

Primljen / Received: 29.10.2015.

Ispravljen / Corrected: 20.9.2017.

Prihvaćen / Accepted: 2.7.2018.

Dostupno online / Available online: 10.10.2018.

Analiza fizikalnog modela za ocjenu utjecaja mlaza na ispiranje nanosa

Autori:



Doktorand **Ahmad Abdipour**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Islamic Azad
Građevinski fakultet
Teheran, Iran
A.abdipour84@gmail.com



Doc.dr.sc. **Hassan Ahmadi**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Islamic Azad
Građevinski fakultet,
Roudehen, Iran
Hgahmadi@riau.ac.ir



Doc.dr.sc. **Seyed Abbas Hoseyni**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Islamic Azad
Građevinski fakultet
Teheran, Iran
abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

Stručni rad

Ahmad Abdipour, Hassan Ahmadi, Seyed Abbas Hoseyni

Analiza fizikalnog modela za ocjenu utjecaja mlaza na ispiranje nanosa

Ispiranje pod tlakom jedna je od metoda koje se primjenjuju za uklanjanje nanosa iz akumulacija. U ovom se istraživanju koriste uronjeni mlazovi u zoni ispred brane. Na fizikalnom modelu istražen je utjecaj karakteristika mlaza (promjer mlaznice, brzina mlaza i protok) i izlaznih parametara akumulacije (razina i protok temeljnog ispusta) na ispiranje sedimenta. Učinkovitost mlazova određena je uspoređivanjem ispiranja nanosa pod raznim uvjetima: jednom uz korištenje mlazova i jednom bez njih. Učinkovitost ispiranja nanosa varirala je od 0,9 do 3,1 kod ispitivanja s mlazom, te između 0,1 i 0,3 za kontrolna ispitivanja (bez mlaza).

Ključne riječi:

ispiranje pod tlakom, fizikalni model, uklanjanje nanosa, brzina mlaza, promjer mlaznice

Professional paper

Ahmad Abdipour, Hassan Ahmadi, Seyed Abbas Hoseyni

Physical model study for evaluation of jet impact on sediment flushing

Pressure flushing is one of the methods that are used for removing sediments from reservoirs. In this research, submerged jets were used in front of the dam. A physical model was developed to study the influence of jet characteristics (nozzle diameter, jet velocity, and jet discharge) and reservoir output parameters (bottom outlet level and discharge) on the sediment release. The efficiency of the jets was established by comparing the sediment scour obtained under different conditions: once with jets and once without jets. The sediment scouring efficiency ranged between 0.9 and 3.1 for jet experiments, and between 0.1 and 0.3 for reference tests (without jets).

Key words:

pressure flushing, physical model, sediment scouring, jet velocity, nozzle diameter

Fachbericht

Ahmad Abdipour, Hassan Ahmadi, Seyed Abbas Hoseyni

Physikalische Modellanalyse für die Bewertung des Einflusses des Strahls auf die Auswaschung von Ablagerungen

Das Auswaschen unter Druck ist eine Methode, die bei der Beseitigung von Ablagerungen aus der Akkumulation angewendet wird. In dieser Untersuchung werden eingetauchte Strahlen in der Zone vor dem Damm verwendet. Am physikalischen Modell wurden der Einfluss der Strahleigenschaften (Durchmesser des Strahls, Geschwindigkeit des Strahls und Durchfluss) sowie die Ausgangsparameter der Akkumulation (Niveau und Durchfluss des grundlegenden Auslasses) auf die Auswaschung des Sediments untersucht. Die Wirksamkeit der Strahlen wurde durch Vergleich der Auswaschung der Ablagerung unter verschiedenen Bedingungen festgelegt: einmal durch Anwendung von Strahlen und einmal ohne diese. Die Wirksamkeit der Auswaschung der Ablagerungen variierte von 0,9 bis 3,1 bei der Untersuchung mit dem Strahl und zwischen 0,1 und 0,3 bei der Kontrolluntersuchung (ohne Strahl).

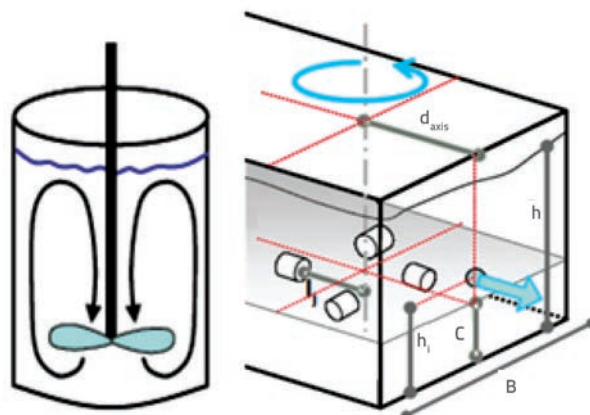
Schlüsselwörter:

Auswaschung unter Druck, physikalisches Modell, Beseitigung von Ablagerungen, Strahlgeschwindigkeit, Strahldurchmesser

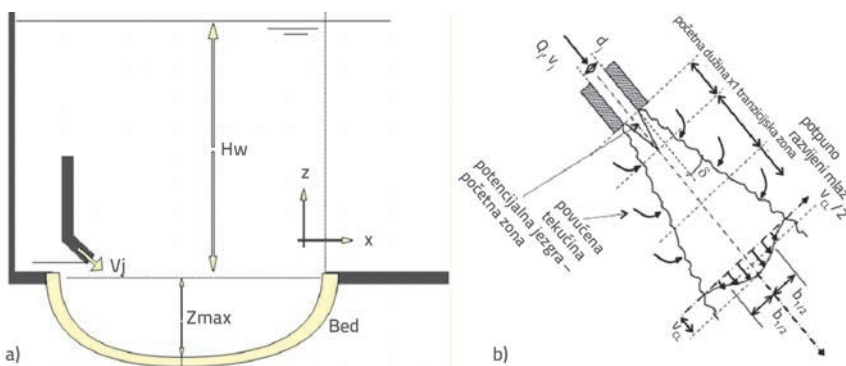
1. Uvod

Zbog taloženja nanosa, kapacitet brana u prosjeku se smanjuje za tri posto svake godine (što odgovara godišnjoj količini od 45 milijuna m³ nanosnog materijala) [1]. Za kontrolu procesa taloženja predloženo je nekoliko metoda kao što su npr. upravljanje vododijelnicama, ispiranje, hidraulično isisavanje, ispuštanje, vrtložno ispiranje i jaružanje. Prije primjene bilo koje od spomenutih metoda potrebno je potpuno razumijevanje njihovih mogućnosti i ograničenja. Na primjer, u nekim akumulacijama, primjena takvih metoda ponekad uopće nije ekonomski opravdana [2, 3]. Kod ispiranja sedimenata hidrauličkim postupkom, visina vode u akumulaciji uvijek je iznad razine otvora temeljnih ispusta; u tom slučaju, nanos koji se skuplja na uzvodnom dijelu brane odstranjuje se naglim otvaranjem temeljnih ispusta brane. Prema toj metodi, nakon što protekne određeno vrijeme ispiranja, na izlazu temeljnog ispusta stvara se stožac u obliku lijevka. Kod ispiranja nanosa pomoću vode pod tlakom, dubinu vode u akumulaciji treba maksimalno smanjiti, a vrijeme provedbe odabire se tako da, prvo, razina vode bude blizu minimalne razine i, drugo, da temeljni ispusti budu potpuno otvoreni kako bi se tijekom ispuštanja mogao koristiti čitav poprečni presjek ispusta. U skladu s gore navedenim, do sada su provedena brojna istraživanja u području ispiranja mlazom, npr. studije autora Rajaratnama i Mazureka [4], Sequeirosa i Garcie [5] te Ghodsiana i Salehija [6]. Oni su istraživali ispuštanje vode iz hidrotehničkih građevina pri čemu je voda djelovala kao mlaz i uzrokovala pojavu isprnog stošca u donjem koritu rijeke. Neki od primjera takvog djelovanja su ispiranje nizvodno od vertikalnih zapornica, preljeva s odskokom, ustava, stepenica i propusta. Mlaz vode je zapravo koncentrirani tok pri čemu se voda veće brzine ispušta u obliku mlaza u okolni fluid koji je u stanju mirovanja ili kretanja. Mlaz može biti ili nepotopljeni, kao npr. u slučaju mlaza vode koji se ispušta u zrak, ili potopljeni, što se događa kada se mlaz ispušta u istu vodu. Najznačajnije hidrodinamičke sile koje djeluju na čestice nanosa su moment mlaza, sila otpora oblika ili pomak, te sile otpora kao što je posmična sila. Osnovno načelo za primjenu uronjenog mlaza vode kao sredstva za ispiranje nanosa jest to da mlaz koji nastaje zbog utjecaja rubnih posmičnih naprezanja treba biti jači od posmične čvrstoće

koherentnog nanosa. Dakle, zamjenu momenta uzrokuje nanos i okolni medij. Kada je brzina nanosa i mlaza jednaka, nanos se postupno širi i zahvaća okolnu zonu te tako nastaje udubina. Opsežna su istraživanja provedena u području miješanja mlaza. U tom su smislu obrađeni sljedeći parametri i njihov utjecaj na vrijeme miješanja: brzina mlaza [7], promjer mlaza [8], kut mlaza i dužina mlaza [9], i višestruki mlazovi [10]. Ponašanje kretanja mlaza prema Blevinsovoj teoriji prikazano je na slici 1. [11]. Kao što se na toj slici vidi, kretanje mlaza obuhvaća tri zone: početnu zonu, prijelaznu zonu i potpuno razvijenu zonu. Početna zona sastoji se od osnovnog središnjeg toka i okolnog posmičnog sloja. Brzina središnjeg dijela jednaka je brzini na izlazu iz mlaznice (V_j) pri ravnomjernoj brzini izlaznog toka. U osnovnom središnjem toku gotovo i nema posmika, pa ga često nazivamo potencijalnim tokom ili potencijalnim središnjim tokom. Oko tog osnovnog središnjeg toka imamo turbulentni posmični sloj koji nosi naziv pomiješani sloj. Taj sloj predstavlja granicu između osnovnog središnjeg toka i fluida u akumulaciji. U prijelaznoj se zoni fluid priključuje mlazu, a u potpuno razvijenoj zoni miješanje je dovršeno te pomiješani sloj prodire u os mlaza. Brzina mlaza u središnjoj liniji smanjuje se s povećanjem udaljenosti od izlaza te s približavanjem razvijenoj zoni. Jenzer i dr. [12] proučavali su tok mlaza pomoću rotacijskog toka koji je bio uzrokovan kružnim mlazovima blatne vode na izlazu iz turbinskog ulaza (slika 2.).



Slika 2. Eksperimentalni model s rotacijskim mlazovima prema studiji Jenzera i dr. [12]



Slika 1. a) Ispirni stožac induciran uronjenim mlazom; b) Ponašanje toka mlaza prema Blevinsovoj teoriji

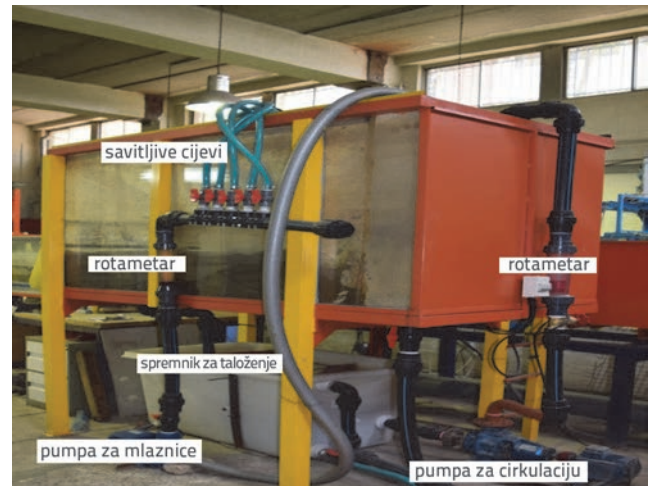
Autori su zaključili da se kod primjene mlazova učinkovitost povećava za 1,5 do 2 puta u usporedbi s kontrolnim tokom bez mlazova. U njihovoj su studiji korišteni uzlazni ili horizontalni mlazovi. U ovom se istraživanju prvi put koriste uronjeni mlazovi usmjereni prema dolje kako bi se povećala učinkovitost ispiranja nanosa i njegovo odstranjivanje iz akumulacije. Za metodu s mlazovima nisu potrebni složeni sustavi, a njena praktična primjena je jednostavna. Osim toga,

metoda je i ekonomična jer nema troškova koji bi nastali zbog nanosa materijala do brana hidroelektrana, zbog ulaska nanosa u turbinske tunele te zbog oštećenja turbina i opreme. Osim toga, njenom primjenom povećava se i kapacitet akumulacije. Ova je metoda pogodna za brane koje su već u fazi uporabe te gdje je već zabilježena pojava nanosa. Međutim, metoda bi se mogla primijeniti i na novim projektima uz određene izmjene, te bi u takvim slučajevima mlazovi mogli sprečavati pojavu nanosa. Rezultati ovog istraživanja postignuti su u eksperimentalnim uvjetima.

2. Postavke eksperimenta

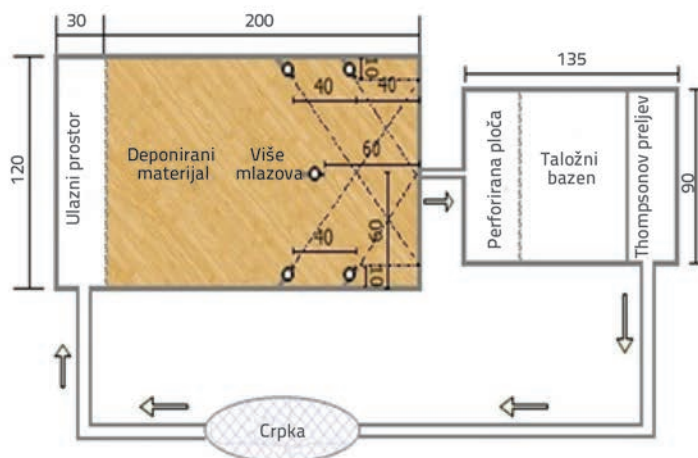
Za potrebe ispitivanja, izrađen je fizikalni model duljine 2,3 m, širine 1,2 m i visine 1,2 m. Kao što se vidi na slikama 3. i 4., model se sastoji od tri osnovna dijela: ulazne zone (ili zona raspršivanja toka), glavnog spremnika i taložnog bazena. Granulometrijske karakteristike materijala posteljice spremnika su: $d_{50} = 0,22$ mm, $d_{84} = 0,28$ mm, $d_{16} = 0,17$ mm i $\sigma = (d_{84}/d_{16})^{0,5} = 1,28$, gdje je d_x karakteristični promjer za koji je x% materijala sitnije granulacije. Eksperimenti su provedeni za dva različita slučaja: eksperiment s mlazovima i kontrolni eksperiment (bez mlazova). Dovod vode osiguran je pomoću crpke, a kontinuiran tok vode održavan je podešavanjem ventila na cijevima. Izlaz promjera 5,08 cm nalazi se na sredini prednje stijenke, a može se postaviti na dvije razine: $H_1 = 0,15$ m i $H_2 = 0,30$ m. Protok kroz izlaz Q_{out} varirao je od 1 do 4 L/s. Protok je kontroliran pomoću ventila, a stanje je praćeno pomoću užlijebljene preljevne ploče koja se nalazi na izlazu iz bazena. Voda se pri protoku Q_j jednako dijeli na pet mlazova, što se mjeri pomoću rotametara. Eksperimentalna ispitivanja provedena su variranjem ukupnog protoka Q_j u rasponu od 0,2 L/s do 2,2 L/s. Mlaznice su pričvršćene na donjem dijelu krutih cijevi pod kutom od $\alpha = 45^\circ$, gdje α predstavlja kut nagiba mlaznica u odnosu na horizontalnu ravninu. Položaj i promjer mlaznice može se mijenjati (4, 6 i 8 mm). Na početku eksperimenta, nakon otvaranja donjeg izlaza, nanosni materijal

izlazio je u velikoj koncentraciji, ali se tijekom vremena ta koncentracija smanjila. Eksperiment se odvijao sve dok ispirni stožac nije došao u stanje ravnoteže, tj. koncentracija nanosa bila je zanemariva na kraju eksperimenta. Uvjeti u kojima se odvijao eksperiment prikazani su u tablici 1.



Slika 3. Spretnik s dva rotametra i savitljivim i krutim cijevima kojima se voda provodi dolje prema mlaznicama

Za vrijeme trajanja eksperimenta, pokus se u određenim intervalima zaustavljao kako bi se izmjerio volumen odstranjenog nanosa. Dimenzije erozijske jame izmjerene su u statičkim uvjetima. Tijekom statičkih mjerenja, pumpe su isključene te su nakon ispuštanja iz spremnika izmjereni profili ispiranja. Nakon svakog eksperimenta, određen je profil ispiranja nanosa, a za to je korišten mjerač LASER postavljen na nosaču. Parametri koji utječu na djelotvornost mlazova su: brzina mlaza, promjer mlaza i geometrija razmještaja mlazova. Prije provedbe glavnih eksperimenata obavljani su određeni početni pokusi kako bi se postigao optimalan razmještaj mlazova. U početku je korišten samo jedan mlaz, te je na temelju visine vode u spremniku određena zona njegovog efektivnog djelovanja. Određen je

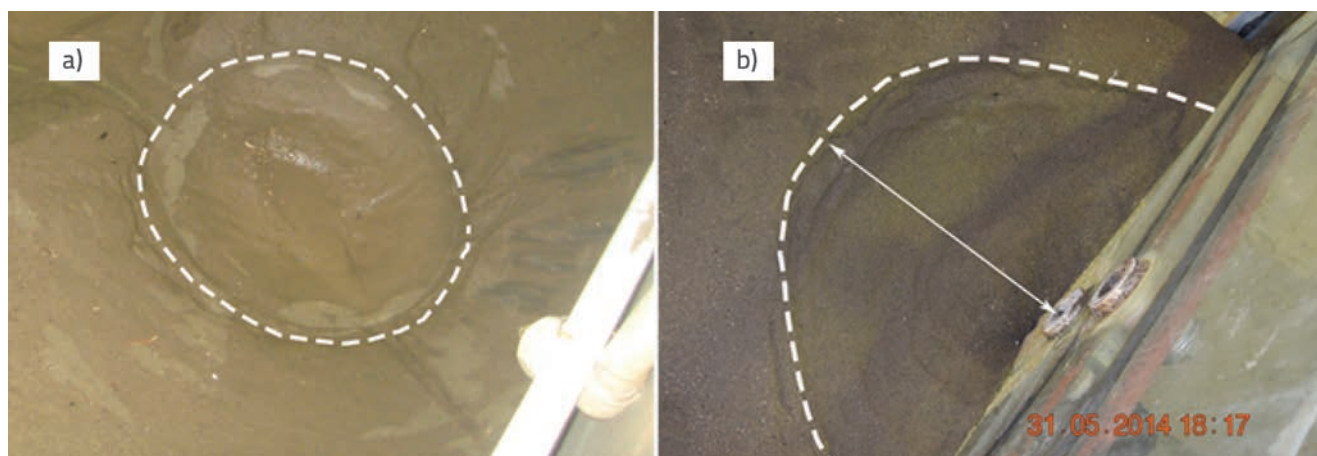


Slika 4. Prikaz postava eksperimenta s rasporedom mlaznica



Tablica 1. Eksperimentalni uvjeti za kontrolne pokuse (bez mlaznica) i pokuse s mlaznicama

Vrsta pokusa \ Uvjeti	H_s [cm]	H_w [cm]	H_{out} [cm]	Q_{out} [lit/s]	jet.N	d_j [mm]	ΣQ_j [lit/s]	Broj eksperimenata
Kontrolni pokus	30	40, 70, 100	15	1-4	-	-	-	15
Pokus s mlaznicama	30	100	15, 30	1-4	5	4, 6, 8	0,2-2,2	30
Ukupan broj eksperimenata								45



Slika 5. Pogled na erozijsku jamu: a) pokus s mlazovima; b) kontrolni pokus (bez mlazova)

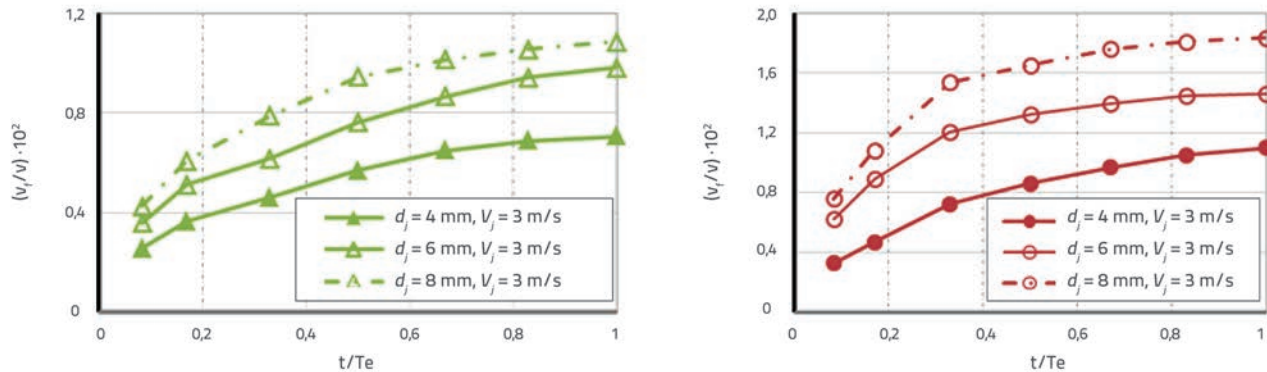
i rezultirajući tlak na mlaznicama za razne brzine i promjere (slika 5.a). Osim toga, na bazi kontrolnih eksperimenata (bez mlaza) određena je i efektivna zona temeljnog ispusta za razne protoke (slika 5.b). Bočni mlazovi potiskuju materijal u sredinu spremnika pa se tako akumuliran nanos vodi u efektivnu zonu izlaza pomoću središnjeg mlaza, nakon čega materijal izlazi usisnim djelovanjem na izlazu. U takvom rasporedu, mlazovi ne samo da ispiru i odstranjuju nanosni materijal, već ga i pokreću prema naprijed. Zato je i odabran kosi oblik i usmjerenje prema dolje. Kod vertikalnih mlazova, nanosni se materijal tjera u dubinu, ali se ne vodi prema izlazu. Za razliku od toga, u horizontalnom rasporedu mlazovi ne dolaze u kontakt s nanosom. Zbog toga su, uzimajući u obzir dimenzije postojećeg spremnika, mlaznice postavljene na način koji osigurava njihovu optimalnu učinkovitost. U ovom eksperimentu, omjer dužine i širine spremnika i veličina i gustoća materijala, usvojeni su kao konstantne veličine, pa stoga njihov utjecaj na učinkovitost ispiranja nije analiziran. Međutim, kod variranja svojstava nanosa, protoci korišteni u ovom istraživanju nemaju isti učinak na uklanjanje nanosnog materijala. Kako se nekoherentne čestice ponašaju kao pojedinačne čestice, erozija pijeska razlikuje se od erozije gline. Otpor pijeska na eroziju proizlazi iz uronjene jedinične težine, pa se tako u određivanju otpora u obzir treba uzeti veličina i gustoća zrnate sila teža. U slučaju gline, elektrokemijske sile koje vezuju čestice kontroliraju otpor gline na erozivno djelovanje. U svakom istraživanju, studije o ispiranju pijeska mlaznicama nagovještaju rezultate koji bi se mogli očekivati kada se mlazovima ispiru glinoviti materijal.

3. Rezultati i rasprava

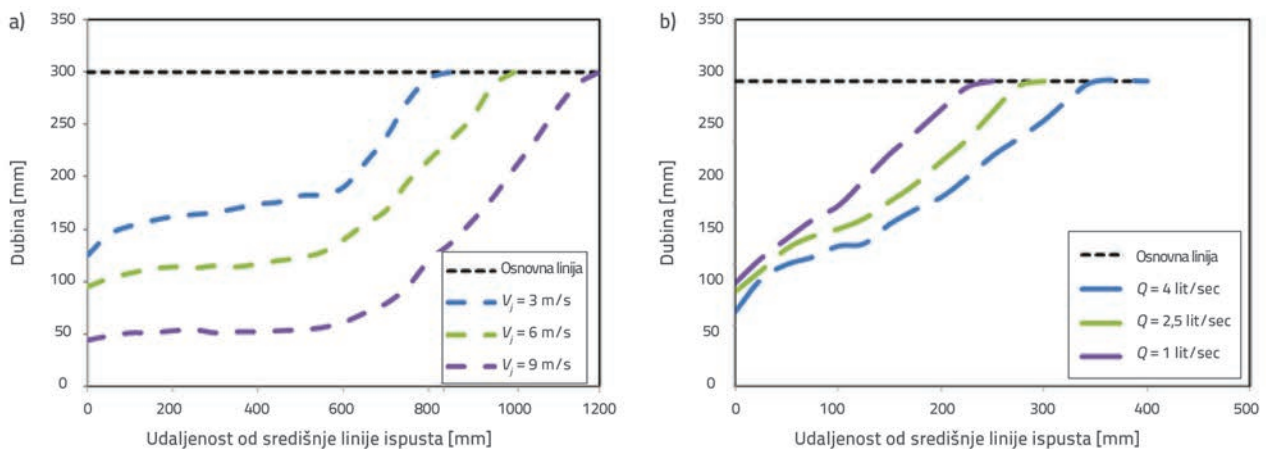
Kako bi se postigli ciljevi ovog istraživanja, usvojeno je da se varijabilni parametri toka smatraju bezdimenzijskim veličinama. Obično se koriste hidraulički modeli slobodne površine koji se temelje na Froudeovom kriteriju sličnosti. To znači da se u prototipu koriste isti odnosi za sile inercije i silu težu. Odnos volumena ispranog nanosa (V_i) i volumena ispuštene vode (V) u ravnotežnom vremenu, definira se kao učinkovitost ispiranja nanosa (eng. *sediment scouring efficiency* - SSE). U odabranim desetominutnim vremenskim intervalima pokus se zaustavlja i mjeri se materijal odstranjen iz taložnika. Vremenske varijacije rezultata SSE prikazane su na slici 6. tijekom provedbe eksperimenta uočeno je da je u početku ispiranje nanosa vrlo intenzivno, te da se on ispušta u velikoj koncentraciji. Kako vrijeme pokusa prolazi, taj trend slabi i na kraju se postiže stanje ravnoteže. Istraživači su koristili razne metode za određivanje vremena ravnoteže na otvoru za ispiranje. Day i dr. [13] navode da dimenzije erozijske jame postižu ravnotežno stanje kada varijacija dubine ispiranja nije veća od srednje veličine zrna u jednom satu tijekom eksperimenta. Kako bi se odredilo ravnotežno vrijeme tijekom eksperimenata, provedeni su dugotrajni eksperimenti (3 sata) za različite promjere i brzine mlaza. U ovom je istraživanju ravnotežno vrijeme ispiranja definirano kao vrijeme u kojem dubina ispiranja doseže 90% od dugotrajne dubine ispiranja. Profili ispiranja sedimenata (slika 7.) za brzine na mlaznici od 3 i 9 m/s prikazani su u odnosu na posteljicu spremnika (što se definira kao nulta dubina). Crtkana

linija označava početnu razinu sloja nanosa u spremniku ($H_s = 30$ mm). Kao što se vidi na slici 5., protokol MATLAB™ koji je korišten za određivanje kontakta sloja može se realno koristiti za kvantificiranje ujednačenih profila u rasponu ispitanih brzina mlaza. Općenito uzevši, iz profila bi se moglo zaključiti

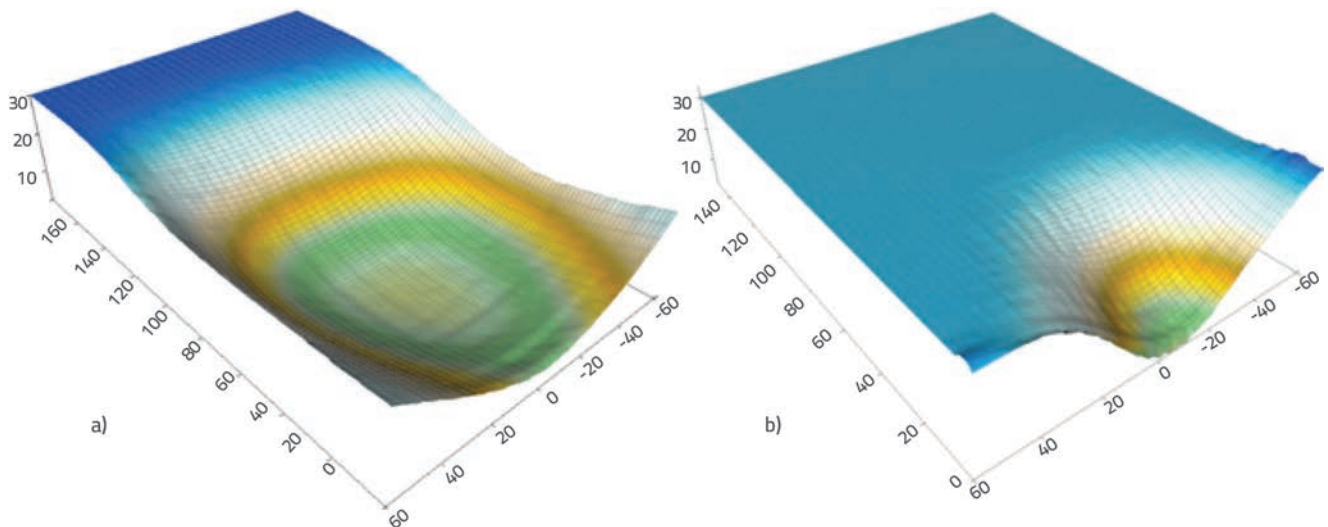
da je povećanje erozijske jame (u pogledu dubine i dužine), usporedo s povećanjem brzine mlaza, u skladu s očekivanjima za nekoherentne materijale. Ovdje do erozije dolazi kroz ravnotežu momenta jednog zrna tijekom djelovanja mlaza [14, 15]. Kako brzina mlaza raste, tako rastu i tlačne sile i bočne



Slika 6. Učinkovitost ispiranja nanosa (SSE) u funkciji vremena trajanja eksperimenata s mlazovima ($H_{out} = 30$ cm, $Q_{out} = 2,5$ l/s)



Slika 7. Usporedba uzdužnih profila ispiranja: a) eksperimenti s mlazovima; b) kontrolni eksperimenti (bez mlazova)

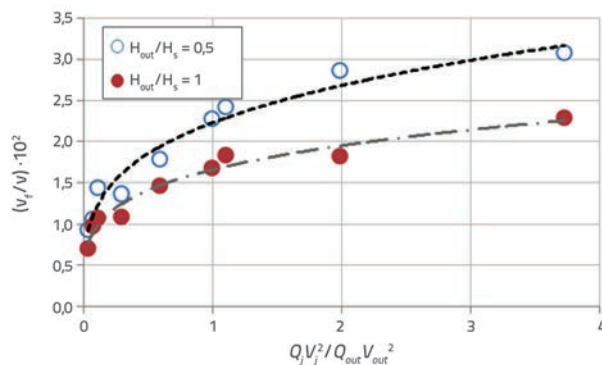


Slika 8. Trodimenzionalni prikaz ispiranja sedimanata nakon eksperimenata: a) eksperiment s mlazovima; b) kontrolni eksperiment (bez mlazova)

posmične sile. Zajedno, to dovodi ne samo do povećanja dubine i veličine ispiranja (što se moglo i očekivati), već i do povećanja maksimalne visine ispiranja. Maksimalna visina stošca ispiranja iznosila je otprilike 120 mm pri brzini mlaza od 3 m/s, tj. otprilike 250 mm pri brzini mlaza od 9 m/s. Za vrijeme kontrolnih ispitivanja (bez mlaza), ispiranje materijala bilo je ograničeno samo na izlaznu zonu dok je efekt ispiranja slabio s odmicanjem od te zone. Dužina ispirnog stošca (uzdužna udaljenost ispred temeljnog ispusta od prednje stijenke modela do konačnog proširenja ispirnog stošca) iznosila je otprilike 350 mm, a maksimalna dubina erozijske jame iznosila je otprilike 190 mm za eksperimente s maksimalnim protokom. U eksperimentima s mlazovima, dimenzije ispiranja bile su veće i obuhvaćeno je šire područje, tako da je dužina ispiranja dosegala i do 1200 mm. Trodimenzionalni profil ispiranja u zoni izlaza, dobiven pomoću programa SURFER, prikazan je na slici 8. za kontrolne eksperimente i eksperimente s mlazovima.

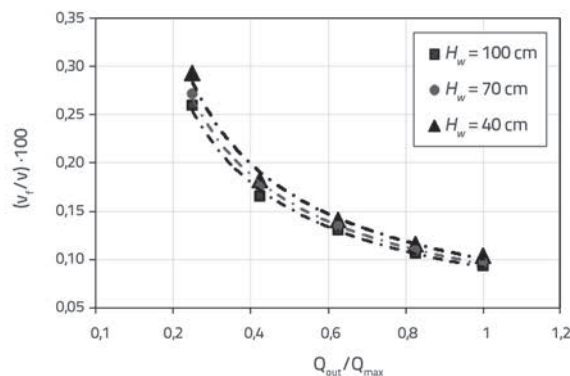
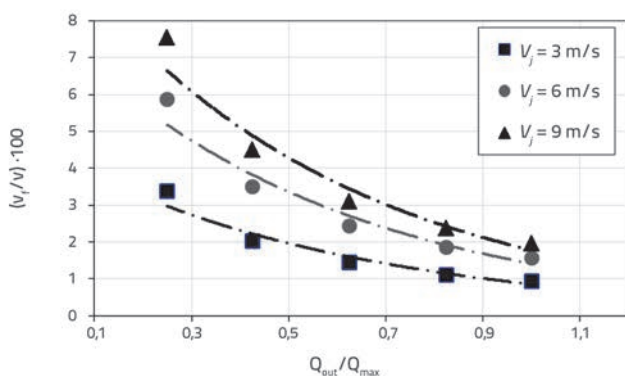
Istraživanje utjecaja promjene razine temeljnog ispusta pokazuje da se pri nižim razinama bilježi veći opseg ispiranja te uklanjanje veće količine nanosa (slika 9.). Treba, međutim, naglasiti da pretjerano taloženje nanosa dovodi do povećanja čvrstoće tog nanosa, što može predstavljati problem kod uklanjanja tog materijala. U takvim se slučajevima trebaju poduzeti dodatne mjere kako bi se olakšalo odstranjivanje nanosa, a to je povezano i s dodatnim troškovima. Također je uočeno da, kada je razina nanosa jednaka razini temeljnog ispusta ($H_s = H_{out}$), mlazovi ne samo da jače djeluju na sloj i pokreću nanosni materijal prema naprijed, oni ga do ispusta provode u lebdećem stanju pa se tako sprečava taloženje materijala. Ovisno o brzini mlaza i promjeru mlaznice, vrijednost SSE varira od 0,7 do 2,3 na razini gornjeg ispusta ($H_{out} = 30$ cm), tj. od 0,9 do 3,1 na razini donjeg ispusta ($H_{out} = 15$ cm). Utjecaj izlaznog protoka na količinu uklonjenog nanosa prikazan je na slici 10.a za eksperimente s mlazovima. Izlazni protok utječe samo na zone u blizini ispusta, dok se taj utjecaj smanjuje usporedo s povećanjem udaljenosti od ispusta. Drugim riječima, vrijednost SSE se smanjuje usporedo s povećanjem izlaznog protoka. Kod vrlo niskog izlaznog protoka (tj. kod vrijednosti nižih od 1 L/s), nanos se akumulira na otvoru ispusta, pa zapravo nema propuštanja materijala jer akumulirani nanos potpuno zatvara otvor ispusta. Dakle, kako

bi se postigla odgovarajuća djelotvornost i ostvarili željeni rezultati, potrebno je definirati raspon vrijednosti izlaznih protoka u kojima ne dolazi do velikog smanjenja kapaciteta spremnika, tj. do blokiranja ispusta. Kao što vidimo na slici 10.b, smanjenje razine vode dovodi do povećanja ispirnog stošca. To znači da kod stalnog protoka dimenzije ispirnog stošca rastu usporedo s padom djelotvornosti u ispiranju nanosa. Ako se smanji visina spremnika kako bi se održao protok, treba se povećati otvor na temeljnom ispustu, što dovodi do povećanja zone na koju djeluje radnja ispiranja nanosa, te posljedično do odstranjivanja veće količine nanosnog materijala. Kod ispiranja nanosa pod tlakom, visina razine vode u spremniku treba biti što je moguće niža kako bi se omogućilo što djelotvornije uklanjanje nanosnog materijala. Vrijednosti SSE variraju od 0,1 do 0,3 kod jednosatnog kontrolnog eksperimenta. To se u potpunosti podudara s prethodnim istraživanjima Morisa i Fana [16] te Emamgholizadeha [17].



Slika 9. Utjecaj promjene razine temeljnog ispusta na ispiranje materijala (horizontalna os je omjer izlazne snage mlaznica $Q_j V_j^2$ i izlaznog kapaciteta spremnika $Q_{out} V_{out}^2$)

Kako se smatra da se erozija materijala odvija na nekoherentan način, vrijednost erozije normalizirana je kako to predlažu Rajaratnam i dr. [18]. Ta se metoda temelji na proračunu takozvanog erozijskog parametra E_c koji je prikazan u jednadžbi 1. U stvari, tu se radi o povezivanju Froudeovog broja za čestice, gdje se brzina na vrhu mlaza (V_j) normalizira u odnosu na promjer

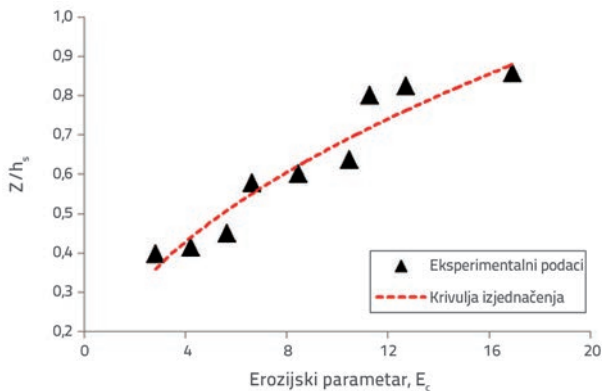


Slika 10. Učinkovitost ispiranja materijala (SSE) u funkciji izlaznog protoka: a) za eksperimente s mlazovima; b) za kontrolne eksperimente

mlaza (d) po visini mlaza (h), podijeljeno s funkcijom fluida čestica, uz uključivanje promjera čestice (D), razlike u gustoći između fluida i čestice ($\Delta\rho / \rho_f$) i gravitacijske konstante (g):

$$E_c = \frac{V_j \left(\frac{d_j}{h} \right)}{\sqrt{gD \frac{\Delta\rho}{\rho_f}}} \quad (1)$$

Potrebno je napomenuti da je u ovoj analizi kao prosječna vrijednost korišten promjer D_{90} , a ne D_{50} , jer je uočeno da je spomenuti promjer reprezentativniji s obzirom na to da veće frakcije dominiraju u eroziji sloja u nekoherentnim sustavima.



Slika 11. Odnos između varijacije maksimalne dubine ispiranja pri odstranjivanju materijala i erozijskog parametra (E_c)

Na slici 11. prikazana je usporedba maksimalne dubine ispiranja ovisno o povećanju vrijednosti E_c . Na temelju krivulje izjednačenja s podacima koji su dobiveni tijekom eksperimenata, utvrđeno je da razlika u maksimalnim dubinama ispiranja uglavnom raste usporedo s povećanjem vrijednosti E_c . Međutim, trend

promjene eksperimentalnih podataka uglavnom se podudara s krivuljom izjednačenja. Kako su se eksperimentalni uvjeti stalno mijenjali, vrijednost također je varirala u rasponu od 3 do 17. Pri niskim se brzinama uočava površinsko odvajanje sitnih čestica zbog slabog prodiranja mlaza. To je u početku poboljšano povećanjem brzine mlaza. Kada se brzina poveća iznad nekog određenog praga, izmijenjeni tok mlaza dovodi do ponovne cirkulacije čestica i fluida u zoni kontakta. To u početku dovodi do smanjenja ili stagnacije izmjerene statičke dubine sloja. Pri većim brzinama, čestice se izbacuju u veće zone ponovne cirkulacije, te se dubina ispiranja još jednom povećava.

4. Zaključak

U okviru ovog rada provedena su eksperimentalna ispitivanja na pravokutnom spremniku kako bi se odredio utjecaj uronjenog mlaza na odstranjivanje materijala u zonama oko ispusta brana. U eksperimentima s mlazovima razmatrani su utjecajni parametri kao što su brzina mlaza, promjer mlaznice, izlazni protok i razina ispusta. Rezultati su pokazali da vrijednost SSE (učinkovitost ispiranja materijala) raste s povećanjem brzine mlaza i promjera mlaznice. Analiza osjetljivosti utjecajnih parametara pokazala je da variranje brzine mlaza najviše utječe na ispiranje materijala. Kod velikih protoka, vrijednost SSE se smanjuje što dovodi do manje iskoristivosti volumena spremnika. Metoda s mlazovima može se koristiti za bilo koje količine nanosnog materijala ($H_{out}/H_s = 1$). Kod ispiranja pod tlakom nema ispiranja materijala koji se nalazi na nižoj razini ili na razini koja je jednaka razini ispusta. U ispitanim vrijednostima protoka, vrijednost SSE varirala je između 0,9 i 3,1 za eksperimente s mlazom, tj. od 0,1 do 0,3 kod kontrolnih ispitivanja. Ovaj postupak uklanjanja nanosnog materijala može se koristiti na akumulacijama s visokim dotokom vode kako bi se spriječilo gomilanje nanosa u akumulaciji brane, što se naročito odnosi na nanose ispred turbinskih ulaza.

LITERATURA

- [1] Olsen, K.W., Bassoon, G.: 1D and 2D modeling of sedimentation and flushing in shallow reservoirs. Conference proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures, Tehran, Iran, 2004.
- [2] Dimitrov, B., Zhileska Panchovska, V.: Structure of price elements for construction works on water engineering systems, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 4, pp. 363-368,
- [3] Atkinson, E.: The feasibility of flushing sediment from the reservoir, Report OD 137. (Invited speaker) World Bank, Washington D.C., 1996.
- [4] Rajaratnam, N., Mazurek, K.A.: Erosion of sand by circular impinging water jets with Small tailwater, J. Hydraulic Eng., 129 (2003) 3, pp. 225-229.
- [5] Sequeiros, O.E., Niño, Y., Garcia, M.H.: Sedimentation management in combined sewer overflow storage reservoirs using water jets, Hyd. Eng. Series No. 76, UIIU-ENG-2005-2001 Ven Te Chow Hydro systems Lab., University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA, 2005.
- [6] Mehraein, M., Ghodsian, M., Salehi Neyshaboury, S.A.A.: Local scour due to an upwards inclined circular wall jet, Proc. Ins Civil Engineers - Water Management, 164 (2011) 3, pp. 111-122.
- [7] Fossett, H., Prosser, L.E.: The application of free jets to the mixing of fluids in bulk. Proceedings of I Mechanical Engineering, pp. 224-232, 1949.
- [8] Patwardhan, A.W., Gaikwad, S.G.: Mixing in tanks agitated by jets. Chemical Engineering Research and Design, 81 (2003) 2, pp. 211-220.
- [9] Zughbi, H.D., Rakib, M.A.: Mixing in a fluid jet agitated tank: effects of jet angle and elevation and number of jets. Chemical Engineering Science, 59 (2004) 4, pp. 829-842.
- [10] Perona, J.J., Hylton, T.D., Youngblood, E.L., Cummins, R.L.: Jet mixing of liquids in long horizontal cylindrical tanks. Industrial and Engineering Chemistry Research, 37 (1998) 4, pp. 1478-1482.

- [11] Blevins, R.D.: Applied fluid dynamics handbook, Reprint edition with corrections, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1984.
- [12] Jenzer Althaus, J., Cesare, G., Schleiss, A.: Sediment Evacuation from Reservoirs through Intakes by Jet-Induced Flow, *J. Hydraul. Eng.*, 141 (2015) 2, Paper 04014078, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000970
- [13] Day, R.A., Liriano, S., White, R.W.: Effect of tailwater depth and model scale on scour at culvert outlets, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water & Maritime Engineering*, 148 (2001) 3, pp. 189-198.
- [14] Hogg, A.J., Huppert, H.E., Dade, W.B.: Erosion by planar turbulent wall jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 338 (1997), pp. 317–340.
- [15] Mazurek, K.A., Hossain, T.: Scour by jets in cohesionless and cohesive soils. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34 (2007), pp. 744-751.
- [16] Morris, G.L., Fan, J.: *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [17] Emamgholizadeh, S., Fathi-Moghdam, M.: Pressure Flushing of Cohesive Sediment in Large Dam Reservoirs, *J. Hydrol. Eng.*, 19 (2014) 4, pp. 674–681.
- [18] Aderibigbe, O.O., Rajaratnam, N.: Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets. *Journal of Hydraulic Research*, 34 (1996), pp. 19-33.