

Primljen / Received: 18.4.2013.

Ispravljen / Corrected: 19.8.2013.

Prihvaćen / Accepted: 12.9.2013.

Dostupno online / Available online: 10.10.2013.

Primjena postupka simuliranja temperature u kontroli procjeđivanja kod nasutih brana

Autori:



Somayeh Yousefi, dipl.ing.građ.
Islamic Azad sveučilište u Teheranu
Odjel za građevinarstvo
yous1383@hotmail.com



Doc.dr.sc. **Reza Ghiassi**
Sveučilište u Teheranu
Građevinski fakultet
rghiassi@ut.ac.ir



Doc.dr.sc. **Ali Noorzad**
Sveučilište Shahid Beheshti
Odjel za građevinarstvo
geonek@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Mohsen Ghaemian**
Tehničko sveučilište Sharif
Odjel za građevinarstvo
ghaemian@sharif.edu



Doc.dr.sc. **Saeed Kharaghani**
Sveučilište Shahid Beheshti
Odjel za građevinarstvo
kharaghani@yahoo.com

Prethodno priopćenje

Somayeh Yousefi, Reza Ghiassi, Ali Noorzad, Mohsen Ghaemian, Saeed Kharaghani

Primjena postupka simuliranja temperature u kontroli procjeđivanja kod nasutih brana

U ovom se radu razmatra procjeđivanje zemljane brane simuliranjem procjeddnog toka i toplinskih parametara. Jednadžbe za izjednačavanje masa i za konvekciju-difuziju diskretizirane su pomoću metode konačnih elemenata radi rješavanja tih pojava u zasićenim i nezasićenim zonama. Predloženi model je provjeren na primjeru zemljane brane Shamil. Analizirani su materijali raznih karakteristika provodljivosti te je izvršena usporedba s mjernim podacima. Rezultati pokazuju da se ispitivanjem temperaturnih varijacija pojava procjeđivanja može jasnije sagledati nego kod piezometarske kontrole procjeđivanja.

Ključne riječi:

zemljana brana, procjeđivanje, toplinska simulacija, stvaranje erozijskih kanala, metoda konačnih elemenata

Preliminary note

Somayeh Yousefi, Reza Ghiassi, Ali Noorzad, Mohsen Ghaemian, Saeed Kharaghani

Application of temperature simulation for seepage inspection in earth-fill dams

The earth-fill dam leakage is studied in this paper by applying the seepage flow and thermal simulation. The mass balance and convection-diffusion equations are discretized based on the finite element method to solve the phenomena in saturated and unsaturated zones. The Shamil embankment dam is used for verification of the proposed model. Different conductivity cases are analyzed and compared against measured data. Results show that investigation of temperature variations can magnify the effect of leakage more clearly than the inspection of seepage piezometric levels.

Key words:

earthen dam, seepage flow, thermal simulation, piping, finite element analysis

Vorherige Mitteilung

Somayeh Yousefi, Reza Ghiassi, Ali Noorzad, Mohsen Ghaemian, Saeed Kharaghani

Einsatz von Temperatursimulation beim Inspizieren der Versickerung von Erddämmen

Die Hauptursache der Beschädigung von Erddämmen sind unvorhergesehene Versickerungen. Es ist wichtig, die Quantität des Sickerstroms zu bestimmen und die Bedingungen möglicher Dammbüche vorherzusehen. Der Bruch von Erddämmen ist in diesem Artikel durch den Einsatz numerischer Simulationen von Versickerung und Temperatur bearbeitet. Temperaturänderungen im Dammkörper können simuliert werden, um die Wassergeschwindigkeit in den Erdschichten zu ermitteln. Während des Flusses durch den Dammkörper besitzt der Sickerstrom alle physischen Eigenschaften des Stauwassers, einschließlich der entsprechenden Temperatur.

Schlüsselwörter:

Erddamm, Sickerstrom, thermische Simulation, Leitung, Finite-Elemente-Analyse

1. Uvod

Količina procjednih voda često se smatra jednim od ključnih parametara za ocjenjivanje sigurnosti brana. Program osiguranja sigurnosti zemljanih nasutih brana obično obuhvaća primjenu sustava nadzora radi kontrole procjednih voda te otkrivanja mjesta procjeđivanja. U tom se smislu u tijelo brane ugrađuju razni instrumenti radi prikupljanja podataka o procjeđivanju, mjerenja količine procjednih voda, te određivanja pojave eventualno nanesenog materijala. Općenito uzevši, prostorni razmještaj tih instrumenata obično u praksi nije dostatan za određivanje manjih i sporadičnih pojava procjednih voda. To je jedan od značajnijih razloga zbog koji se većina slučajeva erozije otkrije vizualnim pregledom a ne primjenom postupaka nadzora [1].

Podaci o temperaturi mogu se relativno lako mjeriti, a takvim se mjerenjima dobivaju korisni podaci o prisutnosti nepoželjnih tokova procjednih voda koji se javljaju u raznim područjima brane [2]. Mjerenja temperature radi detektiranja pojave procjednih voda u branama prvi su put obavljena u Njemačkoj potkraj pedesetih godina prošlog stoljeća [3]. Značajna su ispitivanja obavljena, naročito u Njemačkoj i Švedskoj, u vremenu od tri desetljeća, počevši od tih prvih mjerenja [4].

Spomenuta metoda za praćenje procjeđivanja temelji se na sezonskim promjenama temperature do kojih dolazi na svim površinskim vodama (kao što su jezera, akumulacije i rijeke), pa tako imamo i sezonske promjene u procjednim vodama koje prolaze kroz branu. Veličina takvih sezonskih promjena temperature može se mjeriti u brani, a povezana je s procjeđivanjem vode kroz branu. Osnovni je pristup opisao Kappelmayer 1957. godine, a nakon njega Johansson 1991. godine [5]. Kada se procjeđivanje treba mjeriti kroz duže razdoblje i na većim udaljenostima, tada se djelotvornim rješenjem smatraju pravilno raspoređeni temperaturni senzori bazirani na optičkim vlaknima. Oni omogućuju uočavanje globalne slike, ali također i prikazivanje detaljnog lokalnog stanja na analiziranoj lokaciji [6].

Na raznim se projektima u Brazilu, Kini i Jordanu pokazalo da je optička metoda mjerenja temperature vlakana (eng. *Distributed Fiber Optic Temperature* - DFOT) pogodna za visoko sofisticirana mjerenja temperature na betonskim i nasutim branama [7]. Spomenuti se metodama dobivaju prihvatljivi i točni rezultati, a ova je tehnologija sada priznata kao najdjelotvornije sredstvo za visokoosjetljivo određivanje promjena u brzini procjeđivanja i to na čitavom prostoru brane. U ovom se radu prikazuje primjena modela za simuliranje procjeđivanja i prijenos temperature, a u svrhu određivanja karakteristika stvaranja erozijskih kanala. Usporedbom raznih slučajeva procjeđivanja može se odrediti učinkovitost primjene simulacije toka i termalnih obilježja za potrebe kvantificiranja podataka izmjerenih na brani.

2. Protok i termički procesi u branama

Temperatura nasute brane povezana je s temperaturom zraka i temperaturom vode u uzvodnoj akumulaciji. Te temperature podložne su sezonskim promjenama, a sama temperatura se toplinskim valovima širi kroz branu. Obično se smatra da količina procjeđivanja kod nasutih brana nije velika, pa sezonska promjena temperatura u brani uglavnom ovisi o temperaturi zraka na površini. Međutim, utjecaj zraka manji je od 1 °C na dubinama u tijelu brane većim od 10 m. Možemo dakle reći da je kod takvih dubina utjecaj zraka zanemariv. Kada se radi o jakom procjeđivanju, tada promjena temperature vode u uzvodnoj akumulaciji u potpunosti određuje temperaturu unutar brane. Sezonske promjene temperature u brani su u takvim slučajevima direktno proporcionalne stopi procjeđivanja. Općenito uzevši, konstantna temperatura nizvodno od jezgre brane znak je malog procjeđivanja, dok velike sezonske promjene mogu upućivati na znatno procjeđivanje. Pri jačem procjeđivanju dolazi do promjene temperature u brani te do znatnijih sezonskih promjena. Takve promjene ovisе o količini procjeđivanja, sezonskoj varijaciji na mjestu dotoka (rubnom uvjetu) te o udaljenosti mjesta dotoka od mjerne točke.

Termohidrauličko ponašanje nasutih brana izuzetno je složeno. Ono obuhvaća osnovne termičke procese kao što su provođenje topline, advekcija i disperzija. Problem se dodatno komplicira zbog varijabilnosti svojstava materijala ugrađenih u branu te zbog različitih uvjeta u zasićenim i nezasićenim dijelovima brane. Stoga se trebaju usvojiti i neke opće pretpostavke. Općenito se problem može analizirati povezanim modelima protoka mase i pronosa energije. U svrhu simuliranja procjeđivanja i pronosa topline kroz porozni medij mogu se koristiti jednadžbe očuvanja mase, energije i koncentracije.

2.1. Jednadžba očuvanja mase

Jednadžba o očuvanju mase u poroznom mediju može se izraziti kako slijedi:

$$\frac{\partial(\rho_f n)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f q_i) = 0 \quad (1)$$

gdje je

ρ_f = gustoća fluida [kg/m³]

n = koeficijent poroznosti

x_i = udaljenost

q_i = tok procjedne vode (Darcyjev tok), (m/s ili m³/s ili m²/s)

t = vrijeme

Za opisivanje brzine procjeđivanja vode može se koristiti opći oblik Darcyjevog zakona:

$$q_i = -\frac{k_y}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho_f g_i \right) \quad (2)$$

gdje je:

- k_{ij} = propusnost
- μ = dinamička viskoznost
- p = tlak
- g_i = gravitacijsko ubrzanje

Stoga se jednačba kretanja za tok procjene vode može dobiti kombiniranjem jednačbi (1) i (2), pa tako dobivamo:

$$\frac{\partial(\rho_i n)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho_i k_{ij} g_j \right) = 0 \quad (3)$$

Ova jednačba s početnim i rubnim uvjetima opisuje tok procjedne vode potaknut razlikom tlaka (ili piezometarskog potencijala) te razlikama u gustoći vode.

2.2. Jednačba očuvanja energije

U slučaju nasute brane, energetski se tok sastoji od vođenja topline u krutoj fazi i od prijenosa topline u tekućoj fazi. Protok energije u vodi (tekuća faza) uključuje advekciju pri uprosječenom protoku procjedne vode te disperziju uzrokovanu varijabilnošću brzina očuvanja energije može se izraziti u obliku opće jednačbe advekcije – disperzije [8]:

$$c_o \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_o \frac{\partial T}{\partial x_i} - c_w T q_i - Q_i^{disp} \right) \quad (4)$$

gdje je:

- c_o = prostorni toplinski kapacitet tla [J/m²K]
- c_w = prostorni toplinski kapacitet vode [J/m²K]
- Q_i^{disp} = tok energije uzrokovan mehaničkom i termičkom disperzijom [J/m²s]
- q_i = tok procjedne vode (Darcyjev tok) [m/s ili m³/s ili m²/s]
- T = temperatura [°C]
- t = vrijeme [s]

- x_i = koordinata
- λ_o = toplinska provodljivost tla

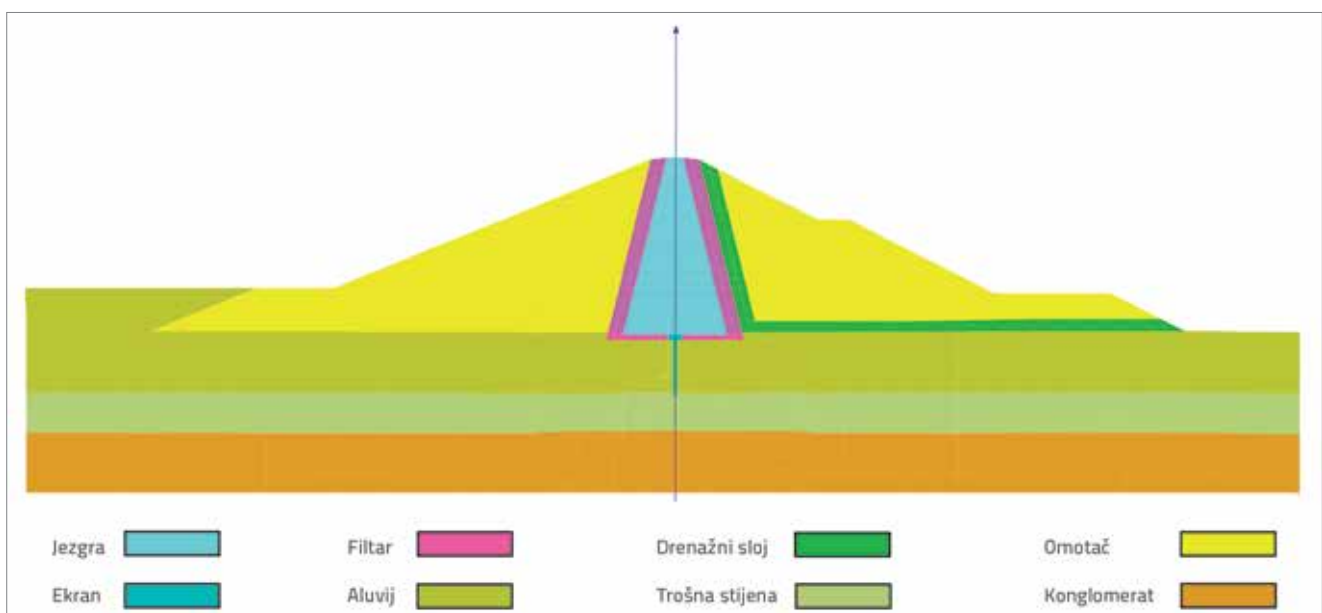
Jednačba (4) opisuje varijaciju energije u vremenu i to na osnovi advekcije (povezane s tokom procjedne vode), difuzije (povezane s toplinskom provodljivošću tla) i disperzije (povezane s toplinskom disperzijom tla).

3. Analiza nasute brane Shamil

Pogodnost predloženog modela ispitana je na primjeru nasute brane Shamil koja se nalazi na jugu Irana. Visina brane iznosi 32,2 m, a akumulacije može primiti 115 milijuna kubnih metara vode. Analizirano je ukupno osam vrsta tla kako bi se simuliralo podnožje brane, jezgra, omotač, drenažni sloj i filterski sloj na brani Shamil.

3.1. Tehnički podaci o brani

Brana Shamil je nasuta brana s blago nagnutom središnjom jezgrom sastavljenom od sitnozrnate gline. Na jezgru brane nadovezuju se dva filterska sloja na uzvodnoj i nizvodnoj strani, te drenažni sloj na nizvodnoj strani. Kruna brane široka je 8 m, a dužina joj iznosi 1200 m. U proteklih godinu i pol dana godišnja fluktuacija razine vode u akumulaciji iznosila je otprilike 18 m (+112 do +130 m), što je polovica visine brane. Kao materijal za temelje brane korišten je konglomerat. Ispod jezgre izveden je nepropusni ekran visine 11 m. Tijelo brane i materijali ugrađeni u temelje sastoje se od osam različitih slojeva koji su u numeričkom modelu definirani kao: 1-jezgra, 2-filtar, 3-drenaža, 4-omotač, 5-ekran, 6-aluvij, 7-trošna stijena i 8-konglomerat, kao što se vidi na slici 1. Koeficijent propusnosti svakog sloja iskazan je u tablici 1. [9].



Slika 1. Razni slojevi u tijelu i temeljima brane

Tablica 1. Tehnički podaci o zemljanim materijalima koji su ugrađeni u branu Shamil

Element brane	k [m/s]	Element brane	k [m/s]
Jezgra	$8,3 \times 10^{-9}$	Filtar	$2,5 \times 10^{-7}$
Aluvij	$2,3 \times 10^{-3}$	Drenažni sloj	7×10^{-5}
Nepropusni ekran	1×10^{-7}	Omotač	$2,3 \times 10^{-5}$
Konglomerat	1×10^{-5}	Trošna stijena	$1 \cdot 10^{-5}$

3.2. Proračun

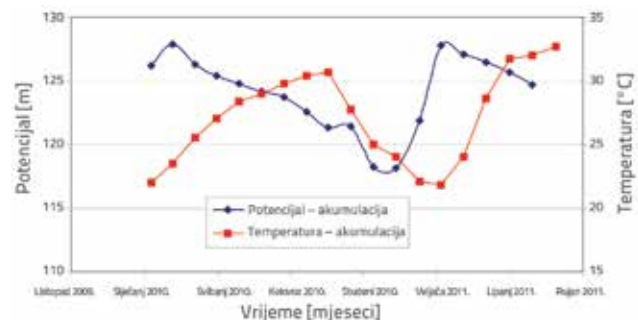
Za vrijeme projektiranja brane analiziran je ukupno 21 različiti profil, i to na bazi topografije rijeke u području brane. U brani Shamil, instrumenti su ugrađeni u profilima broj 10, 14, 19 i 21. Profil broj 14 je najveći profil brane. On je smješten gotovo u sredini rijeke i odabran je za analizu procjeđivanja u okviru ovog istraživanja. U profilu 14 donji je sloj temelja otprilike na 76 m, a gornji na 110 m, gdje je izvedeno dno jezgre. Kruna brane je na 142.5 m. Uzimajući u obzir presjek brane, dužine 203 m na razini korita rijeke, ukupna dužina temelja iznosi 250 m.

Područje obuhvaćeno proračunom diskretizirano je u horizontalnom smjeru na 56 elemenata, a u vertikalnom smjeru na 48 elemenata. Ukupan broj kvadratnih i trokutastih elemenata u presjeku je 1433, a ukupan broj čvorova iznosi 1451. Minimalna dimenzija elemenata iznosi oko 0,5 x 0,5 m u blizini nepropusnog ekrana, a maksimalna veličina elemenata doseže 4 x 7,5 m na uzvodnoj strani temelja brane (slika 2.).

3.3. Rubni uvjeti

U proteklih nekoliko godina završeni su radovi na izgradnji brane Shamil i započelo je punjenje akumulacije. Prije građenja, korito u osi brane bilo je na 112 m pri prvom punjenju. Zbog izuzetno jakog taloženja, razina korita u spremniku se povećala na 118 m, a ta je razina ostala nepromijenjena otprilike dvije godine (u razdoblju opažanja). U proteklih

godinu i pol, razina vode u akumulaciji uglavnom je varirala od 118 do 129 m, kao što se to vidi na slici 3. Te se varijacije mogu smatrati uzvodnim rubnim uvjetima za potrebe simulacije neustaljenog procjeđivanja. Temperatura vode u akumulaciji također je varirala od 19 do 35 °C (slika 3.). Voda koja prolazi kroz tijelo brane zadržava svoja fizikalna svojstva, pa tako i temperaturu. Neustaljeni rubni uvjeti usvojeni su za simulaciju temperature.

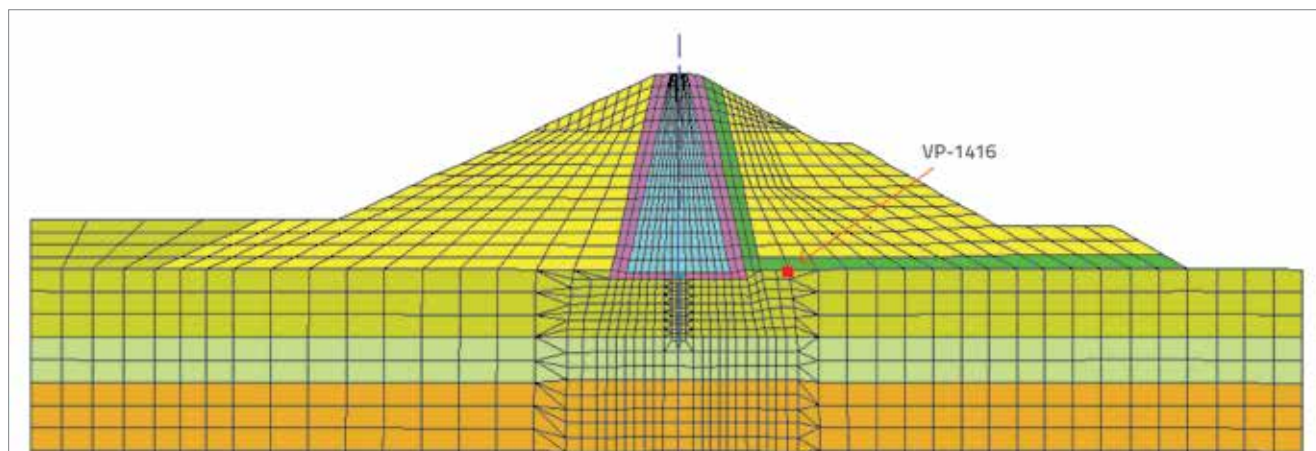


Slika 3. Variranje razine vode i temperature u akumulaciji brane Shamil

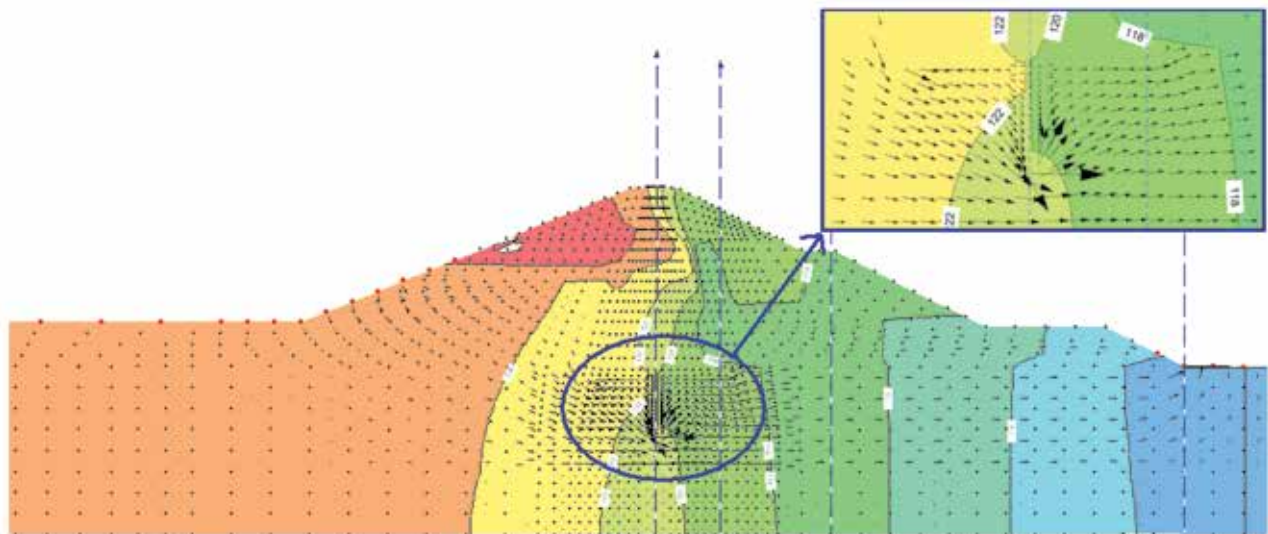
4. Analiza procjeđivanja

Relevantne jednačbe toka i energije, opisane u 2. poglavlju, diskretizirane su na bazi metode konačnih elemenata pomoću trokutastih i četvrtastih elemenata. Diskretizirane jednačbe zasićenih i nezasićenih zona izračunane su za vremenske rubne uvjete. Razina vode se u svakom odsječku vremena može odrediti na temelju postotka zasićenja elemenata vodom

Zabilježeni podaci o razini i temperaturi vode prikazani na slici 3 usvojeni su kao uzvodni granični uvjet za numeričko modeliranje procjeđivanja i temperature. Na nizvodnom licu je izmjerena razina vode u koritu iznosila 112 m. Rezultati numeričke simulacije procjeđivanja bazirane na podacima iz projekta prikazani su na slici 4. U nizvodnom drenažnom sloju, brzina varira od 0,3 do 0,5 m/dan. Istraživanjem brzine



Slika 2. Područje proračuna brane Shamil (s lokacijom piezometra 1416)



Slika 4. Numerički rezultati za tok u profilu 14 (kolovoz 2011.)

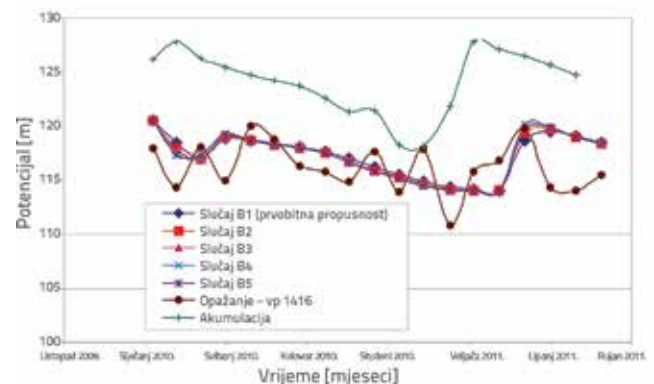
u raznim zonama ustanovljeno je da bi minimalno vrijeme potrebno za prolazak kapljice vode s uzvodne na nizvodnu stranu iznosilo otprilike 540 dana.

Kako podaci dobiveni motrenjem pokazuju da je stopa procjeđivanja veća od one predviđene u projektu, razmotreni su razni slučajevi u okviru modeliranja neustaljenog procjeđivanja. U svakom je slučaju usvojeno da je hidraulička propusnost izvedenih omotača i temelja veća od vrijednosti iz projekta, te da su ti podaci jednaki onima iskazanima u tablici 2., dok su ostali tehnički podaci u skladu s podacima iz projekta. U slučaju B1, vrijednost propusnosti odgovara projektnim podacima zabilježenima u projektnoj dokumentaciji. Rezultati proračuna procjeđivanja za variranje piezometarske razine u profilu broj 14 ucrtani su na slici 5. tako da se može izvršiti usporedba s izmjerenim vrijednostima. Uočeno je da u nekoliko slučajeva nema bitne razlike kod proračunskih rezultata, pa se stoga ne može izvesti neki poseban zaključak.

Na temelju gornjih razmatranja može se zaključiti da razlika između simuliranih piezometarskih razina nije velika niti u jednom od svih pet slučajeva. Drugim riječima, čini se da variranje piezometarskih potencijala u modeliranju procjeđivanja nije dovoljno za donošenje odluke o raznim sustavima procjeđivanja.

Tablica 2. Razni slučajevi vrijednosti propusnosti za omotač i temelj

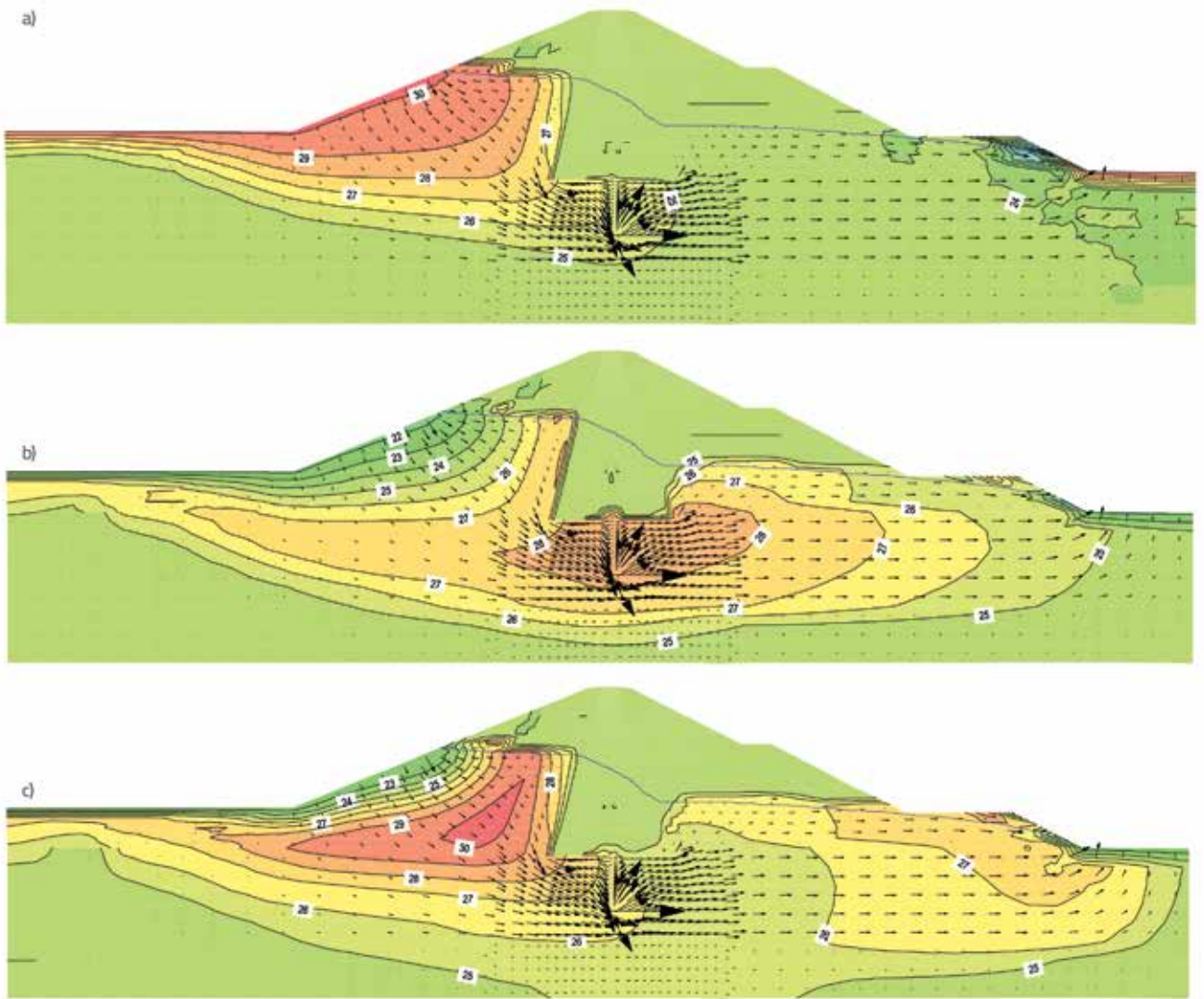
Slučaj	Propusnost [m/s]
B1	2.3×10^{-5}
B2	4×10^{-5}
B3	6×10^{-5}
B4	8×10^{-5}
B5	2×10^{-4}



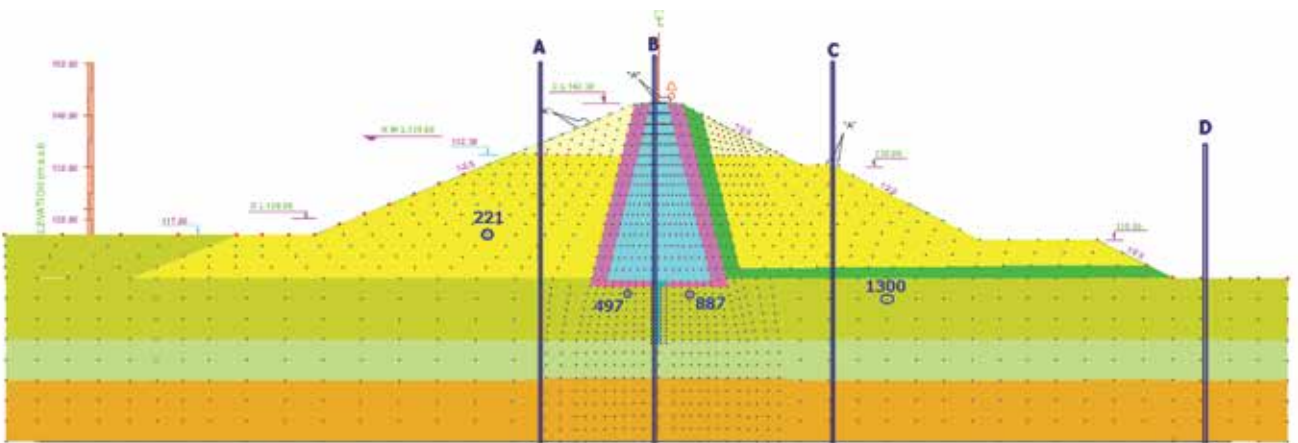
Slika 5. Vremenska varijacija piezometarskog potencijala u piezometru 1416, za sve slučajeve

5. Analiza temperature

Prosječna brzina procjeđivanja u uzvodnom omotaču iznosi otprilike 0,3 m/dan, dok se brzina povećava do 1 m/dan oko ekrana. Kao što je već spomenuto, prosječna minimalna i maksimalna temperatura zabilježena u proteklih trideset godina u području brane varira od 19 do 35 °C. Kako maksimalna dubina vode u akumulaciji brane iznosi manje od 10 m, temperatura vode u akumulaciji uglavnom odgovara vanjskoj temperaturi, a nije zabilježen ni vertikalni gradijent temperature. Stoga se variranje temperature prikazano na slici 3. može primijeniti za sve rubne elemente na uzvodnoj strani brane. Procjeđivanje kroz branu zadržava te vrijednosti variranja u vremenu, pa se gotovo isto ponašanje glede variranja može uočiti u elementima koji se nalaze uzvodno od jezgre brane. Ako u jezgri postoji pukotina, tada varijacija u temperaturi vode uglavnom odgovara varijaciji u temperaturi vode u samoj akumulaciji. Na osnovi analize procjeđivanja simuliran je razmještaj temperatura u brani za razdoblje od godinu i pol dana, i pritom su korišteni gore spomenuti rubni uvjeti.

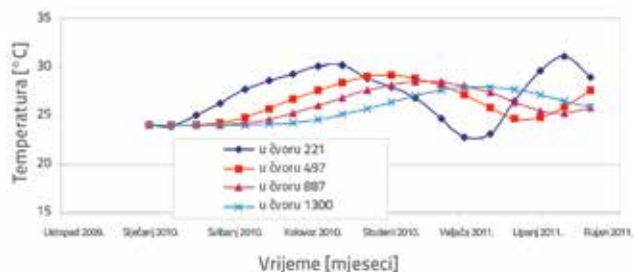


Slika 6. Simulacija toka i temperature u profilu 14: a) nakon šest mjeseci (kolovoz 2010.); b) nakon 12 mjeseci (veljača 2011.); c) nakon 18 mjeseci (kolovoz 2011.)



Slika 7. Lokacija relevantnih čvorova (u kojima su nacrtane vremenske varijacije temperature) i lokacija poprečnih linija istjecanja

Rezultati simulacije temperature u vremenu od 6, 12 i 18 mjeseci prikazani su na slici 6. Jasno se u uzvodnim i nizvodnim zonama mogu uočiti razlike temperatura zabilježenih na istim mjestima u različitim vremenskim razmacima. Dakle, varijacije temperature su vrlo male na nizvodnom omotaču ako u jezgri brane nema pukotina. Međutim, veće varijacije temperature zabilježene su na uzvodnom omotaču. Da bi se ocijenili trendovi variranja temperature u vremenu, analizirana su četiri čvora u tijelu brane, kao što se to vidi na slici 7. Vremenske temperaturne varijacije u ta četiri čvora prikazane su na slici 8.



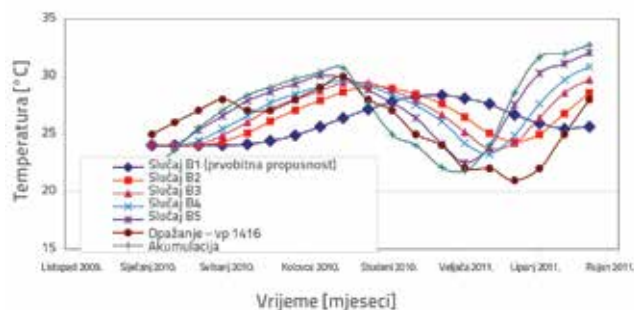
Slika 8. Vremensko variranje temperature u raznim čvorovima: čvor 221 u uzvodnom omotaču, čvor 497 u uzvodnom ekranu, čvor 887 nizvodno od ekrana, čvor 1300 u sredini drenažnog sloja (na dnu)

6. Diskusija

Uspoređivanjem izmjerenih vrijednosti temperatura s rezultatima koji su dobiveni numeričkim modeliranjem možemo zaključiti da je hidraulička propusnost ekrana brane otprilike tri puta veća od vrijednosti iskazanih u tehničkim izvještajima. Stoga se može reći da je procjeđivanje u ovom profilu brane vjerojatno u najvećoj mjeri uzrokovano višim vrijednostima hidrauličke propusnosti u ekranu brane.

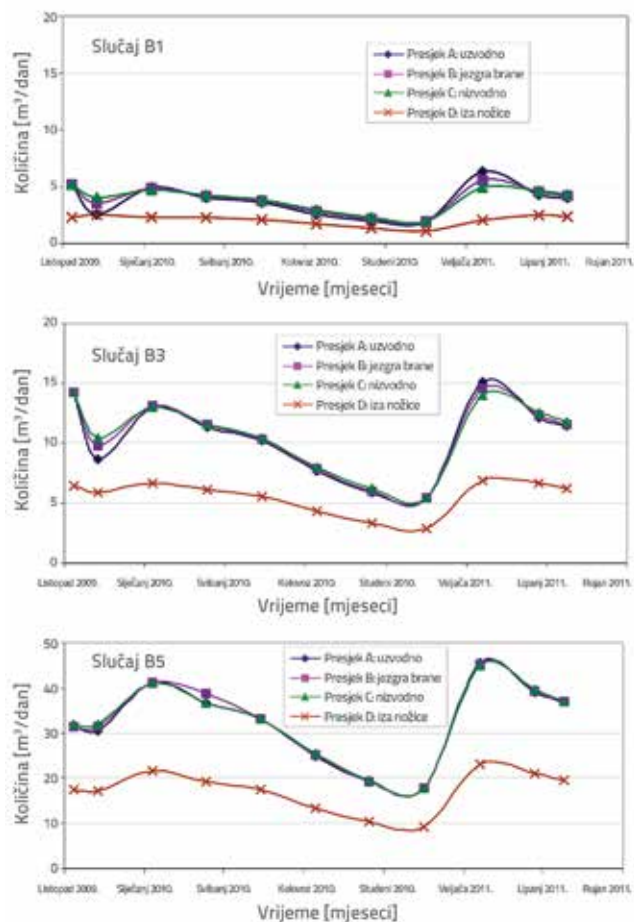
Da bi se ocijenilo temperaturno ponašanje brane, razmotreno je pet opisanih slučajeva (B1~B5). Sigurnosno stanje brane može se ocijeniti na osnovi variranja temperature elemenata nizvodno od tijela brane. Variranje temperature u čvoru 1062 u blizini piezometra 1416 nizvodno od jezgre prikazano je na slici 9. Variranje temperature u tom čvoru iskazano je za sve slučajeve, i to uz podatke izmjerene za piezometar 1416 i akumulaciju brane. Jasno se može uočiti da su rezultati za slučaj B3 bliži izmjerenim rezultatima ako ih usporedimo s drugim slučajevima. Stoga se može zaključiti da je faktor prosječne stvarne hidrauličke propusnosti tijela brane gotovo isti kao i u slučaju B3.

Ocjenjivanjem vrijednosti istjecanja mogu se dobiti i drugi rezultati o trenutačnoj situaciji na brani. Vrijednosti istjecanja iz nizvodnog omotača izmjerene su u tri vremenska intervala: siječanj 2011. (3 m³/dan), travanj 2011. (5 m³/dan) i srpanj 2011. (5,5 m³/dan). Kako se protok smatra neustaljenim i kako su primijenjeni vremenski granični uvjeti, vrijednosti procjeđivanja u raznim dijelovima nisu iste. Istjecanje koje prolazi kroz presjek D može se provjeriti usporedbom s mjernim podacima, kao što je već navedeno.



Slika 9. Vremensko variranje temperature u čvoru 1062 i piezometru 1416 za sve slučajeve

Četiri različita vertikalna presjeka uzeta su u obzir u profilu br. 14 (slika 7.). Presjek A nalazi se na uzvodnom omotaču, presjek B u jezgri brane, presjek C u nizvodnom omotaču, a presjek D nizvodno od brane iza nožice. Voda koja prolazi kroz te presjeka može se izračunati te grafički iskazati za određeni vremenski interval. Te varijacije prikazane su na slici 10. za slučajeve B1, B3 i B5. Razlike između protoka na presjeku C i presjeku D odgovaraju vrijednostima iz nizvodnog omotača brane.



Slika 10. Vremenska varijacija toka u presjecima A, B, C i D (slika 7.) za slučajeve B1, B3 i B5 u profilu br. 14

Razlike u protoku između presjeka C i D mogu se dobiti prema slici 10. za sve slučajeve od B1 do B5. Za slučaj B3, spomenuta razlika u protoku iznosi $2.6 \text{ m}^3/\text{dan}$ u siječnju 2011. $4.8 \text{ m}^3/\text{dan}$ u travnju 2011. te $5,7 \text{ m}^3/\text{dan}$ u srpnju 2011. Ustanovljeno je da se izmjereni tok iz nizvodnog omotača brane nalazi negdje između vrijednosti izračunanih za slučajeve B3 i B4, ali je bliži rezultatima za slučaj B3. Stoga se sa stajališta procjeđivanja može zaključiti da je slučaj B3 najbliži uvjetima izvedene brane.

7. Zaključak

U ovom se radu analizira novoizgrađena zemljana brana Shamil da bi se odredili utjecaji variranja vrijednosti procjeđivanja na piezometarski potencijal i temperaturni raspon u tijelu brane u promatranom razdoblju tijekom godine i pol. Za simuliranje procjdnog toka i posljedičnog variranja temperature korišten je model konačnih elemenata s trokutastim i četvrtastim

elementima. Vrijednosti procjeđivanja i temperature modelirane su primjenom neustaljenih graničnih uvjeta.

Slično kao i kod povratnih analiza, za numeričko modeliranje protoka i temperature uzeti su u obzir razni slučajevi da bi se definirali stvarni uvjeti izvedene brane. U prvom stadiju, usporedba izmjerenog piezometarskog potencijala i rezultata dobivenih modeliranjem protjecanja nije dovela do nekih značajnijih zaključaka. U sljedećem stadiju, u nekim su slučajevima uspoređivanjem registriranih vrijednosti temperature i rezultata toplinskog modeliranja ipak ustanovljene određene razlike u rezultatima. Te su razlike pomogle u iznalaženju stvarnih izvedenih uvjeta. Ustanovljeno je da je koeficijent hidrauličke propusnosti omotača brane otprilike tri puta veći od odgovarajuće vrijednosti navedene u projektnoj dokumentaciji. Može se zaključiti na osnovi povratne analize procjeđivanja na nasutoj brani da je kontrola temperaturnih promjena djelotvornija od praćenja varijacija piezometarskog potencijala.

LITERATURA

- [1] ICOLD: Dam Failures Statistical Analysis, Bulletin 99, 73P, 1995.
- [2] Johansson, S.: Seepage Monitoring in Embankment Dams, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1997.
- [3] Kappelmeyer, O.: The Use of Near Surface Temperature Measurements for Discovering Anomalies due to Causes at Depths. Geophysical Prospecting, Vol. 3, pp. 239-258, 1957.
- [4] Merkle, G.P., Blinde, A., Armbruster, H., Doscher, H.D.: Field Investigations for The Assessment of Permeability and Identification of Leakage in Dams and Dam Foundations, 15th Congress of International Commission on Large Dams (ICOLD 1985), Q58, R7, Lausanne, Switzerland, 24-28 June 1985.
- [5] Johansson, S.: Localization and Quantification of Water Leakage in Ageing Embankment Dams by Regular Temperature Measurements, Proc. ICOLD 17th Congress, Q65, R54, Vienna, Austria, 1991.
- [6] Cunat, P., Beck, Y.L., Fry, J.J., Courivaud, J.R., Fabre J.P., Faure, Y.H.: Surveillance of dyke ageing. Proc. of the 2nd International conference on Long Term Behaviour of Dams, Graz, Austria, 12-13 October 2009.
- [7] Conrad, M., Aufleger, M., Malkawi, A.I.H.: An Advanced Temperature Monitoring System at Mujib and Wala Dam, In: Proc. of the Int. Conf. on Roller Compacted Concrete Dam Construction in Middle East 2002, Irbid, Jordan, 07.-10.04.2002. Eds. Malkawi, A. I. H., Aufleger, M., Strobl, Th., Irbid, J.: Jordan University of Science and Technology, 2002, 319 – 330, 2002.
- [8] Johansson, S., Dahlin, T.: Seepage Monitoring in Hollby Embankment Dam by Continuous Resistivity Measurements, in Procs. 8th Congress of the International Ass. Of Eng. Geology and the Environment (ed. D. Moore and O. Hungr), Vancouver, Canada, 21-25 September 1998, pp. 95-102.
- [9] Moshanir Co.: Shamil Dam Technical Report, 2007.