

NUMERIČKA SIMULACIJA HIDRAULIČKIH POSLEDICA HAVARIJA BRANA NA PEPELIŠTIMA

Miodrag JOVANOVIĆ*, Radomir KAPOR*, Dejan KOMATINA*,
Dejana ĐORĐEVIĆ*, Nenad STEFANOVIĆ*, Vojkan JANČIĆ**

*Građevinski fakultet - Beograd

**JP EPS Termoelektrane "Kostolac"

REZIME

Cilj numeričke simulacije hidrauličkih posledica havarija brana na pepelištima je da se definiše područje ugroženo plavljenjem, sagledaju mogućnosti blagovremenog upozorenja stanovništva na tom području i preduzmu odgovarajuće mere zaštite. U ovom radu se govori o specifičnostima poplavnih talasa koji nastaju kao posledica delimičnog rušenja brana-nasipa na pepelištima, kao i problemima matematičkog modeliranja te pojave. Kao ilustracija koristi se prolom nasute brane na pepelištu TE Kostolac 13.06.2002. godine. Na osnovu snimljenih geometrijskih elemenata breše formirane u trupu brane, utvrđene zapremine otekle vode i materijala, kao i tragova plavljenja, izvršena je kalibracija numeričkog modela. Ovaj model je zatim korišćen za prognozu hidrauličkih posledica eventualne slične havarije u budućim uslovima eksploatacije pepelišta, pri najvećoj projektovanoj visini brane.

Ključne reči: brane na pepelištima, rušenje brana, poplavni talasi, linijski i ravanski modeli neustaljenog tečenja

UVOD

Određivanje hidrauličkih posledica rušenja brana podrazumeva definisanje plavnog područja, maksimalnih kota nivoa i protoka na ovom području, kao i brzine prostiranja poplavnog talasa. Ti rezultati su neophodni za projektovanje sistema osmatranja i obaveštavanja (SOO) na potencijalno ugroženom području.

Procena hidrauličkih posledica rušenja brana na pepelištima nije rutinski posao iz više razloga. U svetu

ne postoji opšta metodologija za proračun formiranja i prostiranja talasa od fluidizovanog - raskvašenog pepela. Problemi se najpre javljaju u opisu načina rušenja brane i u definisanju zapremine otekle mešavine vode i pepela. Zatim, složen je i način proračuna kretanja talasa te mešavine, koja, u zavisnosti od koncentracije čvrste faze, može imati svojstva nenjutnovskog fluida. Kada se talas kreće rečnim koritom, uobičajeno je da se primenjuju linijski modeli (prostorno jednodimenzionog) neustaljenog tečenja. Ako se međutim, talas formira u ravnici, gde ne postoji jasno definisan pravac kretanja, moraju se koristiti modeli ravanskog (prostorno dvodimenzionog) tečenja, čija primena zahteva veći stepen teorijskih znanja, iskustva i vremena za pripremu ulaznih podataka, proračun i obradu rezultata.

U nastavku se prikazuju rezultati numeričke simulacije hidrauličkih posledica proloma nasute brane na pepelištu "Kostolac" 13.06.2002. godine. Ovaj primer dobro ilustruje sve teškoće izrade, kalibracije i primene numeričkih modela rušenja brana.

NUMERIČKI MODEL

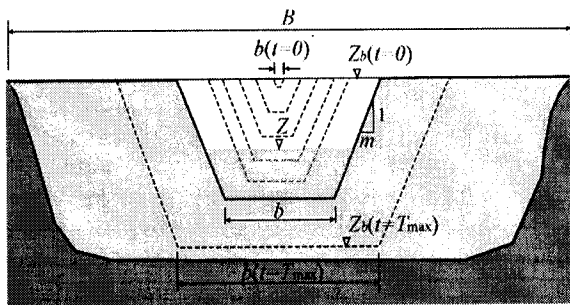
U razvoju numeričkog modela javljaju se sledeći problemi:

- definisanje načina rušenja brane/nasipa,
- procena zapremine otekle mešavine vode i pepela,
- procena koncentracije pepela u mešavini,
- izbor reološkog modela mešavine,
- numerička simulacija linijskog/ravanskog tečenja i
- kalibracija i provera računskog modela.

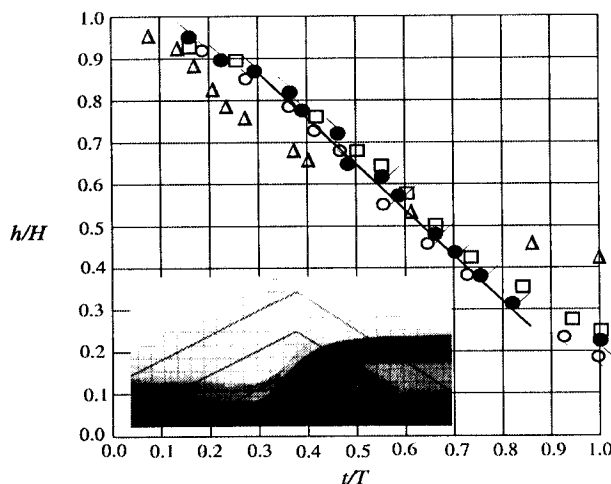
Dekompozicija modela daje tri međusobno povezane komponente: model rušenja brane, model linijskog tečenja i model ravanskog tečenja. Rezultati prve

komponente predstavljaju ulazne podatke za druge dve, koje se, u zavisnosti od topografskih uslova, mogu koristiti pojedinačno, ili u kombinaciji.

S obzirom na dužinu i konstruktivne karakteristike brana/nasipa, realno je pretpostaviti da je rušenje delimično i postepeno, uz formiranje breše u telu brane. Model se ne bavi fizikom nastanka i evolucije breše, već se prognoza izlaznog hidrograma zasniva na pretpostavljenom obliku breše (slika 1) i usvojenoj zakonitosti njenog razvoja (slika 2).



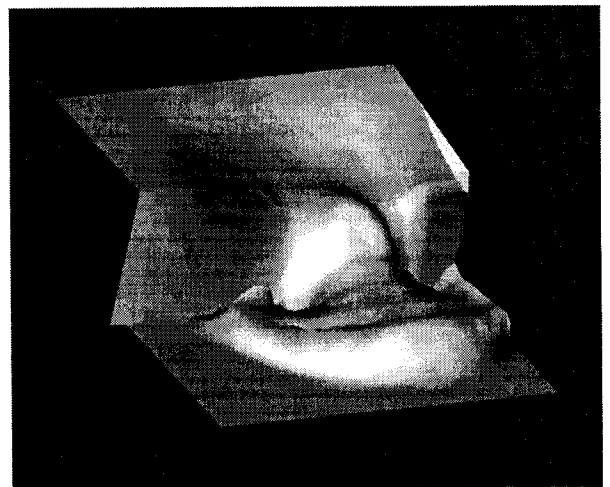
Slika 1. Shematizacija breše u telu brane; breša je trapeznog ili pravougaonog oblika. Širina breše i njena kota dna se menjaju zadatom brzinom od usvojenih početnih do krajnjih vrednosti. Isticanje kroz brešu se tretira kao prelivanje preko širokog praga [1].



Slika 2. Rezultati laboratorijskih ispitivanja prelivanja nasipa izgrađenih od homogenog, sitnog peščanog materijala sa malim učešćem gline. Erozioni proces se odvija približno konstantnom brzinom, što znači da je linearna aproksimacija zavisnosti visine nasipa od vremena (ovde prikazana u bezdimenzionom obliku), fizički prihvatljiva [2].

Pored karakteristika breše, na izlazni talas bitno utiče i kriva zapremine. Tom krivom se obuhvata zapremina vode koja se izdvaja na površini deponije u tehnološkom procesu dopremanja pepela (hidraulički transport cevima), kao i zapremina pepela odnetog iz deponije u slučaju proloma brane. Ovu zapreminu je teško unapred definisati, već se određene pretpostavke mogu načiniti na osnovu podataka o havarijama u prošlosti, kao što će biti pokazano u nastavku.

Mešavina vode i pepela koja je prilikom proloma brane otekla iz deponije predstavlja dvofazni fluid. Odnos zapremine materijala i zapremine mešavine predstavlja početnu koncentraciju čvrste faze, od koje zavisi visina i brzina kretanja poplavnog talasa. Ispitivanja tečenja dvofaznih, nenjutnovskih fluida su pokazala da se njihovo tečenje može opisati jednačinama koje važe za vodu ako je koncentracija čvrste faze do 10 %. Pri većim koncentracijama, te jednačine se moraju modifikovati uvođenjem odgovarajućih konstitutivnih zavisnosti između napona i brzine deformacije ("reološki modeli"). Ovom problemu je kod nas posvećeno više radova (na primer [3]), pa se o tome ovde neće govoriti, kao ni o modelima linijskog i ravanskog neustaljenog tečenja, kojima se bavi brojna specijalizovana literatura. Na slici 3 su ilustrovane velike mogućnosti takvih numeričkih modela.



Slika 3. Numerička simulacija isticanja kroz brešu u telu nasipa primenom metode konačnih razlika [1].

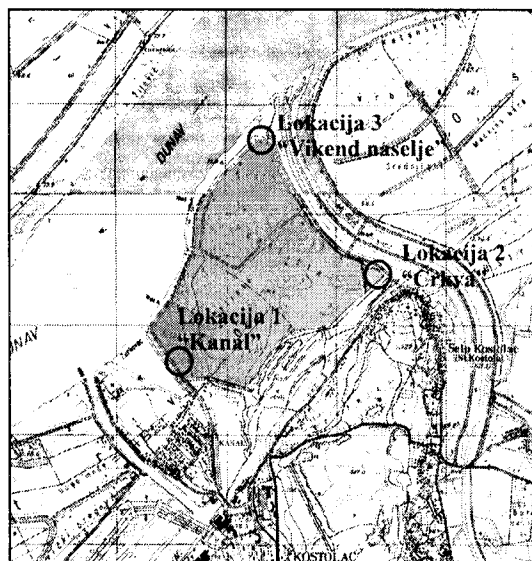
NUMERIČKA SIMULACIJA HIDRAULIČKIH POSLEDICA PROLOMA NASIPA NA PEPELIŠTU "KOSTOLAC"

Pepelište "Kostolac" nalazi se u priobalju Dunava neposredno uzvodno od ušća Mlave (slika 4). Tri kasete za odlaganje pepela zapremaju ukupnu površinu od oko

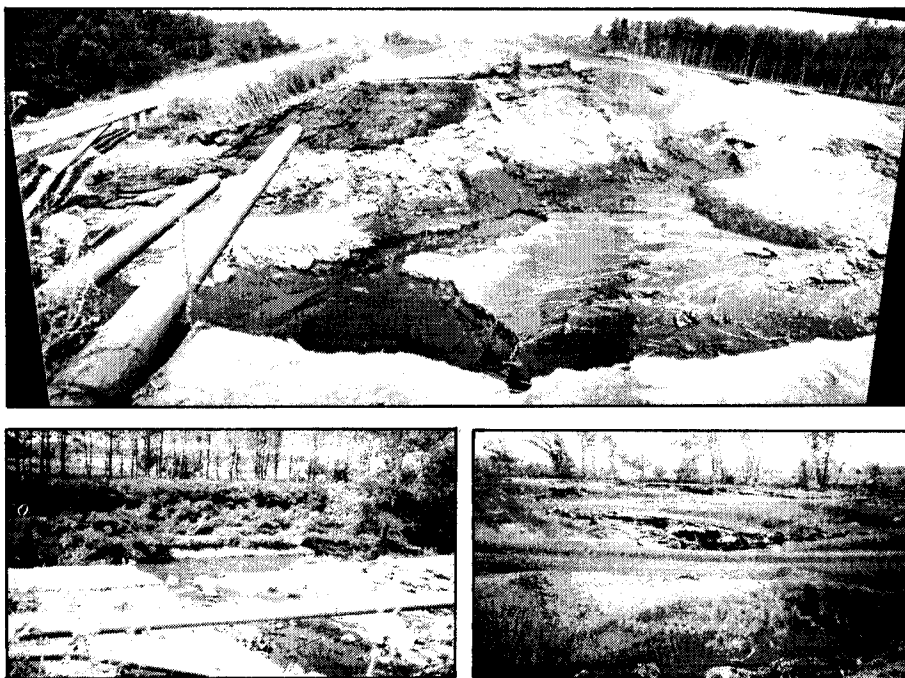
250 ha. Februara 1999. i juna 2002. godine na dve lokacije ovog pepelišta ("Kanal" i "Crkva") došlo je do delimičnog proboja nasipa (čija je visina u sadašnjim uslovima eksploatacije pepelišta oko 5 m) i isticanja mešavine vode i pepela. Ovi događaji poslužili su za kalibraciju numeričkog modela, koji je zatim korišćen za prognozu hidrauličkih posledica eventualnih sličnih havarija na istim lokacijama (kao i na lokaciji "Vikend naselje"), u konačnoj fazi eksploatacije pepelišta, pri visini nasipa od oko 23 m.

U nastavku se prikazuju rezultati za lokaciju 1 "Kanal". Snimci na slici 5 iz juna 2002. godine prikazuju posledice prelivanja i delimičnog rušenja nasipa na ovoj lokaciji.

Koristeći podatke geodetskog snimanja deponije u zoni breše, načinjen je digitalni model terena i sračunata je kriva zapremine koja obuhvata zapreminu odnetog materijala i zapreminu vode izdvojene na površini pepelišta (slika 6).



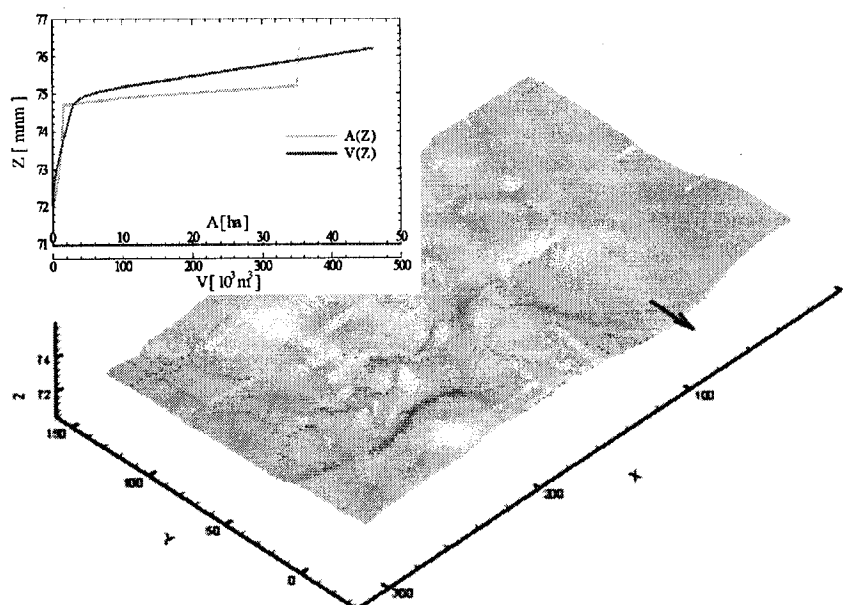
Slika 4. Položaj pepelišta "Kostolac" sa lokacijama proboja nasipa



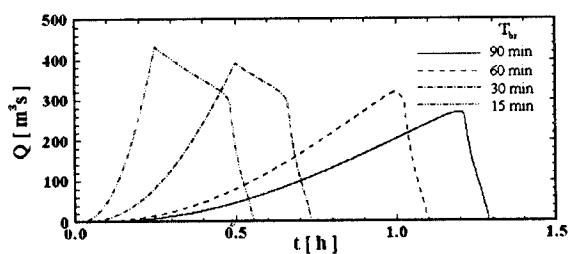
Slika 5. Prvi snimak prikazuje brešu širine 26 m, visine 5 m, kroz koju je oteklo $460\,000\text{ m}^3$ mešavine vode i pepela u kanal za odvođenje tople vode iz TE "Kostolac" (snimak dole levo). Polegla vegetacija ukazuje na najveću dubinu u kanalu. Snimak dole desno prikazuje depresiju koja je formirana odnošenjem materijala iz deponije [1].

Sa ovako određenom krivom zapremine, sračunati su hidrogrami mešavine otekle kroz brešu za pretpostavljena vremena razvoja breše od 15 do 90 min (slika 7). Maksimalnom protoku svake varijante odgovara određena maksimalna dubina/kota nivoa, u

kanalu. Poređenjem ove dubine/kote, sa tragom najveće dubine/kote koja je registrovana na terenu nakon proloma (slika 8), utvrđeno je da je prolom nasipa trajao oko 90 min.



Slika 6. Digitalni model deponije u zoni breše i odgovarajuće krive površine i zapremine



Slika 7. Računski hidrogrami otekle mešavine za različita trajanja formiranja breše

Pod pretpostavkom linearnog razvoja breše, moglo se zaključiti da se najveći protok javio 1.36 h (81 min) nakon početka rušenja i da je iznosio oko 230 m³/s. Ovom protoku je odgovarala dubina od 2.16 m i brzina isticanja od 4.5 m/s.

Na osnovu zapremine otekle vode i zapremine materijala, utvrđeno je da je u datom slučaju početna zapreminska koncentracija čvrste faze u mešavini iznosila oko 6%. To znači da je mešavina imala karakter njutnovskog fluida, da je tekla u turbulentnom režimu i da se proračun prostiranja talasa ove mešavine mogao zasnivati na rešavanju San Venanovih jednačina, bez uvođenja posebnih reoloških zavisnosti. Rezultati proračuna prikazani su na slici 9. Može se konstatovati da je poplavni talas u celosti "prihvaćen" kanalom za toplu vodu i njime odveden u Dunav. U ovom kanalu nema mogućnosti za ublaženje talasa, tako da je usputno smanjenje protoka i kota nivoa zanemarljivo.



Slika 8. Trag najveće dubine u kanalu na osnovu koga je kalibrisan računski model

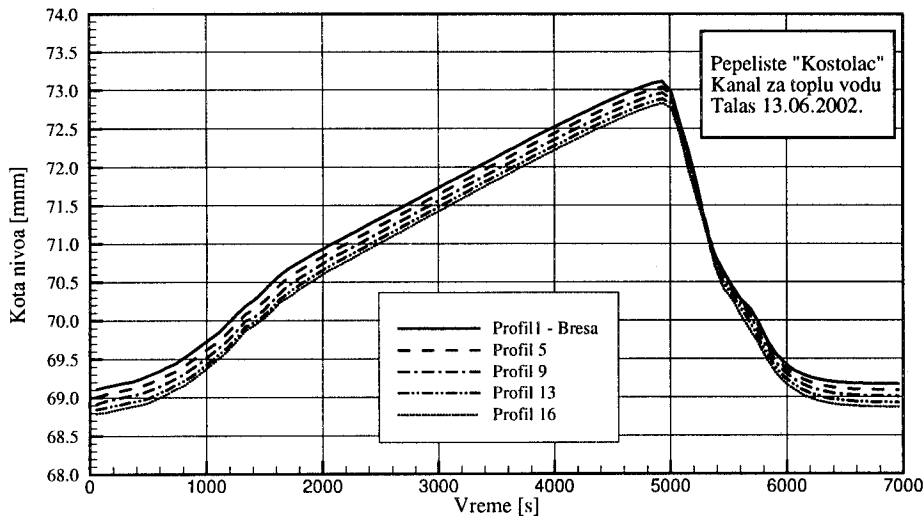
Najveće kote nivoa su iznosile oko 73 mm (slika 9), a dubine oko 4.8 m.

Detaljnija numerička simulacija istog događaja obavljena je pomoću modela ravanskog tečenja zasnovanog na metodi konačnih elemenata. Rezultati su prikazani na slici 10.

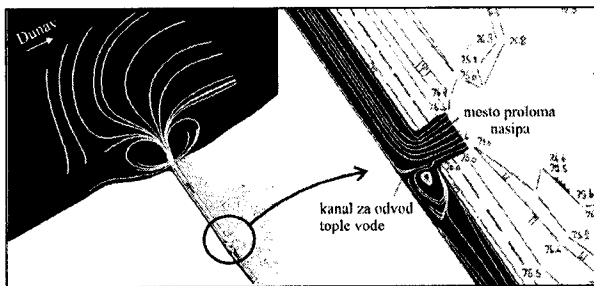
Nakon kalibracije računskog modela na osnovu događaja iz 2002. godine, pristupilo se prognozi hidrauličkih posledica eventualnog proboga nasipa u konačnoj fazi eksploatacije pepelišta, kada će visina nasipa biti oko 23 m. Kriva zapremine sa slike 6 ekstrapolovana je do nove visine nasipa (kota 94 mm), zadržavajući istu dubinu izdvojene vode kao u

sadašnjem stanju. Trajanje razvoja breše (3 h) određeno je iz uslova da odnos protoka mešavine kroz brešu i pronosa materijala erodiranog iz trupa nasipa u

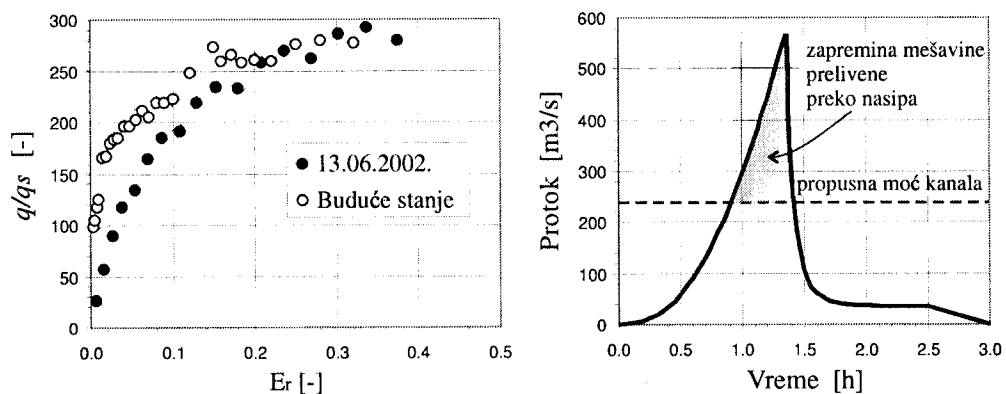
budućim uslovima bude približno isti kao prilikom proloma 2002. godine (slika 11).



Slika 9. Rezultati proračuna prostiranja talasa mešavine kanalom od profila breše do ušća u Dunav, primenom linijskog modela. Može se konstatovati malo usputno ublaženje talasa.



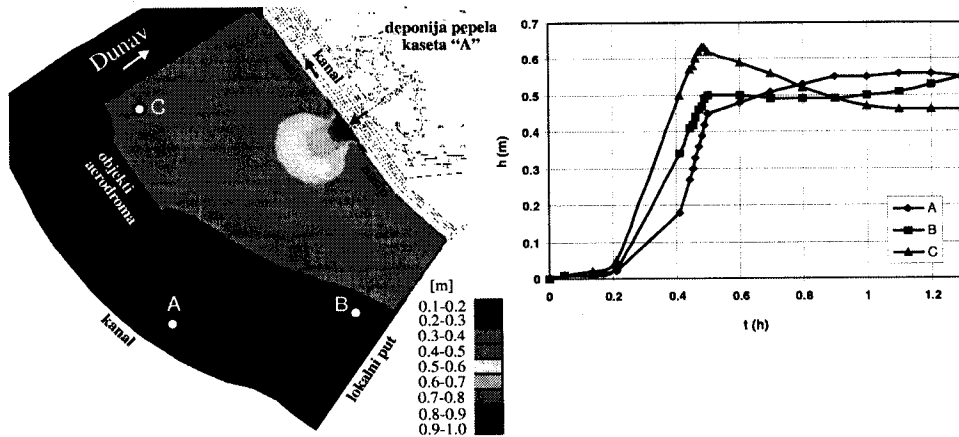
Slika 10. Rezultati numeričke simulacije proloma od 13. juna 2002. godine primenom metode konačnih elemenata. Skica levo prikazuje strujnu sliku u Dunavu u trenutku maksimalnog oticaja mešavine kanalom. Skica desno prikazuje strujnu sliku na mestu proloma, gde dolazi do mešanja vode iz kanala i mešavine koja otiče iz deponije.



Slika 11. Dijagram levo prikazuje bezdimenzionu zavisnosti koje opisuju brzinu formiranja breše: q - jedinični protok mešavine kroz brešu, q_s - jedinični pronos materijala erodiranog iz trupa nasipa, Er - odnos trenutne i konačne zapremine breše ("erozioni broj" : $0 \leq Er \leq 1$). Zavisnosti su slične za trajanje razvoja breše od oko 3 h. Dijagram desno prikazuje odgovarajući računski hidrogram oticaja.

Deo talasa, koji odgovara propusnoj moći kanala, biće odveden kanalom u Dunav, a deo će prelići nasip i razliti se u zoni aerodroma. Prelivena zapremina mešavine iznosi oko 215 000 m³. Rezultati numeričke simulacije plavljenja prikazani su na slici 12. Proračun

pokazuje da se u datoj oblasti mogu očekivati brzine tečenja do 1 m/s i dubine plavljenja do 0.6 m. Plavljenjem bi bili ugroženi brojni stambeni objekti duž lokalnog puta i objekti aerodroma.



Slika 12. Rezultati numeričke simulacije hidrauličkih posledica proloma nasipa visine 23 m. Ovi rezultati, dobijeni primenom metode konačnih elemenata, moraju se imati u vidu pri donošenju odluke o kanačnoj visini nasipa (odnosno o trajanju eksploatacije pojedinih kaseti), kao i o preduzimanju mera zaštite ugroženog područja.

ZAKLJUČAK

Problem predviđanja hidrauličkih posledica havarija brana na pepelištima je izuzetno složen. Numerički modeli predstavljaju moćno sredstvo za rešavanje ovog problema, ali njihova kalibracija i primena zahteva podatke o havarijama zabeleženim u prošlosti.

LITERATURA

- [1] Grupa autora, Elaborat hidrauličkih posledica u slučaju havarija brana na pepelištu TE "Kostolac", Građevinski fakultet, Beograd, 2003.
- [2] Jovanović, M., Doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Beograd, 1987.
- [3] Komatina, D., Lalović, V., Numerical simulation of unsteady dam-break flow of mine tailings, 4th Int. Conference on Hydrodynamics, Yokohama, 2000.

NUMERICAL SIMULATION OF HYDRAULIC CONSEQUENCES OF DAM FAILURES ON COAL-ASH DISPOSAL SITES

by

Miodrag JOVANOVIĆ*, Radomir KAPOR*, Dejan KOMATINA*,
Dejana ĐORĐEVIĆ*, Nenad STEFANOVIĆ*, Vojkan JANČIĆ**

*Faculty of Civil Engineering - Belgrade

**JP EPS Termoelektrane "Kostolac"

Summary

The objectives of numerical simulation of hydraulic consequences of dam failure on coal-ash disposal sites are to define the scope of flooding, consider possibility of early warning, and undertake the appropriate protective measures. This paper discusses the specific characteristics of flood waves induced by partial dike

failure on ash disposal sites, as well as the problems of numerical modelling of this phenomenon. The results of a case study, used for model calibration, are presented.

Key words: dams at coal-ash disposal sites, dam failure, flood waves, 1D and 2D unsteady flow models

Redigovano 17.11.2003.