

## EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE UTICAJA PODVODNOG VERTIKALNOG MLAZA NA NEKOHERENTNU PODLOGU

Mr Biljana TRAJKOVIĆ  
IK konsalting i projektovanje, Beograd

### REZIME

Erozija podloge od nekoherentnog ili koherentnog materijala pod uticajem vodenog mlaza javlja se na ispustima kanalizacionih i drugih cevi u recipijent, nizvodno od ski odskoka brana itd. Pored navedenog negativnog uticaja, vodeni mlazevi su se pokazali efikasni pri iskopu ili zatrpavanju ili ravnanju terena za postavljanje različitih objekata na dnu mora ili reka. Eksperimentalno istraživanje erozije nekoherentnog materijala pod uticajem vertikalnog podvodnog mlaza prikazano je u ovom radu. U poređenju sa ranijim istraživanjima ovo istraživanje uključuje veće prečnike mlaznice, sitnija zrna sedimenta i manja rastojanja mlaznice od podloge. Dobijene dimenzije eroziona rupe - dinamička i statička dubina kao i prečnik rupe - analizirane su, a empirijske formule za njihovo određivanje preporučene u okviru ovog istraživanja.

**Cljučne reči:** mlaz, erozija, nekoherentni materijal, eroziona jama

### 1 UVOD

Podvodni vertikalni vodeni mlazevi pokazali su se efikasnim pri iskopu, zatrpavanju ili ravnanju terena za postavljanje različitih objekata na dnu mora, a uglavnom vezanih za potrebe naftne industrije - naftovodi, prateće zatvaračnice itd. (Trajkovic, 2001). Postojeći uređaji za generisanje vodenih mlazeva za standardne podvodne radove imaju prečnik mlaznice od 1 m i proizvede mlazeve prosečne brzine od oko 5 m/s. Uobičajeno rastojanje uređaja od morskog dna je od 4 do 10 m. Efikasno korišćenje ovakvih uređaja, svakako zavisi od mogućnosti predviđanja "odgovora" morskog dna na uticaj vodenog mlaza.

Problem erozije vertikalnim podvodnim mlazom razmatran je od brojnih istraživača. Rouse (1939),

Altinbilek i Okyay (1973) i Rajaratnam (1981) razmatrali su eroziju ravanskim mlazeva, primarno u cilju analize procesa nastanka i dimenzija erozionih jama iza hidrotehničkih objekata. Značajna, fundamentalna istraživanja mlazeva kružnog poprečnog preseka obavili su Westich i Kobus (1973), Kobus et al. (1979), Rajaratnam (1982) i Aderibigbe i Rajaratnam (1996). Navedena istraživanja su zbog kompleksnosti problema uglavnom eksperimentalnog karaktera, mada se u skorije vreme javljaju pokušaji numeričke simulacije erozionog procesa (Ushijima, 1996) .

Eksperimentalno istraživanje prikazano u ovom radu odnosi se na iskop nekoherentnog tla podvodnim vertikalnim mlazom kružnog poprečnog preseka. Ovim istraživanjima su prošireni opsezi postojećih eksperimentalnih podataka, jer su korišćeni veći prečnici mlaznice, sitnija zrna tla i manja rastojanja mlaznice od tla. Za razliku od dosadašnjih eksperimenata koji su obrađivali samo dubinu i širinu eroziona rupe, u ovim eksperimentima je izvršeno merenje kompletne geometrije.

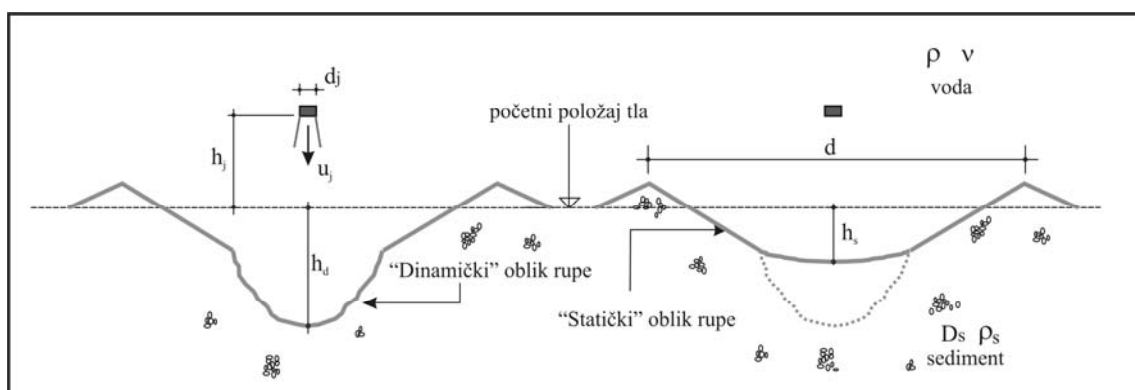
Šematski prikaz geometrije eroziona rupe dok je mlaz uključen - dinamički oblik i kada je isključen - statički oblik dat je na slici 1. Tu su takođe prikazane i veličine od kojih zavisi geometrija rupe:  $u_j$  srednja brzina mlaza na mlaznici,  $h_j$  rastojanje mlaznice od tla,  $D_s$  reprezentativni prečnik zrna nekoherentnog tla i njegova gustina  $\rho_s$ , gustina vode  $\rho$  i viskoznost vode  $\nu$ . Dok je mlaz uključen, formira se dinamički oblik rupe dubine  $h_d$  i prečnika  $d$ , sa izvesnom količinom fluidizovanog materijala koji ne uspeva da napusti rupu već unutar nje kruži. Dinamička geometrija rupe se menja sa vremenom. Kada se mlaz isključi fluidizovani materijal pada u donji deo rupe i formira se statička geometrija rupe sa dubinom  $h_s$  i sa istim prečnikom  $d$ .

Dimenzionalna analiza daje sledeću vezu između karakteristične dimenzije rupe i karakteristika mlaza, nekoherentnog materijala i fluida (vode):

$$\frac{l_c}{d_j} = f \left[ \frac{h_j}{d_j}, \text{Re}_j = \frac{u_j d_j}{\nu}, F_o = \frac{u_j}{\sqrt{g D_s (s-1)}}, \frac{D_s}{d_j}, \frac{u_j t}{d_j} \right]$$

gde je  $s = \rho_s / \rho$ , a  $F_o$  definisan kao "gustinski" Frudov broj. Reynoldsov broj mlaza  $\text{Re}_j$  je u razmatranim slučajevima u oblasti turbulentnog režima, pa se smatra

da je njegov uticaj na geometriju rupe zanemarljiv. U prethodnim istraživanjima i ostali članovi su zanemareni osim  $h_j/d_j$  i  $F_o$ , pa empirijske formule za proračun dimenzije rupe predstavljaju funkcije ova dva člana. Aderibigbe i Rajaratnam (1996), radeći sa relativno malim prečnicima mlaznice i relativno krupnim sedimentom, dimenzije rupe povezivali su sa Erozionim parametrom  $Ec = d_j/h_j * F_o$ . Oni su identifikovali dva glavna režima interakcije mlaza i nekoherentne podloge: sa slabim i sa jakim skretanjem mlaza.



Slika 1. Dinamička i statička geometrija erozije rupe

Režim sa slabim skretanjem mlaza odgovara niskim vrednostima Erozionog parametra ( $Ec < 0.35$ ) i u ovom slučaju mlaz ne prodire u tlo već skreće pod uglom bliskim 90 stepeni i odnosi materijal formirajući rupe. U ovom slučaju statički i dinamički oblik rupe su isti. U slučaju režima sa jakim skretanjem mlaza ( $Ec$  veliko), mlaz prodire u tlo i skreće pod uglom od skoro 180 stepeni. Ovakav mlaz formira jaku recirkulacionu zonu u kojoj je značajna količina sedimenta zarobljena i ne može izaći iz rupe – dinamički oblik, već se po isključenju mlaza taloži formirajući statički oblik. Aderibigbe i Rajaratnam (1996) su na osnovu prikupljenih rezultata istraživanja iz literature dali empirijsku relaciju za određivanje dimenzija statičke rupe, a za eksperimente sa  $Ec < 5$ , relativnim rastojanjem mlaznice od tla  $h_j/d_j > 8$  i relativnim prečnikom reprezentativnog zrna  $d_j/D_s < 22$ .

## 2 OPIS OBAVLJENIH EKSPERIMENATA

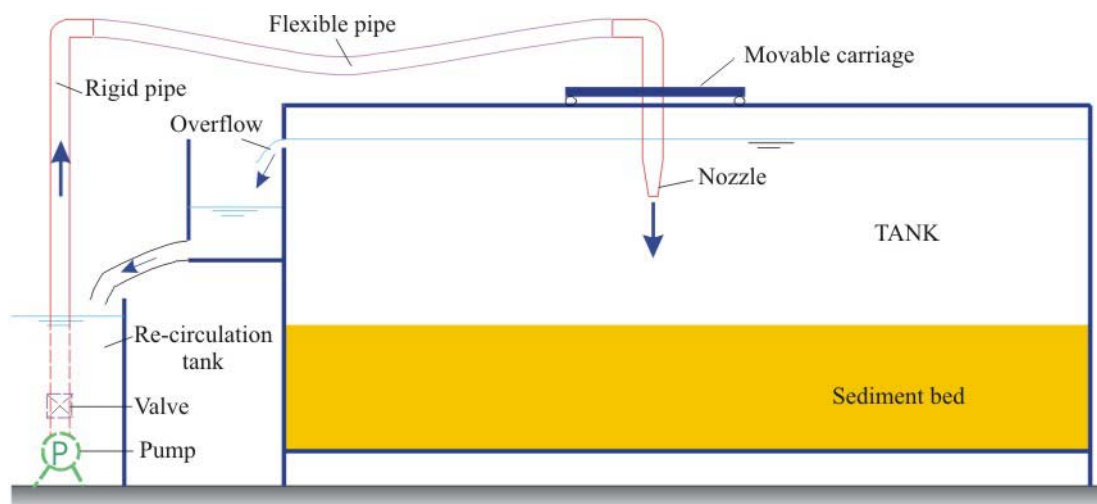
Ukupno 66 eksperimenata je obavljeno sa dva dobro graduisana peska prečnika reprezentativnog zrna  $D_{50}$  od 0.3 mm i 0.13 mm i jednog slabo graduisanog tzv. bimodalnog peska sa prečnikom  $D_{50}$  od 0.3 mm (dve izražene granulacije 0.1 mm i 0.6 mm). Korišćeni su

prečnici mlaznice od 13 mm, 30 mm, 40 mm i 50 mm, sa brzinama mlaza do 5.9 m/s. Eksperimenti su obavljemni za dva relativna rastojanja mlaznice od tla: a) malo  $h_j/d_j \approx 5$  i b) veliko  $h_j/d_j \approx 13$ . Opseg pomenutog Erozionog parametra u ovom istraživanju je bio  $1.7 \leq Ec \leq 14.9$ , što ukazuje da su svi eksperimenti bili u režimu sa jakim skretanjem mlaza. Kao rezultat korišćenja sitnijeg zrna i većih prečnika mlaznice dobijen je i širi opseg parametra  $d_j/D_s$  i to od 43 do 385.

Eksperimenti su obavljani u eksperimentalnoj instalaciji čiji je šematski prikaz dat na slici 2. Glavni deo instalacije čini rezervoar dužine 3 m, širine 1.5 m i visine 1.7 m čija je jedna stranica napravljena od pleksiglasa kako bi se obezbedila vidljivost unutrašnjosti rezervoara tokom eksperimenta. Da bi se izbeglo neravnomerno pakovanje peska u podlozi, pesak je postavljan u slojevima i sa nivoom vode uvek oko 10 cm iznad peska. Preliv na jednoj strani rezervora je omogućavao održavanje stalnog nivoa vode tokom eksperimenta. Mlaznice različitih prečnika su postavljane na vertikalnu cev fiksiranu za pokretna kolica postavljena na vrhu rezervoara. Kolica su se mogla pokretati električnim motorom konstantnom brzinom da bi se pratio uticaj pokretnog mlaza

(eksperimenti ovog tipa nisu ovde opisani). Voda je u mlaznicu dovođena pumpanjem iz recirkulacionog basena. Merenje proticaja kroz mlaznicu obavljen je

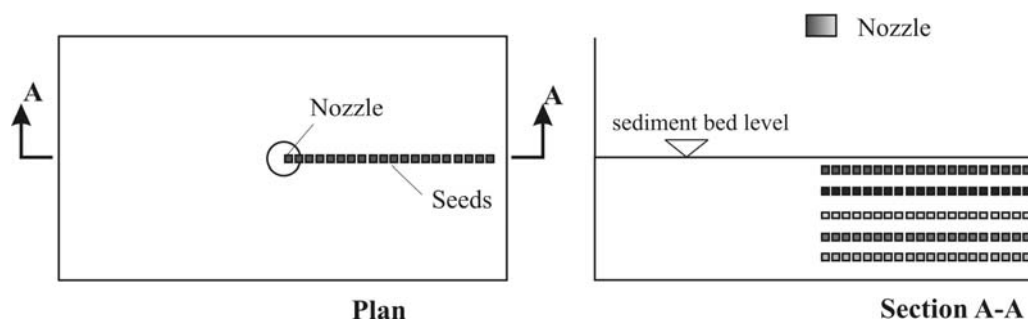
pomoću dijafragme (orifice plate), postavljene na cev koja povezuje pumpu i fleksibilno crevo (Slika 2).



Slika 2. Šematski prikaz eksperimentalne instalacije

S obzirom na osnosimetrični oblik rupe (usled korišćenja mlaznice kružnog poprečnog preseka) merenja duž jednog poluprečnika su bila dovoljna za definisanje kompletne geometrije. Dok su merenja statičke geometrije jednostavna, jer se obavljaju kada se mlaz isključi, merenje dinamičke geometrije je predstavljao poseban izazov usled velike količine materijala u fluidizovanoj zoni. Prethodni istraživači su merili samo najveću dubinu rupe "opipavanjem"

pomoću štapa. Merenje kompletne geometrije u ovom istraživanju je obavljeno postavljanjem plastičnih zrna u peskovitu podlogu i to na tačno utvrđene pozicije, pri čemu su na jednoj dubini zrna iste boje. Udarom mlaza u peskovitu podlogu zrna koja su oslobođena, s obzirom da su lakša, brzo odlaze na površinu vode. Jednostavnim brojanjem oslobođenih zrna u odgovarajućim bojama lako se rekonstruisao dinamički oblik rupe.



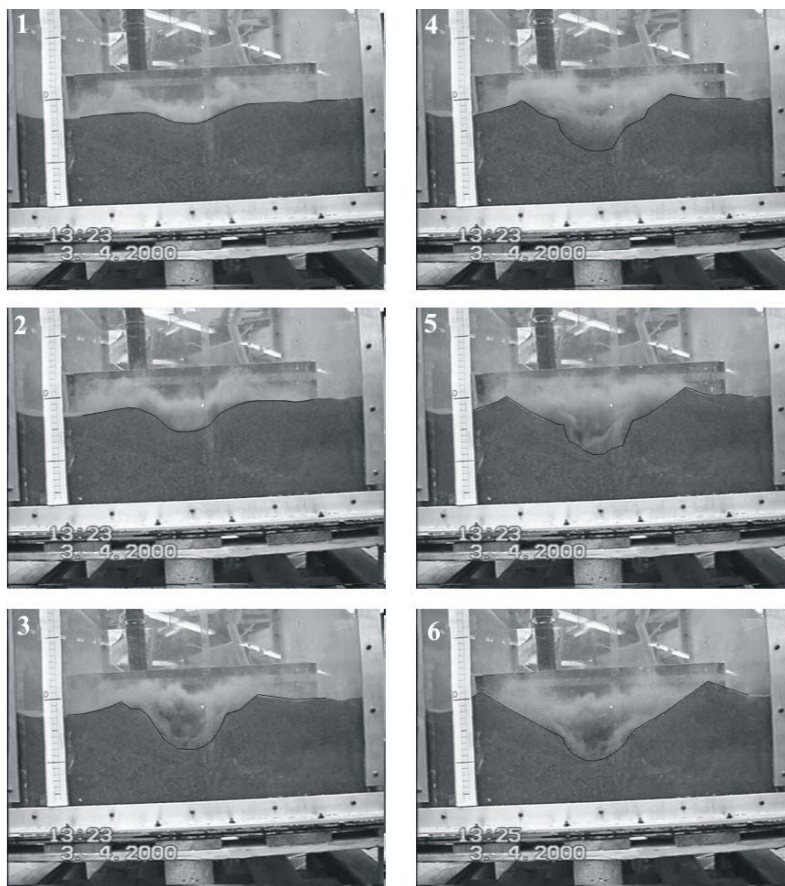
Slika 3. Skica postavljanja plastičnih obojenih zrna

Trajanje svakog eksperimenta je bilo od 3 do 5 minuta u zavisnosti od rastojanja mlaznice od peskovite podloge i brzine mlaza. Ovo trajanje odabrano je na osnovu pomoćnih eksperimenata urađenih sa mlaznicom postavljenom uz providni zid rezervoara (Slika 4).

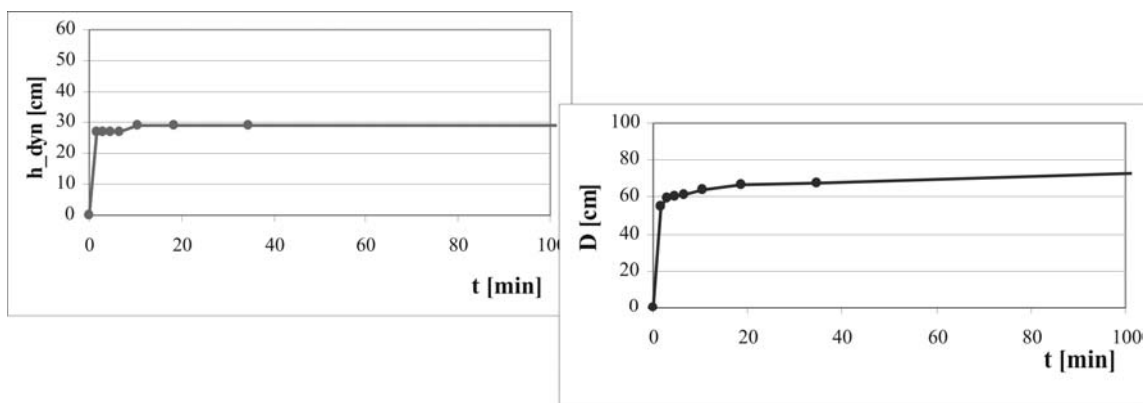
Merenjem promene dubine i prečnika rupe u ovim eksperimentima uočeno je da je proces formiranja karakterističnog oblika rupe sa fluidizovanim donjim delom relativno brz i da se od tog trenutka brzina rasta rupe značajno smanjuje. To je prikazano na Slici 5, gde

se jasno uočava da su u prvih 3 do 5 min dinamička dubina i prečnik rupe dotigli 75 do 80 % od njihove asimptotske vrednosti (posle 100 min).

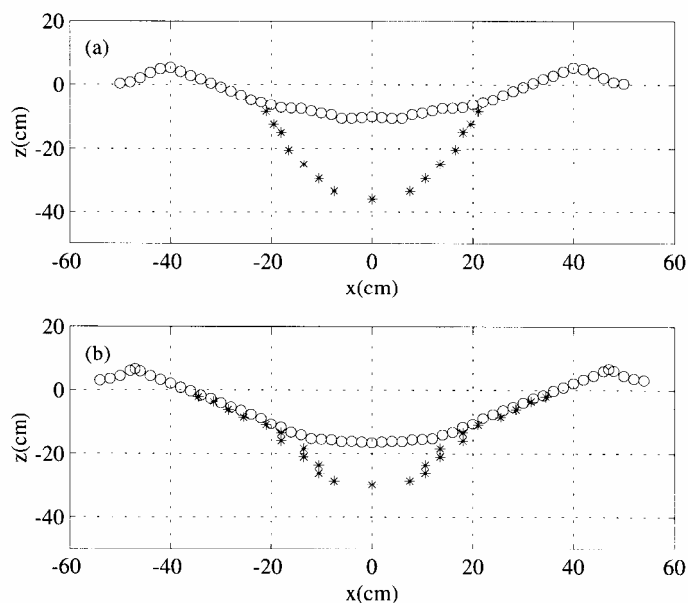
Slika 6 prikazuje dva primera dinamičkih i statičkih geometrija izmerenih pomoću plastičnih obojenih zrna.



Slika 4. Formiranje erozione rupe



Slika 5. Promena dinamičke dubine i prečnika rupe tokom vremena

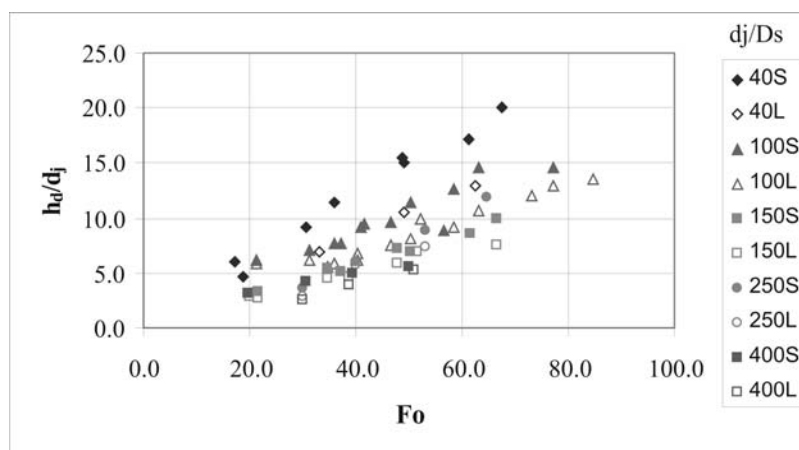


Slika 6. Primer izmerenih profila: (a) bi-modalni pesak,  $u_j=5$  m/s,  $d_j=5$  cm,  $h_j=28.5$  cm; (b) b<sub>i</sub>-modalni pesak,  $u_j=5$  m/s,  $d_j=5$  cm,  $h_j=65.0$  cm

### 3 ANALIZA REZULTATA EKSPERIMENTATA

U navedenim eksperimentima prikupljena je velika količina podataka koja je omogućila analizu mnogih važnih aspekata uticaja mlaza na nekoherentno dno. Ovde će se prikazati analiza dobijenih rezultata vezanih za tri primarne dimenzije eroziona rupe i to dinamičke dubine  $h_d$ , prečnika rupe  $d$  i statičke dubine  $h_s$ .

Rezultati dinamičke dubine su prvo prikazani u sličnom maniru kao što je to rađeno u prethodnim istraživanjima – u odnosu na  $F_0$  (Slika 7 – S je “malo” rastojanje od podloge, a L “veliko” rastojanje od podloge). Grafik pokazuje veliko rasipanje rezultata i to u zavisnosti i od relativnog rastojanja od podloge, a i od relativnog prečnika zrna  $d_j/D_s$  (što u prethodnim istraživanjima nije uočeno). U pokušaju da se navedeni rezultati racionalizuju primenjeni su različiti prilazi, a jedan je prikazan u daljem tekstu.



Slika 7. Relacija dinamičke dubine i broja  $F_0$

Prvo je zaključeno da inercijalna sila mlaza  $J$  u razmatranim slučajevima ostaje konstantna sa rastojanjem od mlaznice:

$$J = \frac{\pi}{4} \rho u_j^2 d_j^2 \quad (2)$$

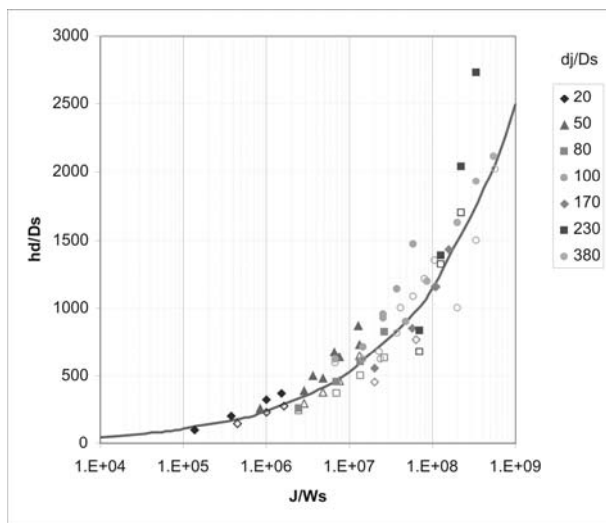
Potopljena težina zrna peska  $W_s$  je

$$W_s = \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho) g D_s^3 \quad (3)$$

Odnos inercijalne sile mlaza i potopljene težine peska može se prikazati kao

$$\frac{J}{W_s} = 1.5 \frac{u_j^2 d_j^2}{(s-1)gD_s^3} = 1.5 \left( F_o \frac{d_j}{D_s} \right)^2 \quad (4)$$

Slika 8 prikazuje relativnu dinamičku dubinu ( $h_d/D_s$ ) u relaciji sa  $J/W_s$  gde su različiti simboli korišćeni za identifikaciju približnih vrednosti  $d_j/D_s$ . Sličan grafik je nacrtan i sa identifikacijom  $d_{jb}/D_s$  ( $d_{jb}$  širina mlaza na rastojanju  $h_j$  od mlaznice), ali nije evidentirano sistematično grupisanje rezultata oko pojedinačnih vrednosti  $d_{jb}/D_s$ .



Slika 8. Relacija za dinamičku dubinu eroziona rupe

Kroz tačke na slici 8 fitovana je kriva koja je dovela do sledeće jednačine za proračun dinamičke dubine rupe:

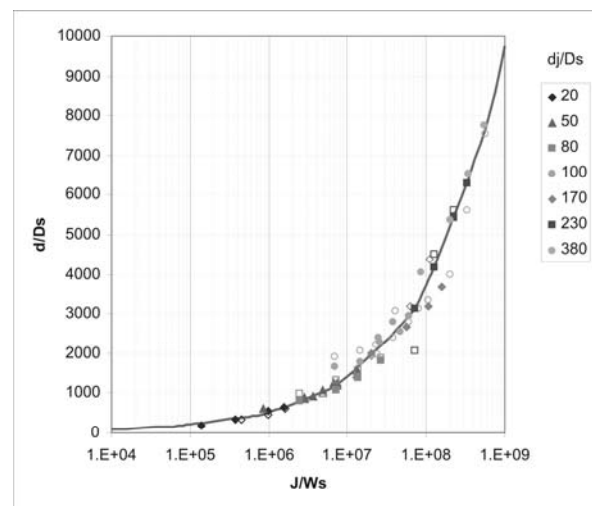
$$h_d = 2.18 \left( \frac{1.5}{(s-1)g} \right)^{0.34} (u_j d_j)^{0.68} D_s^{-0.02} \quad (5)$$

Jednačina (5) pokazuje da je zavisnost dinamičke dubine od prečnika zrna prilično mala – promena prečnika zrna sa faktorom 10 vodi promeni dinamičke dubine za samo 5%.

Prečnik rupe  $d$  se takođe može predstaviti u sličnom obliku kao i dinamička dubina. Na slici 9 prikazan je odnos  $d/D_s$  i  $J/W_s$ . Korelacija je sada čak i bolja nego u prethodnom slučaju, što ukazuje na prilično jasnu zavisnost, koja se može izraziti sledećom jednačinom

$$d = 1.62 \left( \frac{1.5}{(s-1)g} \right)^{0.42} (u_j d_j)^{0.84} D_s^{-0.26} \quad (6)$$

Jednačina 6 pokazuje da je zavisnost prečnika rupe od prečnika zrna sedimenta mnogo jače izražena nego u slučaju dinamičke dubine, jer promena prečnika zrna sa faktorom 10 vodi promeni prečnika rupe za 82 %.



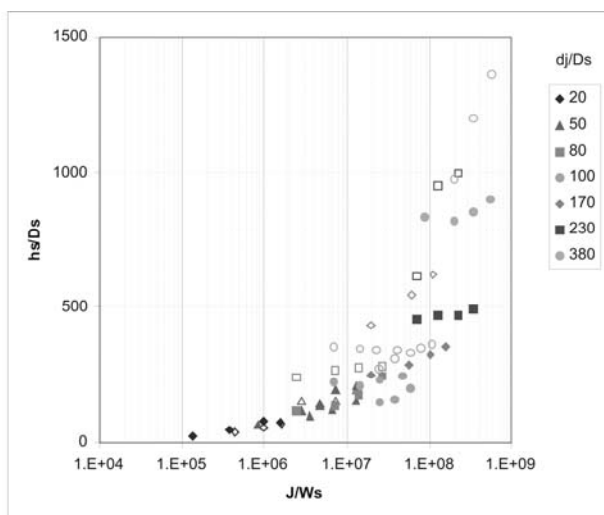
Slika 9. Relacija za prečnik eroziona rupe

Kod statičke dubine rupe korelacija između  $h_s/D_s$  i  $J/W_s$  nije tako dobra kao u prethodna dva slučaja, kao što se vidi na slici 10. U ovom slučaju rastojanje mlaznice od peskovite podloge ima značajan uticaj. Za veća rastojanja mlaznice ( $h_j$ ) dobija se veća statička dubina. Rezultati izmerene statičke dubine ( $h_s/d_j$ ) prikazani su na Slici 11 u odnosu na Erozioni parametar  $E_c$ . Na grafiku su plavim i ljubičastim markerima označeni eksperimenti sa “malim” rastojanjima mlaznice razdvojeni u dve grupacije  $d_j/D_s$  veće i manje od 100. Žutim markerom su označeni rezultati eksperimenata sa “velikim” rastojanjima mlaznice. Za “mala” rastojanja mlaznice i  $d_j/D_s > 100$ ,  $h_s/d_j$  ne zavisi od  $E_c$  i grupiše se oko vrednosti 2. Za  $d_j/D_s < 100$ ,  $h_s/d_j$  se kreće u opsegu

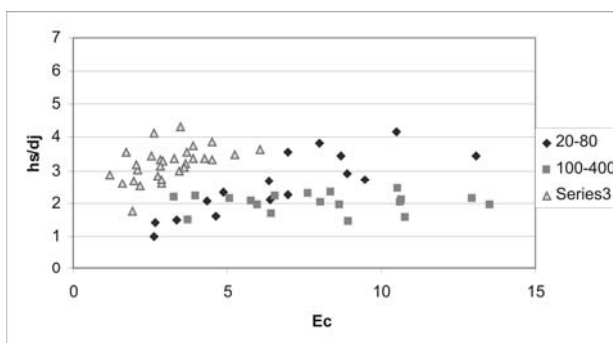
od 1 do 4 za  $E_c$  od 2.5 do 12. Na slici 12 prikazani su posebno rezultati eksperimenata sa „velikim“ rastojanjima mlaznice, razdvojeni različitim markerima u zavisnosti od  $d_j/D_s$ . Ne uočava se nikakvo sistematsko grupisanje po osnovi  $d_j/D_s$ . Na istom grafiku je prikazana relacija za konačnu vrednost statičke dubine koju su dali Aderibigbe i Rajaratnam (1996), a koja glasi:

$$h_s / h_j = 1.26 \cdot E_c^{0.11} - 1 \quad (7)$$

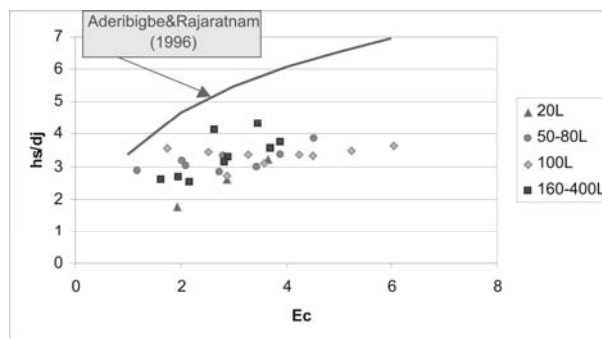
Svi eksperimentalni rezultati statičke dubine su u opsegu od 50 do 80 % od konačne vrednosti po jednačini (7), što ukazuje da se u prvih 3 do 5 minuta dostiže više od 50 % od konačne statičke dubine eroziona rupe.



Slika 10. Relacija za statičku dubinu eroziona rupe



Slika 11. Odnos statičke dubine i Erozionog parametra

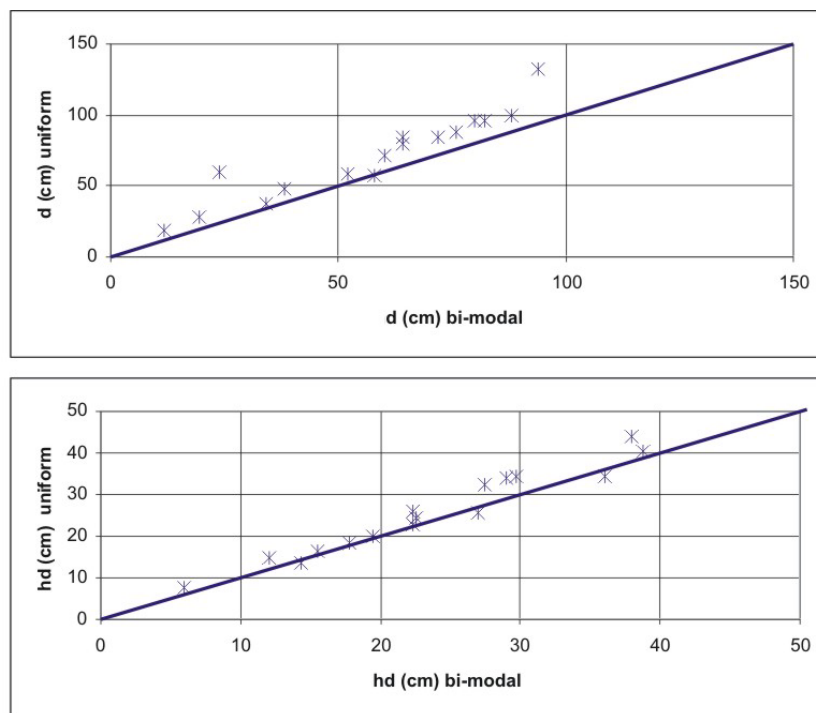


Slika 12. Odnos statičke dubine i Erozionog parametra za "velika" rastojanja mlaznice upoređeno sa empirijskom jednačinom Aderibigbe i Rajaratnam (1996)

Slika 13 prikazuje uticaj gradacije peska na prečnik i dinamičku dubinu eroziona rupe. Pokazuje se da je dinamička dubina u slučaju bi-modalnog peska nešto manja nego u slučaju uniformnog peska. Ovo se i očekivalo, jer, iako je prečnik  $D_{50} = 0.3$  mm jasno je da je veća frakcija (0.6 mm) reprezentativna i diktira dubinu. Naime dok je mlaz uključen, sitnije frakcije izlaze iz rupe, ostavljajući krupnije da formiraju geometriju. Dakle, dinamička dubina je u slučaju bi-modalnog peska nešto manja, ali ova razlika nije velika, jer i dinamička dubina ne zavisi značajno od prečnika zrna kako pokazuje jednačina (5). U slučaju prečnika eroziona rupe i ovde je prečnik manji za slučaj bi-modalnog peska gde je reprezentativna veća frakcija. Razlike su ovde izraženije, jer postoji jača zavisnost prečnika rupe od prečnika zrna, kako pokazuje jednačina (6).

#### 4 ZAVRŠNE NAPOMENE

Eksperimentima opisanim u ovom radu, značajno je proširen opseg postojećih eksperimentalnih podataka. Proširenje se odnosi na veće prečnike mlaznice, manje prečnike zrna nekoherentnog materijala i manja rastojanja mlaznice od podloge. Prethodna istraživanja pokazala su zavisnost dimenzija eroziona rupe od Erozionog parametra  $E_c$  ili gustinskog Frudovog broja  $Fo$ . Širi opseg parametara, korišćen u ovde prikazanim istraživanjima, otkrio je jaku zavisnost dimenzija eroziona rupe od odnosa prečnika mlaznice i prečnika reprezentativnog zrna ( $d_j/D_s$ ). Dalje analize pokazale su da dinamička dubina zavisi od inercijalne sile mlaza sa ne toliko jasnom zavisnošću od rastojanja mlaza i slabom zavisnošću od prečnika zrna sedimenta. Prečnik



Slika 13. Uticaj gradacije peska na prečnik erozione rupe i dinamičku dubinu

erozione rupe zavisi od inercijalne sile mlaza, a za razmatrana rastojanja mlaznice ne pokazuje praktično nikakvu zavisnost od rastojanja. Odnos statičke dubine i inercijalne sile mlaza nije tako jasan kao za prethodne dimenzije, pa je statička dubina predstavljena u zavisnosti od Erozijskog parametra. Poređenje merenja eksperimenata u uniformnom i bi-modalnom pesku pokazao je značajan uticaj veće frakcije na definisanje geometrije erozione rupe, pa se u ovom slučaju kao reprezentativno ne može usvojiti zrno  $D_{50}$ .

Date su i empirijske jednačine za proračun dinamičke dubine i prečnika rupe kao i preporuke za procenu statičke dubine.

Ukoliko se navedene jednačine žele koristiti za značajno veći prečnik mlaznice, npr 1m koliki se koristi u slučaju podvodnog iskopa morskog dna, ekstrapolacija se mora obaviti sa prilično opreza. Najbolje bi bilo napraviti testove in situ koji bi navedene relacije proverili za ove značajno veće odnose  $d_j/D_s$ .

#### Napomena

Eksperimentalno istraživanje podvodne erozije (iskopa) tla pod uticajem vertikalnog mlaza vode obavljeno je u

Hidrauličkoj laboratoriji Univerziteta u Aberdinu od septembra 1999. do avgusta 2001., a za potrebe kompanije PSL Group (Aberdin) koja već godinama koristi ovu tehniku (mlaz prečnika 1m, i brzina mlaza do 5m/s) za razne vrste iskopavanja na dnu mora. Navedeno istraživanje i analize je obavio autor ovoga rada, a pod nadzorom i uz pomoć Dr. Jim Piggins-a (PSL Group) i Dr. Tom O'Donoghue-a (University of Aberdeen).

#### LITERATURA

- [1] Aderibigbe, OO. and Rajaratnam, N. (1996), *Erosion of loose bed by submerged circular impinging vertical turbulent jets*, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.34, No.1, pp 19-33
- [2] Altinbilek, H. and Okyay, S. (1973), *Localized scour in a horizontal sand bed under vertical jets*, Proceedings IAHR Conference, Vol 1, Istanbul pp A14 1-8.
- [3] Kobus, H. et al (1979), *Flow field and scouring effects of steady and pulsating jets impinging on movable bed*, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.17, No.3, pp 175-192



- [4] O'Donoghue, T. et al (2001), *Sand bed response to submerged water jet*, ISOPE, Stavanger, Norway.
- [5] Rajaratnam, N. (1981), *Erosion by plane turbulent jets*, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.19, No.4, pp 339-359
- [6] Rajaratnam, N. (1982), *Erosion by submerged circular jets*, Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol.108, No. HY2, pp 262-267
- [7] Rouse, H. (1939), *Criteria for similarity in the transportation of sedimen*", Bulletin 20, University of Iowa, Iowa, USA, pp 33-49.
- [8] Trajkovic, B. (2001), *Sediment bed response to submerged vertical jet*, TCS Project 2769 report.
- [9] Ushijama, S. (1996), *Arbitrary Lagrangian-Eulerian Numerical Prediction for Local Scour Caused by turbulent flows*, Journal of computational physics 125.
- [10] Westrich, B. and Kobus H. (1973), *Erosion of a uniform sand bed by continuous and pulsating jets*, Proceedings of fifteenth congress of the IAHR, Istanbul, Turkey, 1973, pp A13(1-8).

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF VERTICAL JET IMPINGEMENT ON NON-COHESIVE SEDIMENT BED

by

Mr Biljana TRAJKOVIĆ  
IK Consulting Engineers, Beograd

### Summary

Sediment (cohesive or noncohesive) bed erosion is a common case in the zones of sewer and other outlets as well as downstream of spillways with ski jump bucket. Beside this negative effects, water jets are efficiently used in de-burial, burial or flattening of sediment bed for various structures on sea (or river) bottom. Experimental investigation of the non-cohesive bed erosion by submerged vertical jet is presented in this paper. The work involves larger jet diameters, finer

sediments and smaller jet distances to the bed, in comparison with previous laboratory investigations. Dimensions of the scour holes – dynamic and static depth as well as scour diameter – were analysed and empirical relations recommended within this investigation.

Key words: jet, erosion, non-cohesive bed, scour hole.

Redigovano 23.12.2006.