaju poslednja dva gore navedena regiona u jedan, nazivajući ga regionom dezaeracije [25, 27, 36]. U tehničkoj literaturi se koriste različiti nazivi za regione, naročito za one nizvodno od aeracionog regiona.

Položaji navedenih pet regiona duž brzotoka sa aeratorom tipa "prag sa rampom" prikazan je na slici 4.



1. Prilazni region
2. Region aeratora
3. Region ovazdušenja
4. Region udara
5. Region postepeno promenljivog strujanja

Slika 4. Podužna struktura vodnog toka u brzotoku sa aeratorom

**Prilazni region** je deo brzotoka uzvodno od početka rampe. Karakteristike strujanja u ovom regionu (dubina, brzina, koncentracija vazduha i dr.) određuju lokaciju prvog aeratora i utiču na izbor njegovih geometrijskih karakteristika. Srednja brzina vode u nekom preseku uglavnom zavisi od vertikalnog rastojanja između nivoa vode u jezeru i brzotoku a debljina turbulentnog graničnog sloja i raspodela brzine od podužne udaljenosti preseka od krune preliva. Uvlačenje vazduha iz atmosfere moguće je samo na delu regiona

nizvodno od tačke u kojoj turbulentni granični sloj izbija na površinu vode (kritična tačka).

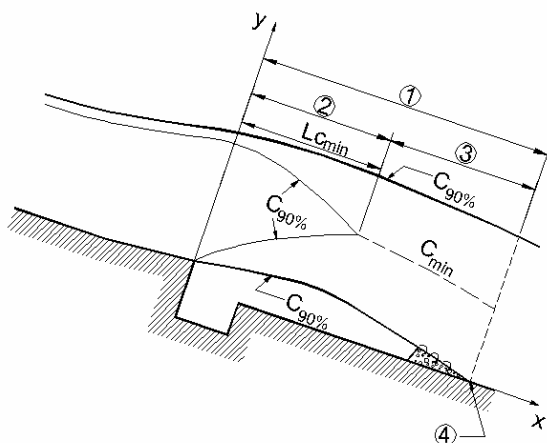
Lokacija i dužina **regiona aeratora** se poklapa sa lokacijom i dužinom aeratora. Za ovaj region koristi se i naziv *tranzitni region*. Ako je aerator tipa "prag sa rampom" dubina toka se postepeno menja po celoj dužini rampe zbog promene geometrije dna brzotoka. Takođe se menja polje pritiska (pritisci na dno su veći od hidrostatičkog) i povećavaju se naponi smicanja po dnu (povećava se trenje). Zbog svega toga povećava se nivo turbulencije kako unutar tako i van turbulentnog graničnog sloja. Ova promena nivoa turbulencije znatno utiče i na karakteristike donje slobodne površine odskočnog mlaza. Ako je aerator tipa "prag bez rampe" menja se samo pritisak na kraju praga, naglo prelazeći iz hidrostatičkog u pritisak koji vlada u šupljini.

**Aeracioni region** počinje u profilu u kom odskočni mlaz napušta rampu. Nizvodni kraj ovog regiona nije dobro definisan pa se smatra da dužinu regiona približno određuje trajektorija donje slobodne površine odskočnog mlaza. Ova trajektorija takođe definiše i geometriju šupljine u kojoj je po pravilu pritisak negativan. Ovaj region se, sem po pomenutoj nagloj promeni pritiska, razlikuje od uzvodnog i po nagloj promeni napona smicanja po donjoj granici toka koji od velikih vrednosti pada skoro na nulu. Ove promene dovode do ubrzanja toka i razvoja nestabilne vodne površine a zatim i do formiranja spreja na donjoj međugranici voda-vazduh. Kao što i samo ime kaže, u ovom regionu se odvija proces ovazdušenja donjih slojeva toka posredstvom turbulentnih vrtloga velikog intenziteta kojima se vazduh iz šupljine uvlači u tok kroz donju slobodnu površinu i zatim pronosi nizvodno. Ovazdušenje toka je moguće samo ako je šupljina u direktnom kontaktu sa atmosferom.

Jedna od karakteristika odskočnog mlaza je jezgro čiste vode u sredini (slika 5).

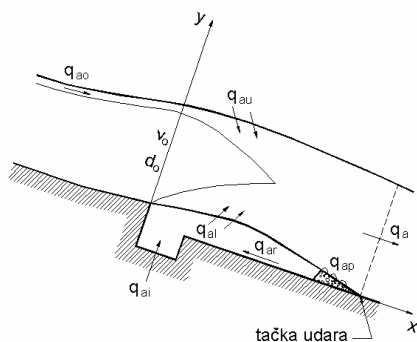
Debljina jezgra se smanjuje nizvodno i gubi se na razdaljini od  $L_{cmin/h0} = 10 \div 15$ , ukoliko je odskočni mlaz dovoljno dug [31]. S obzirom na prisustvo pomenutog jezgra, aeracioni region se može podeliti na dva podregiona: u prvom je odskočni mlaz delimično ovazdušen kroz gornju i donju slobodnu površinu toka sa jezgrom čiste vode u sredini, dok je u drugom mlaz potpuno ovazdušen. Dužina prvog regiona se poklapa sa dužinom unutrašnjeg jezgra čiste vode ( $L_{cmin}$ ). Moguće je da se drugi podregion i ne formira u aeracionom regionu. Eksperimentima je utvrđeno da se Gausova kriva raspodele dobro prilagođava merenim podacima o

raspodeli koncentracije vazduha u prvom podregionu, ali se ne može koristiti u podregionu potpuno ovazdušenog mlaza. Eksperimentima utvrđena raspodela koncentracije u drugom podregionu ima dve maksimalne vrednosti (gornju i donju) i jednu minimalnu vrednost ( $c_{min}$ ) oko sredine debljine mlaza (slika 5). Numerička vrednost parametra ( $c_{min}$ ) raste nizvodno u zavisnosti od porasta količine uvučenog vazduha u tok.



1. Region ovazdušenja
2. Podregion sa jezgrom čiste vode
3. Potpuno ovazdušen podregion
4. Tačka udara

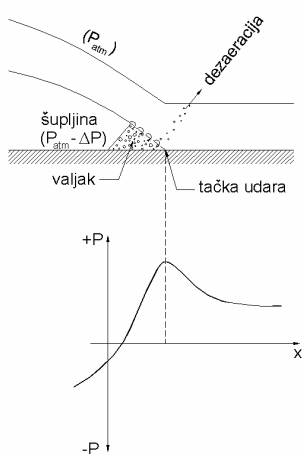
Slika 5. Podela regiona ovazdušenja na podregione



- $q_{ai}$  – dotok vazduha  
 $q_{au}$  – uvlačenje kroz gornju slobodnu površinu  
 $q_{al}$  – uvlačenje kroz donju slobodnu površinu  
 $q_{ar}$  – recirkulacija vazduha  
 $q_{ap}$  – uvlačenje vrtloga uranjanjem mlaza u vrtlog  
 $q_a$  – ukupna količina vazduha u toku  
 $q_{ao}$  – vazduh iz regiona aeratora

Slika 6. Šema uvlačenja vazduha u vodni tok u regionu ovazdušenja

**Region udara** je karakterističan po brzoj preraspodeli koncentracije vazduha i po dezaeracionom procesu koji počinje da se razvija neposredno nizvodno od tačke udara (Slika 7). Kada odskorni mlaz udari o dno brzotoka menja se pritisak na dno od negativnog u šupljini do maksimalnog u tački udara, znatno većeg od hidrostatičkog pritiska. Lokacija tačke udara je promenljiva i zavisi od oscilcija potpritiska u šupljini. Karakteristike vodnog toka u regionu udara izučavane su i određene samo za male Frudove brojeve na kraju aeratora [30]. Zapaženo je da se pri malim Frudovim brojevima formira uzvodni vodni valjak kada odskorni mlaz udari u dno brzotoka, dok formiranje valjka nije registrovano za velike Frudove brojeve. Vodni valjak ubacuje izvesnu količinu vazduha iz šupljine u vodni tok ali može i da ispuni šupljinu vodom i prekine osnovnu namenu aeracionog regiona ukoliko aerator nije dobro dimenzionisan. Moguće formiranje uzvodnog vodnog valjka i njegov uticaj na funkcionisanje sistema za ovazdušenje čini da se ne može definisati (a praktično nije ni neophodno) jasna granica razdvajanja regiona udara od regiona ovazdušenja iako se u njima realizuju dva suprotna procesa: ovazdušenje i dezaeracija vodnog toka. Naime, valjak bi mogao da pripada regionu udara zbog porekla postanka i pozitivnih pritisaka koje prouzrokuje na dno brzotoka, ali ima osnova i za zaključak da pripada regionu ovazdušenja jer direktno učestvuje u ovazdušenju vodnog toka a može i da utiče na funkcionalnost ovog regiona. S projektantske tačke gledišta mnogo je važnije da se odredi nizvodna granica regiona udara i karakteristike toka (karakteristična dubina ( $h_*$ ) i prosečna koncentracija vazduha ( $C_*$ ) na granici. Prema literaturi [28] kraj regiona udara, odnosno početak regiona sa postepeno promenljivim strujanjem, udaljen je od kraja aeratora za dužinu od  $L_p = (1.3 \div 1.5) L_j$ , gde je  $L_j$  – udaljenost tačke udara od kraja aeratora. U tehničkoj literaturi nema podataka o eksperimentima utvrđenoj količini vazduha koja izlazi iz vodnog toka u atmosferu u regionu udara. U literaturi [28] se navodi da su karakteristike toka na donjoj granici regiona udara ( $h_*$  i  $C_*$ ) skoro nezavisne od protoka ( $Q_v$ ) potpritiska u šupljini ( $\Delta P$ ) i potražnje vazduha ( $Q_a$ ), a zavisne su samo od dubine vode ( $d_0$ ) na kraju aeratora. U pomenutoj literaturi nisu navedene numeričke vrednosti ovih odnosa koje bi se mogle koristiti u analizi regiona sa postepeno promenljivim strujanjem ovazdušenog toka u brzotoku sa aeratorom bilo kojeg tipa i dimenzija.



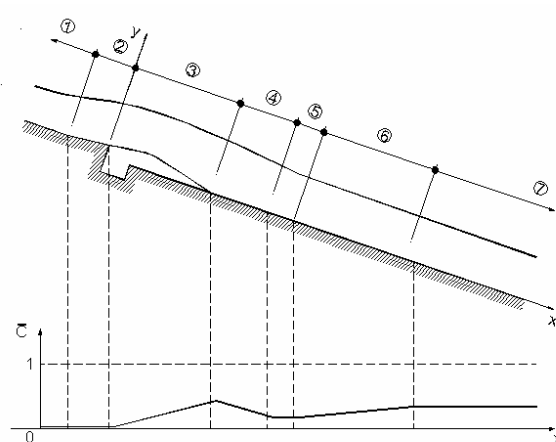
Slika 7. Okolina tačke udara

U regionu sa postepeno promenljivim strujanjem ovazdušenog toka preraspodeljuje se koncentracija vazduha u preseku upravnom na dno, pri čemu se postepeno smanjuje koncentracija pri dnu a povećava pri vrhu. Mehuri vazduha ubačeni u donje slojeve vode, izdižu se i mešaju sa česticama atmosferskog vazduha uvučenog u vodni tok kroz gornju slobodnu površinu vode. Ukoliko je dužina brzotoka nizvodno od aeratora dovoljno velika, koncentracija vazduha u vodi će doći u stanje ravnoteže u kojoj je količina atmosferskog vazduha uvučenog u vodu jednaka količini vazduha izašlog iz vodnog toka u atmosferu. Ravnotežno stanje koncentracije vazduha je karakteristično po malom odnosu voda-vazduh pri dnu i velikom odnosu blizu slobodne površine vode. U preseku brzotoka u kome koncentracija vazduha pri dnu padne ispod potrebnog nivoa postavlja se nov sistem za ovazdušenje vodnog toka.

U literaturi [37] prikazana je podužna struktura vodnog toka u brzotoku nizvodno od aeratora, nešto različita od napred opisane. Podela se zasniva na rezultatima obimnih istraživanja na hidrauličkom modelu koja su pokazala da se količina vazduha u toku iza aeratora najpre smanjuje duž toka do neke minimalne vrednosti zavisne od transportnog kapaciteta toka, a zatim povećava zbog uvlačenja vazduha kroz gornju slobodnu površinu vode sve do preseka u kome se uspostavlja ravnotežno stanje koncentracije vazduha. U pomenutoj literaturi je predložena podela na region ovazdušenja, region smanjenja koncentracije vazduha, region maksimalne koncentracije vazduha, region povećanja koncentracije vazduha i region sa uravnoteženom (jednolikom) koncentracijom vazduha u toku (slika 8).

U dosadašnjoj praksi je uobičajeno da analiza vodnog toka u brzotoku sa aeratorima počne od najuzvodnijeg, prilaznog regiona, s obzirom da karakteristike uzvodnog regiona po pravilu utiču na vrednosti karakteristika nizvodnog regiona.

Takođe je moguć i postupak u kome se najpre analizira i određuje lokacija prvog aeratora i biraju lokacije svih ostalih (obično su o tačke preloma dna brzotoka) uzimajući u obzir iskustvene podatke o rastojanju između dva aeratora. Zatim se određuju geometrijske i druge karakteristike svih sistema za ovazdušenje na brzotoku (aerator + dovod vazduha), tako da traženi nivo zaštite bude postignut na celoj dužini brzotoka, odnosno da koncentracija vazduha pri dnu ne padne ispod zahtevane vrednosti. Ponekad se mora koristiti postepeno približavanje karakteristikama uzvodnog regiona kako bi se dobio željeni rezultat u nizvodnom regionu. Osnovni cilj analiza je da se što tačnije proceni odnos voda-vazduh u proučavanom regionu jer je vazduh najvažniji činilac u zaštiti brzotoka od kavitacionih oštećenja. Od odnosa voda-vazduh uglavnom zavise i druge karakteristike vodnog toka (dubina, brzina, koeficijent trenja i dr.).



1. Prilazni region
2. Region aeratora
3. Region ovazdušenja
4. Region smanjenja koncentracije vazduha
5. Region minimalne koncentracije vazduha
6. Region povećanja koncentracije vazduha
7. Region sa uravnoteženom koncentracijom vazduha

Slika 8. Šema razvoja koncentracije vazduha nizvodno od aeratora prema literaturi [37]

Dosadašnja istraživanja na modelima i izgrađenim objektima imala su za cilj da odrede analitičke zavisnosti na osnovu kojih bi se mogle odrediti neke od karakteristika vodnog toka sa aeratorima. Ipak, s obzirom na kompleksnost problema i međusobne uticaje, sve vrednosti karakteristika, određene pomoću eksperimentalnih zavisnosti opšteg tipa, moraju se potvrditi, a neke od njih i odrediti, merenjima na hidrauličkom modelu. Hidraulička modelska ispitivanja i provera rezultata na izgrađenim objektima su još uvek nezaobilazan korak u procesu projektovanja sistema za ovazdušenje donjih slojeva vodnog toka u brzotoku.

S projektantske tačke gledišta od posebnog interesa su analize u vezi sa lokacijom prvog aeratora, tipom i veličinom aeratora, količinom uvučenog vazduha u vodu pomoću aeratora, tipom i dimenzijama sistema za dovod vazduha ispod odskočnog mlaza i međusobnom udaljenošću aeratora, s obzirom na traženi nivo zaštite brzotoka od kavitacionih oštećenja.

U nastavku rada prikazani su rezultati istraživanja na hidrauličkim modelima i izgrađenim objektima raznih istraživača, pomoću kojih se mogu izraditi preliminarni projekti sistema za ovazdušenje donjih slojeva vodnog toka.

#### 4.1. Lokacija prvog aeratora (prilazni region)

Lokacija prvog aeratora zavisi od karakteristika vodnog toka u prilaznom regionu. Dubina toka, brzina, razvoj graničnog sloja, kritična tačka (početak ovazdušenja) i koncentracija vazduha u vodi određuju se postupcima opisanim u tački 2 ovog rada. Na osnovu ovih analiza mogu se odrediti vrednosti nabrojanih karakteristika u svakom preseku duž brzotoka i ustanoviti zavisnosti  $\sigma = \sigma(x)$  i  $C_0 = C_0(x)$ , gde je  $x$  – udaljenost preseka od krune preliva. Iskustvo pokazuje da se najmanji kavitacioni broj najčešće dostiže pri protoku manjem od maksimalnog, pa se napred pomenute zavisnosti moraju ustanoviti za nekoliko manjih protoka. U literaturi se preporučuje da se protok menja sa priraštajem od  $0.2 Q_{max}$ , a cilj je da se formiraju zavisnosti  $\sigma(Q, x)$  i  $C_0(Q, x)$ . Na osnovu ovih zavisnosti može se ustanoviti pri kom protoku i na kojoj se lokaciji dostižu vrednosti  $\sigma_{min}$  i  $C_{0min}$ .

Generalno, prvi aerator treba da bude postavljen neposredno uzvodno od lokacije na kojoj ima uslova da se proizvedu kavitaciona oštećenja, odnosno na lokaciji u kojoj je kavitacioni broj manji od  $\sigma_c = 0.25$  a koncentracija pri dnu  $C_0$  manja od 8%. U tehničkoj literaturi se preporučuje da brzine vode u profilu prvog

aeratora treba da bude 20-30 m/s a Frudov broj veći od 4. Ukoliko ima uslova da dođe do potapanja šupljine nizvodno od aeratora, preporučuje se da Frudov broj bude 7 i veći [30, 36].

Pogodna lokacija za postavljanje prvog aeratora su krajevi razdelnih zidova na prelivu zbog lakog dovoda atmosferskog vazduha. Druge pogodne lokacije za prvi aerator (kao i za sve nizvodne) su lokacije poprečnih spojnica u dnu brzotoka koje se ne mogu izostaviti iz konstruktivnih razloga kao i promene pada dna, posebno kada je nizvodni pad veći od uzvodnog. Međutim, ako je nizvodni pad manji od uzvodnog, mora se detaljnije analizirati problem mogućeg potapanja aeratora sa nizvodne strane.

#### 4.2. Tipovi i geometrijske karakteristike aeratora (region aeratora)

Osnovni tipovi aeratora su rampa, prag i žljeb. Koriste se samostalno ili u kombinaciji.

Samostalno korišćenje žljeba nije delotvorno.

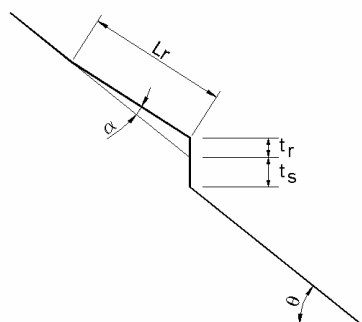
Prednosti samostalnog korišćenja rampe su dobro ovazdušenje vode pri malim specifičnim protocima i laka ugradnja u već izgrađene brzotoke. Nedostaci rampe su loše ovazdušenje pri velikim specifičnim protocima kada rampa može postati izvor kavitacije i veliki poremećaj toka nizvodno od rampe. Na izgrađenim brzotocima visina samostalne rampe kretala se u intervalu od 0.1 do 1.0 m.

Samostalnim korišćenjem praga postiže se dobro ovazdušenje toka pri velikim specifičnim protocima dok za male specifične protoke nije efikasan. Prag nije pogodan za ugradnju na izgrađenim brzotocima niti na delovima projektovanih brzotoka sa ravnim dnom ili dnom u malom padu. Uobičajena visina praga kreće se u intervalu od 1.0 do 2.0 m.

Praksa pokazuje da su najdelotvornije kombinacije osnovnih tipova aeratora. Na brzotocima sa dnom u blagom padu najefikasnija je kombinacija rampe i žljeba kroz koji se vazduh dovodi ispod mlaza. Drenaža žljeba je obavezna. Ova kombinacija se koristi i kod brzotoka sa većim padom ali uvek treba realizovati posebnu studiju sa ciljem da se pogodnim oblikovanjem aeratora spreči potapanje žljeba, odnosno prekid dovoda vazduha ispod odskočnog mlaza. Dubina žljeba je od 1.0 m do 2.5 m.



Skorija iskustva iz prakse favorizuju primenu kombinacije prag-rampa kao najpraktičnijeg uređaja za ovazdušenje na brzotocima sa većim padom (slika 9).



Slika 9. Geometrijske karakteristike praga sa rampom

Moguća je i kombinacija sva tri osnovna tipa aeratora.

Na brzotocima sa rampom (bilo da je samostalna ili u kombinaciji sa pragom) menja se pad dna brzotoka na celoj dužini regiona aeratora jednakoj dužini rampe. Zbog ovoga se menjaju hidrauličke karakteristike toka u ovom regionu u odnosu na one određene za brzotoke bez rampe, pa se moraju ponovo računati

Kod brzotoka sa pragom nema promene pada dna pa ni ponovnog računanja hidrauličkih karakteristika u regionu aeratora.

Dužina regiona aeratora sa rampom zavisi od ugla nagiba dna rampe ( $\alpha$ ) i visine rampe ( $t_R$ ) od kojih zavisi i dužina skoka mlaza i ugao između udara\* (ovaj ugao se obično naziva ugao udara)\*\*. S druge strane, sa povećanjem ugla udara smanjuje se potražnja vazduha zbog povećane recirkulacije vazduha unutar šupljina. Krajnji rezultat je da se, počev od neke vrednosti ugla  $\alpha$ , potražnja vazduha smanjuje iako se ugao  $\alpha$  povećava. Iz\*\*\* i visina rampe ( $t_R$ ) mora određivati u sklopu analiza vezanih za region ovazdušenja. Do sada realizovana istraživanja pokazuju da ugao  $\alpha$  ne treba da je veći od  $15^\circ$  a da se njegova optimalna vrednost nalazi u granicama od  $4^\circ$  do  $9^\circ$ .

U projektantskoj praksi je ustaljeno da se aeratori najpre postave u tačkama preloma na podužnom profilu brzotoka. Ako je rastojanje između prelomnih tačaka veliko ili ih nema, aeratore treba postaviti na

međusobnim razmacima prema dosadašnjim iskustvima (oko 80 m do 100 m). Prema tome, lokacije aeratora su obično poznate pa treba da se odredi odgovarajuća geometrija sistema za ovazdušenje (aerator + dovod vazduha) sa ciljem da se postigne potrebno ovazdušenje donjih slojeva toka.

Izbor tipa aeratora i njegovih geometrijskih karakteristika uglavnom zavisi od karakteristika vodnog toka u regionu aeratora i potražnje vazduha nizvodno od aeratora. Zbog ovog zadnjeg, optimalne geometrijske karakteristike aeratora i karakteristike toka u regionu aeratora (zavise od promene nagiba dna brzotoka u regionu aeratora) su u uzajamnoj vezi sa karakteristikama toka u regionu ovazdušenja (dužina skoka, potražnja vazduha, ugao udara i dr.). Prema tome, sa tačke gledišta hidrauličkih analiza, regioni aeratora i ovazdušenja (aeracije) moraju se analizirati kao celina.

Određivanje idealnih proporcija raznih delova objekta za aeraciju jeste jedan od fundamentalnih projektnih problema. Pošto još uvek nema pravila i uputstava za izbor idealnih geometrijskih karakteristika aeratora, čini se da je najefikasnije osloniti se na iskustva iz pogona izvedenih sistema za ovazdušenje. U tom smislu, vrlo korisni podaci su izneti u literaturi [25, 27]. Izabrane geometrijske karakteristike, ipak, moraju podvrgnuti kontroli pomoću hidrauličkog modela celine pogodne razmere i parcijalnih modela razmere 1:10 do 1:15.

### 4.3. Karakteristike sistema za ovazdušenje (region ovazdušenja)

Region ovazdušenja počinje od kraja aeratora dok kraj regiona nije jednoglasno definisan. Neki od istraživača definišu da je kraj regiona u tački maksimalnog pritiska na dno brzotoka, dok većina prihvata definiciju da se region ovazdušenja završava u tački u kojoj donja trajektorija odbačenog mlaza vode udara u dno brzotoka. U ovom radu se koristi druga.

U ovom regionu se, posredstvom aeratora u dnu, formira odbačeni mlaz vode u koga se uvlače velike količine vazduha. Formirani odskočni mlaz vode generiše sledeće aeracione procese:

(1) uvlačenje vazduha kroz gornju slobodnu površinu mlaza;

\* Donje trajektorije mlaza i dna brzotoka u tački ...

\*\* Opiti pokazuju da se sa povećanjem ugla  $\alpha$  povećava dužina skoka, odnosno potražnja vazduha a takode i ugao udara.

\*\*\* Prethodno rečenog proizilazi da se optimalna vrednost ugla  $\alpha$  ...

- (2) uvlačenje vazduha kroz donju slobodnu površinu mlaza;
- (3) uvlačenje vazduha pri uranjanju mlaza u uzvodni vodni valjak i
- (4) recirkulacija vazduha u šupljini ispod mlaza.

Najveći obim dosadašnjih teoretskih i eksperimentalnih istraživanja odnosio se na uvlačenje vazduha kroz donju slobodnu površinu odskočnog mlaza. Znatno manji obim istraživanja obuhvata uticaj aeratora na ovazdušenje vodnog toka kroz gornju slobodnu površinu mlaza u odnosu na vodni tok bez aeratora. Uvlačenje vazduha pri uranjanju mlaza u uzvodni valjak izučavano je pri niskim Frudovim brojevima, dok za visoke Frudove brojeve ovaj fenomen nije dovoljno rasvetljen. U literaturi ima malo podataka o uticaju recirkulacije vazduha na ukupni bilans vazduha, uvučenog u vodni tok iz šupljine ispod odskočnog mlaza. Najveći deo vazduha uvlači se u vodni tok kroz procese (1) i (2), dok procesi (3) i (4) učestvuju u uvlačenju u znatno manjem obimu. To je verovatno i razlog što su poslednja dva procesa istraživana znatno manje.

Studija uvlačenja vazduha posredstvom aeratora je vrlo kompleksna zbog međusobnog uticaja četiri napred pomenuta procesa uvlačenja vazduha. Svaki od tih procesa definišu različite bezdimenzionalne jednačine ali se smatra da se dimenzionalnom analizom ne mogu uspostaviti jednostavne zavisnosti. Međutim, na osnovu jednačine kontinuiteta za vazduh [28, 31] može se definisati odnos (sl. 6):

$$q_{au} + \frac{Q_{ai}}{W} = q_a - q_{ao}$$

gde je:  $q_{au}$  – neto uvučeni vazduh kroz gornju slobodnu površinu mlaza ( $m^3/s/m$ );  $Q_{ai}$  – protok atmosferskog vazduha kroz zahvat dovodnog sistema ( $m^3/s$ );  $W$  – širina brzotoka (m);  $q_{ao}$  – količina vazduha u toku na ulazu u region ovazdušenja ( $m^3/s/m$ ) i  $q_a$  – količina vazduha u toku na izlazu iz regiona ovazdušenja ( $m^3/s/m$ ).

Gornja jednačina sugerise da ukupna količina vazduha, uvučena u tok u regionu ovazdušenja, zavisi od protoka atmosferskog vazduha kroz zahvat dovodnog sistema, neto količine vazduha uvučenog u tok kroz gornju slobodnu površinu mlaza u regionu ovazdušenja i količine vazduha uvučenog u tok kroz gornju slobodnu površinu toka uzvodno od regiona ovazdušenja. Član  $q_{ao}$  se obično zanemaruje u analizi ukupno uvučenog vazduha posredstvom prvog (najuzvodnijeg) aeratora. Vrednosti ostala dva člana ( $Q_{ai}$  i  $q_{au}$ ) zavise od osobina

vode, geometrije brzotoka i aeratora, geometrije sistema za dovod vazduha u šupljinu, karakteristika vodnog toka u regionu ovazdušenja i karakteristika šupljine ispod odskočnog mlaza.

Odnos  $\beta = q_a/q_w$  ( $q_a$  i  $q_w$  su specifični protoci vazduha i vode po 1 m širine brzotoka) je opšte prihvaćeni kvantitet kojim se definiše uvučena količina vazduha u vodni tok. Ovaj odnos zavisi od većeg broja inicijalno nezavisnih parametara koji opisuju osobine vode, geometriju brzotoka i aeratora, geometriju sistema za dovod vazduha ispod odskočnog mlaza i karakteristike vodnog toka nizvodno od aeratora. Ovako velika raznolikost po vrsti i kvantitetu parametara od kojih zavisi vrednost parametra  $\beta$  smatra se glavnim razlogom što do sada nije dostignut zadovoljavajući nivo poznavanja sistema za ovazdušenje (aerator + dovod vazduha).

U nastavku rada detaljnije se prikazuju procesi uvlačenja vazduha kroz donju i gornju slobodnu površinu odskočnog mlaza vode.

#### 4.3.1. Uvlačenje vazduha kroz donju slobodnu površinu odskočnog mlaza

Specifični protok vazduha  $q_{ai}$  ( $m^3/s/m$ ), uvučenog u vodni tok iz šupljine ispod odskočnog mlaza obično se naziva potražnja vazduha (air demand) i funkcija je karakteristika prilaznog toka, geometrije brzotoka i aeratora i pritiska  $\Delta p$  u šupljini ispod odskočnog mlaza. Radna tačka aeratora ( $Q_{ai}$ ,  $\Delta p$ ) nalazi se u preseku krive promene pritiska u dovodnom sistemu i karakteristične krive promene potrošnje vazduha. Radnom tačkom definisane su vrednosti za  $\Delta p$  i  $q_{ai} = Q_{ai}/W = q_{ai}$  za poznate karakteristike toka na ulazu u region ovazdušenja i poznatu geometriju aeratora.

Iz prethodno izloženog proizilazi da je osnovni projektantski zadatak da se definiše veza između  $\Delta p$  i  $Q_{ai}$  posebno za gubitak pritiska u dovodnom sistemu i posebno za potražnju vazduha, odnosno da se odredi zavisnost između parametra potražnje vazduha  $\beta_1$  i sledećih nezavisnih parametara: karakteristike sistema za dovod vazduha ( $\Phi$ ), prilaznog Frudovog broja ( $F_R$ ), visine aeratora ( $T$ ), ugla između nagiba dna brzotoka i horizontale ( $\theta$ ) i ugla između nagiba dna brzotoka i nagiba dna rampe ( $\alpha$ ). Tipično za sve brzotoke je da su poznate vrednosti  $F_R$  i  $\theta$ , pa treba odrediti vrednost  $\Phi$ ,  $T$  i  $\alpha$  kako bi se mogla definisati vrednost  $\beta_1$  pri kojoj se postiže prihvatljiv nivo zaštite brzotoka od kavitacionih

oštećenja. Problem je kako odrediti poslednja tri parametra, s obzirom na trenutni nivo znanja. Jedna mogućnost je da se koriste parametri sa već izgrađenih objekata ali do danas nije potvrđeno da ovaj postupak daje zadovoljavajuće rezultate. Drugi pristup je da se koriste empirijske veze, ustanovljene na osnovu rezultata mnogobrojnih ispitivanja na hidrauličkim modelima i izvedenim objektima. Drugi pristup se prikazuje u sledećem tekstu i navode empirijske zavisnosti na osnovu kojih se može odrediti protok vazduha kroz zahvat sistema za dovod ( $Q_{ai}$ ), pritisak u šupljini ( $\Delta p$ ) i dužina skoka mlaza vode ( $L_j$ ).

#### (a) – Dužina skoka ( $L_j$ )

Geometrijske karakteristike aeratora, karakteristike toka na kraju aeratora i potpritisak u šupljini ispod odskočnog mlaza su osnovni parametri od kojih zavisi oblik trajektorije mlaza i geometrijske karakteristike šupljine. Ova dva elementa mogu se odrediti analitičkim ili numeričkim metodama (uključujući i metodu konačnih elemenata) samo u preliminarnoj fazi projektovanja, ali se u konačnoj fazi projektovanja moraju realizovati odgovarajuća hidraulička modelska ispitivanja.

U nastavku se prikazuje nekoliko analitičkih i empirijskih izraza raznih autora za određivanje dužine skoka  $L_j$ .

U radu [27] su, na osnovu dotadašnjih teoretskih i eksperimentalnih studija, predložene metode za određivanje horizontalnih i vertikalnih koordinata ( $x'$ ,  $y'$ ) centralne trajektorije odskočnog mlaza sa koordinatnim početkom u tački u kojoj centralna trajektorija napušta aerator. Analizirana su dva slučaja:

(1) Rampa je dovoljno duga pa je gornja slobodna površina toka paralelna dnu rampe. U tom slučaju se mogu koristiti jednodimenzionalne jednačine toka na osnovu kojih su izvedene jednačine  $x'/h_0 = f_1(\cdot)$  i  $x'/h_0 = f_2(\cdot)$  (literatura [27]).

(2) Rampa je kratka pa gornja slobodna površina toka nije paralelna sa dnom rampe. Tada se moraju koristiti dvodimenzionalne jednačine toka. U radu [27] nisu prikazane jednačine za proračun koordinata  $x'$  i  $z'$ , već se navodi literatura u kojoj su izložene modifikacije jednačina iz tačke (1) zbog neparalelnosti slobodne površine toka i dna rampe.

U oba navedena slučaja, jednačine za proračun koordinata su, uz ostale nezavisne promenljive, funkcija i podpritisaka u šupljini  $\Delta p$ , odnosno koeficijenta podpritisaka  $P_N = \Delta p / \rho_w g h_0$

Postupak za određivanje dužine skoka  $L_j$ , najčešće prikazivan u literaturi, iznet je u radovima [8, 32, 33, 36]. Empirijske zavisnosti izvedene su na osnovu mnogobrojnih istraživanja na hidrauličkim modelima i potvrđene merenjima na izvedenim objektima u domenu njihove važnosti. U jednačine je uveden i uticaj podpritisaka na dužinu skoka tako što su najpre određeni izrazi za teoretski maksimalnu dužinu skoka pri  $\Delta p = 0$  (praktično, pritisak u šupljini nikada nije jednak atmosferskom, sem kada bi se vazduh ubacivao u šupljinu pomoću kompresora, što, očigledno, nije ekonomski prihvatljivo). Zatim je određena jednačina za modifikaciju teoretski maksimalne dužine usled uticaja potpritisaka  $\Delta p$ .

Jednačine za maksimalnu dužinu skoka izvedene su za dva tipa strujanja vode u prilaznom regionu.

- (i) - Tok je idealan jer su pri izvođenju jednačina zanemarene sile otpora u pravcu strujanja. Ovakav tok je nerealan ali se jednačine mogu koristiti za razvijajući tj. ubrzavajući tok kada linija energije u prilaznom regionu nije paralelna sa dnom brzotoka;
- (ii) - Tok je razvijen i skoro jednolik a linija energije u prilaznom regionu je praktično paralelna sa dnom brzotoka.

Ovakav vid strujanja je zastupljen u većini brzotoka u prirodi kod kojih je dužina prilaznog regiona dovoljno velika.

U ovom radu je zadržano obeležavanje svih parametara korišćenih u radovima [32, 33].

Za prvi slučaj (razvijajući tok) jednačine za određivanje dužine skoka glase:

- za aerator sa pragom i rampom

$$\lambda_{\max} = Fr^2 \cdot \bar{\theta} \cdot (1 + \bar{\theta} \cdot tg \alpha) \cdot \cos^{-1} \alpha \cdot \left\{ \left[ 1 + 2T \frac{\cos \alpha}{(\bar{\theta} \cdot Fr)^2} \right] + 1 \right\} + T \cdot tg \alpha \quad 4.3.1.$$

- za aerator sa pragom bez rampe ( $\bar{\theta} = 0$ )

$$\lambda_{\max} = (2T \cdot \cos^{-1} \alpha) \cdot Fr + T \cdot tg \alpha \quad 4.3.2.$$

Za drugi slučaj (razvijeni tok) jednačine su:

- za aerator sa pragom i rampom

$$\lambda_{\max} = \bar{\theta} \cdot Fr^2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{2T \cdot \cos \alpha}{(\bar{\theta} \cdot Fr)^2}} \right] \quad 4.3.3$$

U jednačinama 4.3.1 i 4.3.3 koristi se aproksimacija  $\sin \theta = \theta$

- za aerator sa pragom bez rampe ( $\bar{\theta} = 0$ )

$$\lambda_{\max} = Fr \cdot \left( \frac{2T}{\cos \alpha} \right)^{1/2} \quad 4.3.4$$

U gornjim jednačinama je:

$$\lambda_{\max} = \frac{L_{\max}}{h}; T = \frac{t_R + t_S}{h}; T_R = \frac{t_R}{h}; Fr = \frac{v}{(gh)^{1/2}}$$

Oznake u gornjim jednačinama, su:  $h$  – dubina toka na kraju prilazne deonice;  $\alpha$  – ugao između dna brzotoka i horizontale;  $\theta$  – ugao između dna rampe i dna brzotoka;  $\bar{\theta}$  – modifikovana vrednost ugla  $\theta$ ;  $t_S$  – visina praga;  $t_R$  – visina rampe;  $Fr$  – Frudov broj toka na kraju prilazne deonice;  $v$  – brzina toka na kraju prilazne deonice.

Efektivni ugao odskoka  $\bar{\theta}$  može se odrediti pomoću sledeće jednačine za modifikaciju:

$$\bar{\theta} = \theta \cdot \left[ \operatorname{tghyp} \frac{T_R}{\theta} \right]^{1/2} \quad 4.3.5$$

Za dugačke aeratore u poređenju sa dubinom toka (tj. kada  $(R/t_r) \cdot \operatorname{tg} \theta \rightarrow 0$ ) i pri  $Fr > 6$ , ugao  $\bar{\theta}$  je jednak uglu rampe  $\theta$ .

Jednačine 4.3.1 i 4.3.3 pokazuju da je vrednost  $\lambda_{\max}$  za razvijajući tok (prvi slučaj) uvek veća od vrednosti  $\lambda_{\max}$  za razvijeni tok (drugi slučaj).

Empirijska jednačina za modifikaciju (smanjene) maksimalne relativne dužine skoka  $\lambda_{\max}$  pod uticajem realnog potpritiska u šupljini ima oblik (literatura [32]):

$$\lambda_j = \lambda_{\max} \cdot \left( 1 - 0.4 \cdot \sqrt{\Delta \bar{P}} \right) \quad 4.3.6$$

$$\Delta \bar{P} = \frac{\Delta \bar{p}}{\rho_w g h} = 0.43 \cdot (1 + 2\xi) \cdot \frac{v_a^2}{2gh} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \quad 4.3.7$$

U gornjim jednačinama je:  $\Delta p$  – prosečni pritisak u šupljini;  $V_a$  – dozvoljena brzina vazduha na zahvatu sistema za dovod vazduha ( $V_a = 50 \div \max 100$  m/s);  $\rho_a$  – gustina vazduha;  $\rho_w$  – gustina vode;  $\xi$  – koeficijent otpora koji, prema [36], ima sledeće vrednosti:

$\xi = 0.55$  - za vertikalno okno sa oblikovanim ulazom i sa kružnim kolenom od  $90^\circ$  na izlazu;

$\xi = 1.00$  - za vertikalno okno sa neoblikovanim ulazom i sa kružnim kolenom od  $90^\circ$  na izlazu;

$\xi = 2.00$  - za vertikalno okno sa neoblikovanim ulazom i neoblikovanim kolenom od  $90^\circ$  na izlazu.

U radu [30] je prikazana još jedna jednostavna metoda za određivanje dužine skoka. Prema ovom radu dužina skoka  $L_j$  je funkcija karakterističnog broja pritiska  $P_N = \Delta p / \rho_w g d_o$ , za zadatu geometriju aeratora ( $\alpha$ ,  $\Phi$ ,  $t_R$ ,  $t_S$ ) i karakteristika u prilaznoj deonici ( $V_o$ ,  $d_o$ ). Geometrija aeratora prikazana je na slici 10.

Dužina skoka određuje se pomoću jednačine

$$L_j = \frac{g \cdot \sin \alpha}{2} \cdot t^2 + v_o \cdot (\cos \Phi) \cdot t \quad 4.3.8$$

gde je  $t$  – dužina vremena od trenutka napuštanja aeratora do trenutka udara mlaza u dno.

Jednačine za proračun vremena su:

- za aerator sa pragom i rampom

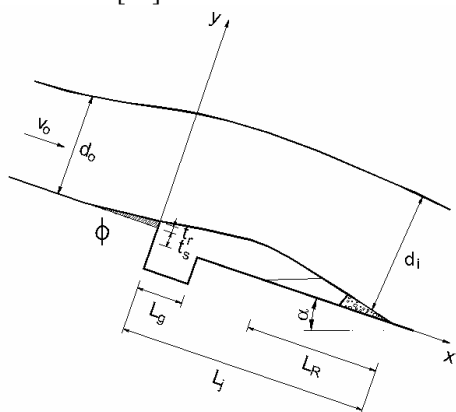
$$t = \frac{v_o \cdot \sin \Phi}{g (\cos \alpha + P_N)} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 + 2 \cdot (t_R + t_S) \cdot \frac{g \cdot (\cos \alpha + P_N)}{(v_o \cdot \sin \Phi)}} \right] \quad 4.3.9$$

- za aerator sa pragom bez rampe

$$t = \sqrt{\frac{2T_S}{g \cdot (\cos \alpha + P_N)}} \quad 4.3.10$$

Kada se potpritisk u šupljini značajno spusti, šupljina nizvodno od aeratora može da se ispunji vodom pa se prekida dovod vazduha u šupljinu. U radu [30] se analizira ovaj problem i daje rešenje za konfiguraciju aeratora prema slici 10 i slučaj kada se, pri malim Frudovim brojevima i velikim potpitisima, formira vodni valjak uzvodno od tačke udara. Do prekida dovođenja vazduha u šupljinu neće doći ako je ispunjen uslov  $L_R < (L_j - L_g)$ . Dužina skoka ( $L_j$ ) se određuje jednačinom 4.3.8, dok se širina žljeba ( $L_g$ ) određuje u

okviru analize dimenzija sistema za dovod vazduha u šupljinu. Dužina valjka  $L_R$  je funkcija ugla  $\alpha$  i karakteristika toka u tački udara ( $d_i$ ,  $F_{Ri}$ ,  $P_{Ni}$ ,  $\theta_i$ ). Jednačine za određivanje ovih karakteristika toka i dužine valjka ( $L_R$ ) pri zadanom uglu  $\alpha$ , detaljno su prikazane u radu [30].



Slika 10. Geometrija aeratora sa pragom, rampom i žljebom

(b) - Potražnja vazduha ( $q_{ai}$ )

Potražnja vazduha je količina vazduha uvučenog iz šupljine u vodni tok. Neophodnost konstantnog dovođenja vazduha iz atmosfere u šupljinu ispod mlaza uslovljava zavisnost

$$q_{ai} = Q_{ai} / W = q_{ai}$$

gde je  $Q_{ai}$  –protok vazduha ( $m^3/s$ ) kroz ulaz u sistem dovoda vazduha;  $W$  – širina brzotoka.

I pored toga što su realizovana mnoga istraživanja na modelima i izgrađenim brzotocima, još uvek nije potpuno jasan mehanizam uvlačenja vazduha pa danas još uvek nema opšte prihvaćene analitičke metode na osnovu koje bi moglo da se „a priori“ proceni potražnja vazduha [35]. Umesto toga, formiran je veći broj empirijskih zavisnosti između potražnje vazduha i nezavisnih parametara koji utiču na veličinu potražnje.

Jedna od prvih uspostavljenih empirijskih zavisnosti bila je linearna funkcija između parametra  $\beta = q_{ai}/q_w$  i bezdimenzionalne dužine odskoka. Na kraju je ustanovljeno da ova linearna veza nije generalno primenljiva.

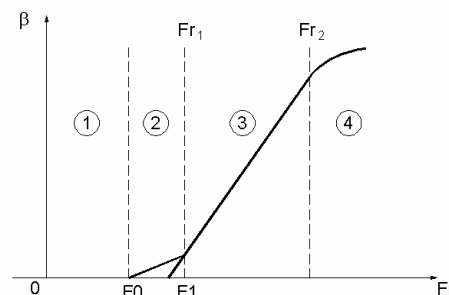
Pošto je utvrđeno da je potpritisak ispod mlaza ( $\Delta p$ ) od velikog uticaja na vrednost parametra  $\beta$ , formirana je

empirijska zavisnost tipa  $\beta = f(F_R, P_N)$ , gde je  $F_R$  – Frudov broj toka na ulazu u region ovazdušenja;  $P_N = \Delta p / \rho_w g d_0$ ;  $\Delta p$  – razlika između atmosferskog pritiska i pritiska ispod mlaza;  $d_0$  - dubina vode na kraju aeratora i  $\rho_w$  – gustina vode [29]. Iako je ovaj odnos nekompletan i ne karakteriše nijedan od fizičkih procesa, rezultati modelskih ispitivanja za konstantno  $P_N$  a različite odnose  $d_0/t_s$  ( $t_s$  je visina praga) su vrlo korisni jer pokazuju da postoje četiri karakteristična regiona na grafičkom prikazu zavisnosti  $\beta = f(F_F)$ , (slika 11). Za niske Frudove brojeve (region 1) nema uvlačenja vazduha kroz donju slobodnu površinu toka. Eksperimenti pokazuju da uvlačenje vazduha pri uranjanju mlaza u uzvodni vodni valjak počinje pri kritičnoj brzini od  $V_c = 0.8$  m/s. Prema tome, definisano je da nema uvlačenja vazduha u vodni tok kada je  $F_R < F_0 = V_c / (gd)^{1/2}$ . U regionu 2 veći deo vazduha se uvlači pri uranjanju mlaza u vodni valjak. Pri velikim brzinama vode realizuje se uvlačenje vazduha kroz donju slobodnu površinu vode, zajedno sa uvlačenjem vazduha pri uranjanju mlaza u vodni valjak ili bazen sa vodom (region 3). Za velike Frudove brojeve, u regionu 3 je dominantno uvlačenje vazduha kroz donju slobodnu površinu vode posredstvom vrtloga velikog intenziteta turbulencije koji se formiraju u blizini donje slobodne površine toka. Početak regiona 3 je dobro definisan i određen je karakterističnim Frudovim brojem  $F_{F1}$ . Odnos  $\beta = f(F_F)$ , u regionu 3 je uvek linearan i definisan je odnosom

$$\beta = K_1 \cdot (Fr - Fr_1) \tag{4.3.11}$$

Za još veće Frudove brojeve (region 4) uvlačenje vazduha je ograničeno transportnim kapacitetima toka. Odnos  $\beta = f(F_R)$  u regionu 4 nije linearan i definiisan je izrazom

$$\beta = K_2 \cdot \sqrt{Fr - Fr_2} \tag{4.3.12}$$



Slika 11. Dijagram odnosa  $\beta = f(F_R)$

Statistička obrada merenih podataka u regionu 3 pokazuje da se odnos  $\beta = f(F_R, P_N)$  može izraziti vezom

$$\beta = K_1 \cdot [Fr - f_1 - (E_1 \sqrt{P_N})] \quad 4.3.13$$

Koeficijent  $K_1$  zavisi od geometrije rampe dok su koeficijenti  $E_1$  i  $f_1$  funkcije samo od  $P_N$  i  $d/t_s$  i ne zavise od geometrije rampe i karakterističnog Frudovo broja  $F_1$ .

Na osnovu rezultata dosadašnjih istraživanja nisu mogle da se odrede univerzalne vrednosti gornjih koeficijenata koje bi se mogle primenjivati na aeratore raznih geometrija ili na aeratore istih geometrija ali postavljenih na dno brzotoka a različitim padovima. Zbog toga se vrednosti gornjih koeficijenata moraju određivati pomoću hidrauličkog modela za svaki brzotok posebno.

Nezavisna primenljiva  $P_N$  je, u radu [22], zamenjena promenljivom  $D/h$ , gde je  $D = \bar{C} A/b$ ;  $\bar{C}$  – koeficijent protoka vazduha iz odnosa  $Q_i = \bar{C} \cdot A \sqrt{2\Delta p / \rho_a}$ ;  $b$  – širina brzotoka;  $h$  – dubina vode normalna na dno. Na osnovu merenja na izgrađenim brzotocima ustanovljena je empirijska zavisnost

$$\beta = 0.29 (F_R - 1)^{0.62} (D/h)^{0.59} \quad 4.3.14$$

Gornja jednačina važi za  $4 < F_R < 21$  i  $0.028 < D/h < 3.28$

Jenačina 4.3.14 daje grubu procenu vrednosti  $\beta$  u početnoj fazi projektovanja [22].

Parametar  $\beta$  u funkciji Frudovog broja ( $F_R$ ), relativnog pritiska u šupljini ( $P_N$ ) i četiri empirijske konstante prikazan je u radu [27]. Empirijska zavisnost je oblika

$$\beta = C_1 (F_R - F_{RK})^{1.5} [1 - C_2 P_N] \quad 4.3.15$$

gde je  $F_{RK}$  – kritičan Frudov broj pri kome je  $\beta \approx 0$  i koji zavisi samo od geometrije aeratora. Koeficijenti  $C_1$  i  $C_2$  nemaju univerzalnu vrednost i određuju se pomoću hidrauličkog modela ili analogije sa izvedenim objektima.

U radu [33] je analizirana veza

$$\beta = f_1 \left[ F_R, E, \alpha, \theta, \frac{t_R}{h}, \frac{t_S}{h} \right] \quad 4.3.16$$

gde je:  $F_R = v/(gh)^{1/2}$  – Frudov broj na kraju prelaznog regiona;  $E = (v^2 \rho_w) / \Delta p$  – odnos između tercijalnih sila i sila pritiska;  $\alpha$  – ugao između dna brzotoka i

horizontale;  $t_R$  – visina rampe,  $t_S$  – visina praga;  $V$ ,  $h$  – brzina i dubina toka na kraju prilazne deonice.

Empirijski odnosi između parametara  $\beta$  i nezavisnih promenljivih formirani su na dva načina: na osnovu neposredne veze između  $\beta$  i nezavisnih promenljivih i posredne veze preko dužine skoka.

U prvom pristupu najpre je određena jednačina  $\beta/\beta_{\max} = f_2(\bullet)$ .

Odgovarajuće empirijske zavisnosti su:

$$\frac{\beta}{\beta_{\max}} = \left[ \frac{2}{\pi} \arctg(3 \cdot 10^{-3} \Delta E) \right]^{0.7} \quad 4.3.17$$

gde je  $\Delta E = E - E_{\min}$

Vrednost  $E$  je uvek zadata.  $E_{\min}$  je vrednost broja  $E$  pri  $\beta = 0$  i definisana je izrazom.

$$10^{-3} E_{\min} = \frac{1}{2.3} (tg\theta)^{1.15} \quad 4.3.18$$

Parametar  $\beta_{\max}$  zavisi od  $F_R$  i uglova  $\alpha$  i  $\theta$  a određuje se iz jednačine:

$$\beta_{\max} = (tg\theta)^{1.15} e \times b [1.15 tg\alpha^2] \cdot (F - 5.4)^\epsilon \quad 4.3.19$$

Koeficijent  $\epsilon$  zavisi od geometrije brzotoka i aeratora i može se odrediti analogijom sa izgrađenim objektima ili, što je bolje, na osnovu ispitivanja na hidrauličkom modelu. U prvim, približnim, proračunima može se koristiti vrednost  $\epsilon = 0.35$ .

U drugom, posrednom, prikazu vrednost  $\beta_{\max}$  se određuje iz odnosa  $\beta_{\max} = \varphi(\lambda_j)$  čime se izbegavaju teškoće oko određivanja vrednosti koeficijenta  $\epsilon$  u jednačini 4.3.19.

Empirijske relacije su:

- za razvijeni tok pri  $\lambda_j > 7$

$$\beta_{\max} = 0.030 (\lambda_j - 5); F_R > 6 \quad 4.3.20$$

Vrednost  $\lambda_j$  se određuje jednačinama 4.3.1, 4.3.2 i 4.3.6

- za razvijajući tok pri  $\lambda_j > 5$

$$\beta_{\max} = 0.030 \lambda_j; F_R > 6 \quad 4.3.21$$

Vrednost  $\lambda_j$  se određuje jednačinama 4.3.3, 4.3.4 i 4.3.6

Napred navedene jednačine objavljene su i u publikacijama [8] i [36].

Na osnovu merenja na modelima i u prirodi zaključeno je da u razvijenom skoku, i za  $6 \leq F_R \leq 12$ ,  $\beta_{\max}$  zavisi samo od dužine skoka  $\lambda_{\max}$  pri  $\Delta p = 0$  [32]. Dužina skoka se određuje pomoću jednačine 4.3.3.

Empirijska relacija je:

$$\beta_{\max} = \frac{0.03(\lambda_{\max} - 5)}{1 + 0.0085(F_R / \Phi)\lambda_{\max}} \quad 4.3.22$$

$$\text{gde je } \Phi = \frac{\Delta a}{bh} \left[ 0.43(1 + 2\xi) \frac{\rho_a}{\rho_w} \right]^{-1/2} \quad 4.3.23$$

U [32] su prikazana još dva interesantna empirijska odnosa:

- visina šupljine u najvišoj tački donje trajektorije, mereno od dna brzotoka

$$\frac{z_{\max}}{h} = T + \frac{\bar{\theta}^2}{\cos \alpha} F_R^2 \quad 4.3.24$$

- visina aeratora kada su istovremeno optimalni i parametar T i parametar  $\Phi$

$$T_{opt} = 15 \frac{\cos^2 \alpha}{\theta F_R^4} \quad 4.3.25$$

Iz jednačine 4.3.25 se vidi da optimalna visina aeratora značajno zavisi od Frudovog broja.

### (c) – Radna tačka aeratora

Radna tačka aeratora je tačka u koordinatnom sistemu  $(\Delta p, Q_a)$  u kojoj se seku krive potrošnje vazduha  $Q_a = Q_{ai} = f_1(\Delta p)$  i dotoka vazduha  $Q_a = Q_{ai} = f_2(\Delta p)$ .  $Q_{ai}$  ( $m^3/s$ ) je protok vazduha kroz ulaz u sistem za dovod vazduha, a  $Q_{ai}$  ( $m^3/s$ ) je ukupna potrošnja vazduha u brzotoku širine B, a  $\Delta p$  je razlika između atmosferskog pritiska i pritiska u širini ispod mlaza.

Jednačina  $Q_{ai} = f_1(\Delta p)$  je grafička predstava jednačine

$$\beta = \frac{Q_{ai}}{Bq_w} = f_1(\Delta p)$$

gde je  $q_w$  – specifičan protok vode ( $m^3/s/m$ ). Parametar  $\beta$  se određuje pomoću neke od napred navedenih jednačina za određivanje pomoću neke od napred navedenih jednačina za određivanje ovog parametra za unapred određenu vrednost parametara  $q_w$ .

Jednačina  $Q_{ai} = f_1(\Delta p)$  je grafička predstava jednačine

$$V_{ai} = \frac{Q_{ai}}{A_{ai}} = \left[ \frac{2\Delta p}{\rho_a(1+\xi)} \right]^{0.5} \quad 4.3.26$$

U gornjoj jednačini su  $V_{ai}$  i  $A_{ai}$  – brzina vazduha i proticajna površina na ulazu u horizontalni deo dovodnog sistema. Preporučuje se da brzina vazduha ( $V_{ai}$ ) bude u granicama od 50 m/s do 100 m/s.

Koordinate  $(\Delta p, Q_a)$  tačke preseka krivine  $Q_{ai} = f_1(\Delta p)$  i  $Q_{ai} = f_2(\Delta p)$ , odnosno radne tačke aeratora, nisu stalne za poznatu geometriju brzotoka i aeratora već se menjaju sa promenom specifičnog protoka vode ( $q_w$ ) u brzotoku. Promenu koordinata uslovljava kriva  $Q_{ai} = f_1(\Delta p)$  koja menja svoj položaj i oblik sa promenom vrednosti nezavisno promenljivog parametra  $q_w$ . Zavisnost položaja radne tačke, odnosno parametara  $\Delta p$  i  $Q_{ai}$ , od promenljivog specifičnog protoka vode ( $q_w$ ) mora se uzeti u obzir pri izboru geometrijskih karakteristika sistema za dovod vazduha. Cilj je da se, za sve specifične protoke vode pri kojima su moguća kavitaciona oštećenja, obezbedi potpritisak i dotok atmosferskog vazduha koji će biti uvučen u vodni tok u količini potrebnoj za zaštitu betona od kavitacione erozije. Praktično iskustvo pokazuje da će tornji uslov biti zadovoljen ako je, za sve specifične protoke od interesa, prosečni potpritisak u šupljini u granicama od 2 kPa do 8 kPa [34] a parametar  $\beta$  u granicama od 30% do 45%, ukoliko u zaštiti od kavitacione erozije učestvuje samo vazduh uvučen kroz donju slobodnu površinu odskočnog mlaza.

U napred opisanom postupku za određivanje radne tačke aeratora, koristi se prosečna vrednost potpritisaka u šupljini ( $\Delta \bar{p}$ ) koja se menja sa promenom specifičnog protoka vode ( $q_w$ ). Teoretska i eksperimentalna istraživanja su pokazala da se, za svaki konstantni specifični protok ( $q_w$ ), menja položaj radne tačke duž horizontalnog dela dovoda vazduha, odnosno da se vrednosti parametara  $\Delta p$  i  $q_{ai}$  smanjuju počev od maksimalnih vrednosti na početku horizontalnog dela dovoda. Potpritisak se smanjuje počev od maksimalnog ( $\Delta p_0$ ) na ulazu u horizontalni deo dovoda do minimalnog ( $\Delta p_B$ ) u tački B. Ova tačka je na polovini širine brzotoka ako je zahvat za vazduh na obe bočne strane brzotoka ili na kraju širine brzotoka ako je zahvat vazduha samo na jednoj bočnoj strani.

Vrednosti potpritisaka  $\Delta p_0$  i  $\Delta p_B$  mogu se lako izračunati pod sledećim pretpostavkama [34]:

- poznata je geometrija sistema za dovod vazduha tipa „vertikalno okno + horizontalni dovod“, odnosno

poznata je proticajna površina  $A_0$  na ulazu u horizontalni deo koji može da bude ili horizontalna galerija ispod aeratora ili same šupljine mlaza;

- gubitak pritiska u horizontalnom delu dovoda je zanemarljivo mali;
- proticajne površine duž horizontalnog dela su konstantne i približno su jednake površini  $A_0$ .

Gornje pretpostavke su potvrđene ispitivanjima na trodimenzionalnom modelu [34].

Pod ovim pretpostavkama vrednosti  $\Delta p_0$  i  $\Delta p_B$  su:

$$\Delta p_0 = (1 + \Sigma \xi) \frac{V_{a_0}^2 \rho_a}{2}$$

$$\Delta p_B = \Delta p_0 - \frac{V_{a_0}^2 \rho_a}{2}$$

Tipična vrednost koeficijenta gubitka je  $\Sigma \xi = 0.55$ .

Duž horizontalnog dela dovoda proporcijalno opada i specifična potražnja vazduha  $q_{a1}$  kao posledica promene vrednosti parametra  $\Delta p$ . Ova činjenica se takođe mora uzeti u obzir pri određivanju dimenzija sistema za dovod vazduha, i raspodele vazduha duž poprečnog preseka brzotoka.

Metodologija za analizu strujanja vazduha u sistemu za dovod detaljno je izložena u radu [34].

#### 4.3.2. Uvlačenje vazduha kroz gornju slobodnu površinu odskočnog mlaza

Deo uvučenog vazduha u vodni tok kroz gornju površinu odskočnog mlaza nije zanemarljiv u odnosu na ukupnu količinu vazduha sadržanog u mlazu na kraju regiona ovazdušenja i mora se odrediti na neki način.

Međutim, uticaj aeratora na količinu vazduha uvučenog kroz gornju slobodnu površinu nije istraživano u meri koja bi omogućila da se ustanove odgovarajući analitički izrazi ili formiraju eksperimentalne zavisnosti. Danas je samo kvalitativno poznato da postoji jezgro čiste vode u odskočnom mlazu dužine  $d_0 = 10 \div 15$  sa gornjom i donjom raspodelom koncentracije vazduha,  $q_a$ , počev od kraja jezgra, kriva raspodele koncentracije vazduha ima donju i gornju maksimalnu vrednost i da se količina vazduha uvučenog kroz gornju slobodnu površinu značajno povećava počev od rastojanja  $l/d_0 \approx 20$ . Smatra se da u ovoj tački počinje međusobni uticaj

mehanizama uvlačenja vazduha kroz gornju i donju slobodnu površinu toka. U gornjim izrazima je  $L$  – rastojanje mereno od kraja aeratora do  $d_0$  – ekvivalentne dubine tečne faze toka (jednačina 2.3.1) na kraju prelaznog regiona. Iz napred uloženog proizilazi da se ukupna količina i raspodela koncentracije vazduha na izlazu iz regiona ovazdušenja jedino može odrediti merenjima na hidrauličnom modelu brzotoka koji se projektuje.

Teoretska osnova za određivanje količine uvučenog vazduha na osnovu merenja na hidrauličkom modelu brzotoka prikazana je u radovima [28, 29, 31]. Postupak je primenljiv kako u podregionu sa delimičnim tako i u podregionu sa potpunim ovazdušenjem odskočnog mlaza. Parcijalni hidraulički modeli koji se koriste za ovu svrhu treba da su što krupniji. Uobičajena razmera ovih modela je 1:10 do 1:15.

#### 4.4. – Rastojanje između aeratora

Nagla dezaeracija odskočnog mlaza u regionu udara i postepena dezaeracija nizvodnog toka u regionu sa postepeno promenljivim strujanjem su procesi od bitnog uticaja pri određivanju elemenata zaštite od kavitacione erozije nizvodno od prvog aeratora. Potreba za postavljanjem jednog ili više aeratora nizvodno od prvog, odnosno rastojanje između njih, uglavnom zavisi od kvalitativnih karakteristika nagle i postepene dezaeracije vodnog toka. Međutim, do danas nisu uspostavljene analitičke ili eksperimentalne jednačine na osnovu kojih bi se mogle odrediti karakteristike oba dezaeraciona procesa. Poznata su načela, postavljena je i teoretska osnova a raspoložive su i neke empirijske zavisnosti za određivanje razmaka između aeratora ali još uvek nisu definisane analitičke metode ili empirijske zavisnosti za određivanje parametara koncentracije vazduha na početku regiona sa postepeno promenljivim strujanjem ovazdušenog toka (ovo je početni uslov u analizi strujanja toka u nizvodnom regionu koji mora biti poznat).

Rezultati dosadašnjih eksperimentalnih istraživanja na hidrauličkim modelima pokazuju sledeće:

- raspodela koncentracije vazduha iza prvog aeratora postavljenog na strmom brzotoku ( $\alpha > 20^\circ$ ) težiće ka ravnomernoj raspodeli sa prosečnom koncentracijom od 30% pri kojoj je uvek obezbeđena koncentracija na dnu od 8%; ukoliko se odgovarajućim proračunima pokaže da prosečna koncentracija vazduha u profilu u kome počinje uniformno strujanje ima vrednost od



30% ili veću, cela će dužina brzotoka nizvodno od prvog aeratora biti zaštićena od kavitacione erozije pa nije potreban dodatni nizvodni aerator sve dok je  $\alpha > 20^\circ$ ;

- kod brzotoka sa dnom u blagom padu ( $\alpha < 20^\circ$ ) gornje pravilo ne važi; u tom slučaju, mora se analizirati promena raspodele koncentracije duž toka nizvodno od prvog aeratora i u profilu u kome koncentracija vazduha u dnu padne na vrednost od 8% mora se postaviti sledeći aerator.

Iz napred iznetog sledi da se najpre mora poznavati prosečna koncentracija i raspodela vazduha na početku regiona sa postepeno promenljivim strujanjem odnosno da se mora poznavati ukupna količina vazduha uvučenog u regionu ovazdušenja i odrediti količina koja se iz ovazdušenog odskočnog mlaza vraća u atmosferu u granicama regiona udara. Kako problem dezaeracije vazduha u regionu udara do sada nema teoretsko ili eksperimentalno rešenje, parametri koncentracije vazduha na početku regiona sa postepeno promenljivim strujanjem moraju se odrediti na hidrauličkom modelu. Ovome treba dodati da ni problem određivanja ukupne količine vazduha u odskočnom mlazu na kraju regiona ovazdušenja nije rešen analitičkim metodama na zadovoljavajući način.

Prosečna koncentracija i raspodela koncentracije vazduha u svakom profilu brzotoka u regionu sa postepeno promenljivim strujanjem može se odrediti postupkom, izloženim u tački 2.5 ovog rada, ukoliko su poznati parametri koncentracije ( $\alpha^*$ ,  $Y_{90}$ ,  $\bar{C}^*$ ) na početku ovog regiona.

Sem ovog teoretski utemeljenog postupka u praksi se koristi i eksperimentalna zavisnost  $\bar{C} = \bar{C}^* - \alpha x$  gde je  $\bar{C}^*$  - prosečna koncentracija vazduha na početku regiona sa postepeno promenljivim strujanjem;  $x$  - udaljenost profila od početka ovog regiona;  $\alpha = 0.15\%$  do  $0.20\%$ .

U poslednjih nekoliko godina realizovana su obimna istraživanja na hidrauličkom modelu u laboratoriji VAW, ETH Cirihi, sa ciljem da se uspostave do sada neuspostavljeni odnosi koji opisuju dezaeracioni proces nizvodno od aeratora [37, 38]. Istraživanja su pokazala da koncentracija vazduha u vodi na kraju regiona ovazdušenja na prelazi direktno u uniformno stanje već se najpre redukuje duž toka do neke minimalne vrednosti koja zavisi od transportnog kavitacionog toka a zatim se povećava od vrednosti koju ovazdušeni tok ima u regionu uniformnog strujanja. Na osnovu ovog

zaključka predložena je i podela toka nizvodno od aeratora na regione prikazane na slici 8.

U jednačinama koje opisuju dezaeracioni proces prema literaturi [37], korišćeni su sledeći simboli:  $h_{90}$  - dubina toka do tačke sa lokalnom koncentracijom  $C = 90\%$ ;  $\bar{C}$  - prosečna koncentracija vazduha na kraju regiona ovazdušenja,  $h_{90n}$  - uniformna dubina ovazdušenog toka;  $x$  - rastojanje od kraja aeratora (verovatno se koristi samo  $x > L_j$  jer bi u protivnom došlo do nekih nelogičnosti);  $X = x/h_{90n}$ ;  $\alpha$  - ugao između dna brzotoka i horizontale;  $K_S$  ( $m^{1/3}/s$ ) - koeficijent rapavosti (obično  $80 \div 90 m^{1/3}/s$ );  $h_w$  - uniformna dubina čiste vode;  $b$  - širina brzotoka;  $F_0$ ,  $F_i$  - Frudov broj na kraju prilaznog regiona, odnosno u kritičnoj tački u kojoj turbulentni granični sloj izbija na površinu toka.

U regionu smanjenja koncentracije, prosečna koncentracija opada sa porastom rastojanja  $x$  i određuje se pomoću izraza

$$\bar{C}_\alpha = \bar{C}_0 - 0.0085(1 - \sin \alpha)X; \alpha \leq 30^\circ; X \leq 200$$

Uniformna dubina ovazdušenog toka definisana je izrazom

$$h_{90n} = \left( \frac{Q_w^2}{\sin \alpha K_s^2 b^2} \right)^{0.3}$$

Maksimalna specifična dezaeracija je

$$\left( \frac{\Delta \bar{C}_d}{\Delta x} \right)_{\max} = -0.0015(K_S / q_w)^{3/5}; 0.1 \leq \sin \alpha \leq 0.45$$

gde je  $q_w = Q_w / b$

Za procenu vrednosti  $\bar{C}_{\min}$  koristi se izraz

$$\bar{C}_{\min} = 0.015 F_{0\min}$$

gde je  $F_{0\min} = (F_0 + F_i) / 2$

Prosečna koncentracija vazduha nizvodno od kritične tačke procenjuje se pomoću izraza

$$\bar{C}_e = \bar{C}_u [tghyp(0.004X)]$$

gde je  $\bar{C}_u = \frac{1}{3}(\sin \alpha)^{0.25}$

Jednačina važi za male relativnosti tipično oko  $0.0001 \leq K_S/h_w \leq 0.0005$ .

Minimalnu koncentraciju vazduha pri dnu definiše odnos

$$\bar{C}_{b\min} = 3.6(10^{-7}) \exp(0.7F_{0\min})$$

Autori rada [37] preporučuju da drugi aerator nije potreban ako je  $\bar{C}_{\min} \geq C_{krit} = 5\%$  i  $C_{B\min} \geq C_{bkrit} = 1\%$ . Ove kritične vrednosti znatno odstupaju od prepurka u mnogim radova drugih autora. U radu [37] je iznet i stav da do sada preporučivana vrednost kritičnog kavitacionog broja ( $\sigma_{krit} = 0.25$ ) još nije definitivno potvrđena i da bi je trebalo kritički razmotriti.

#### 4.4. – Nedostajuća znanja

Evidentna je potreba da se nastave istraživanja u vezi sa uvlačenjem vazduha u regionu aeratora i dezaeracijom ovazdušenog vodnog toka. Nedostaju analitičke metode ili empirijske jednačine za procenu količina uvučenog vazduha kroz gornju slobodnu površinu toka u regionu ovazdušenja. Još uvek je nedovoljno izučen proces dezaeracije odskočnog mlaza u regionu udara a nije određen ni postupak na osnovu koga bi se, bez merenja na hidrauličkom modelu, mogli odrediti parametri toka ( $\alpha^*$ ,  $\gamma_{90}^*$ ,  $\bar{C}^*$ , raspodela koncentracije vazduha u prilaznim regionima nizvodnih aeratora na izbor njihovih geometrijskih karakteristika, na količinu ukupno uvučenog vazduha, na dezaeracione procese i na karakteristike toka na početku nizvodnih regiona sa postepeno promenljivim strujanjem ovazdušenog toka.

#### LITERATURA

- [1] Burgiser, M.F., Rutschmann, P.: Numerical Solution of viscous 2DV free surface flow: Flow over spillway crest, *Proc. 28<sup>th</sup> IAHR Congress*, 1999.
- [2] Olsen, N.R., Kjellesvig, H.M.: Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of spillway capacity, *Journal of Hydraulic research*, 36, Delft, 1998.
- [3] Flow-3D user manual; Excellence in flow modeling software, V.7.5, *Flow Science*, Inc., Santa Fe, N.M., 1999.
- [4] Straub, L.G., Anderson, A.G.: Self-aerated Flow in Open Channels, *Journal of Hydraulic Div. ASCE*, No. 7, 1958.
- [5] Falvey, H.T.: Air-water Flow in Hydraulic Structures, *USDI Engineering Monograph*, No.41, 1980.
- [6] Wood, I.R.: Free surface air entrainment on spillway, *IAHR Hydraulic structures design manual* No.4, A.A. Balkema, 1991.
- [7] Chanson, H.: Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows, *Academic Press*, London, 1997.
- [8] Wischer, D.L., Hager, W.H.: *Dam hydraulics*, John Wiley & Sons, 1998.
- [9] Spillways, Shockwaves and air entrainment – Review and recommendations, *ICOLD Bulletin* No.81, 1992
- [10] Kramer K. i drugi: Development of mean air concentration on chute flow, *Saopstanja sa 30-og IAHR Kongresa*, 2003.
- [11] Chanson, H.: Air bubble entrainment in open channels: Flow structure a bubble size distributions, *International Journal Multiphase Flow*, Vol. 23, No.1, 1997.
- [12] Afshar, N.R. i dr.: Air concentration distribution in self-aerated flow, *Journal of Hydraulic research*, 32, 1994.
- [13] Acker, P, Priestley, S.J.: Self-aerated flow down a chute spillway, *II International Conference on the Hydraulics of Floods and Flood Control*, Cambridge, 1985.
- [14] Hager, W.H.: Uniform aerated chute Flow, *Journal of Hydraulic Div., ASCE*, No.4, 1991.
- [15] Chanson, H.: Flow downstream of an aerator spacing, *Journal of Hydraulic research*, No.4, 1989.
- [16] Chanson, H.: Self-Aerated Flows on Chutes and spillways, *Journal of Hydraulic engineering*, Vol. 119, No.2, 1993.
- [17] Chanson, H.: Drag reduction in open channel flow by aeration and suspended load, *Journal of Hydraulic research*, Vol.32, No.1, 1993.
- [18] Chanson, H.: Air bubble diffusion in supercritical open channel flows, *XXII Australian Fluid Mechanics Conference*, Sydney, 1995.
- [19] Chanson, H.: Self-aeration on chute and steeped spillways; Air entrainment and flow aeration in open channel flows, *Internet publikacija*, 2004.

- [20] Falvey, H.T.: Cavitation in chute and spillways, USDI, *Engineering Monograph*, No.42, 1990.
- [21] Hamilton, W.S.: Preventing cavitation damage to hydraulic structures, *Water Power and Dam Construction*, nov. 1983 - jan. 1984.
- [22] Pinto, N.L. de S.: Cavitation and aeration, *Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation*, Chap. 20, New York, 1988.
- [23] Pinto, N.L. de S.: Deterioration of spillways and outlet works, *XVIII ICOLD Congress*, Durban, 1994.
- [24] Meng – Xi, Nie: Cavitation Prevention with Roughened Surface, *Journal of Hydraulic engineering*, Vol. 127, No. 10, 2001.
- [25] Volkart P., Charvet, A.: Air slots for Flow Aeration, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, No. 66, Zurich, 1983.
- [26] Wood, I.R.: Aerators – the interaction of nappe and duct air entrainment, *The International Symposium on hydraulic for high dams*, Beijing, 1988.
- [27] Aerators on spillway, *IAHR Hydraulic structure design manual*, No.4, A.A. Balkema, 1991.
- [28] Chanson, H.: Study of air entrainment and aeration devices, *Journal of Hydraulic research*, Vol.27, No.3, 1989.
- [29] Chanson, H.: Model study of spillway aeration device, *IAHR Symposium 1990*, Belgrade, Yugoslavia, 1990.
- [30] Chanson, H.: Predicting the filling of ventilated cavities behind spillway aerators, *Journal of Hydraulic research*, Vol.33, No.3, 1995.
- [31] Chanson, H.: Aeration of a free jet above a spillway, *Journal of Hydraulic research*, Vol.29, No.5, 1991.
- [32] Rutschmann, P., Hager, W.H.: Design and performance of spillway chute aerators, *Water Power and Dam Construction*, 1990.
- [33] Rutschmann, P., Hager, W.H.: Air entrainment by spillway aerators, *Journal of Hydraulic research*, Vol.116, No.6, 1990.
- [34] Koschitzky, H.P.: Dimensionierung von Schubrinnenbelüftern, *Wasserwirtschaft*, 78, 1998.
- [35] Gaskin, S., Aubel, T., Holder, G.: Air demand for a ramp-offset aerator as a function of spillway slope, ramp angle and froude number, *XXX IAHR Congress*, Thessaloniki, Greece, 2003.
- [36] Khaturia, R.M.: *Hydraulics of spillways and energy dissipators*, Marcel Dekker, New York, 2005.
- [37] Kramer, K., Minor, H.E., Hager, W.H.: Spacing of chute aerators for cavitation protection, *Hydropower and Dam*, Issue Four, 2005.
- [38] Kramer, K.: Bottom air concentration of aerated chutes, *XXX IAHR Congress*, Thessaloniki, Greece, 2003.

REVIEW AND APPLICATION OF STATE-OF-THE-ART HYDRAULIC INVESTIGATIONS FOR THE  
DESIGN OF SPILLWAYS OF LARGE DAMS

by

Živodar ERČIĆ, C.E.  
Energoprojekt, Beograd

Summary

Hydraulic problems encountered in designing spillways for large dams are shortly described. The phenomena considered are: cavitation and protection against cavitation erosion, self-aeration of flowing water and erosion of river bed downstream of large dams. Attention is directed especially to the impact of the free falling jet on the river bottom. More in detail are

considered the influences of such phenomena on the shape and dimensions of stepped spillways and the associated energy dissipation. Relevant outcomes of up to date research into these phenomena are described.

Key words: cavitation, aeration, energy dissipation, stepped spillways

Redigovano 04.12.2005.