



HIDRAULI KA NUMERI KA ANALIZA STRUJANJA VODE KROZ NASIP I OKOLNO TLO

prof. dr. sc. **Zoran Milašinovi** , dipl. ing. gra .

mr.sc. **Mirna Rai** , dipl. ing. gra .

Kristijan Boras, mag. gra .

Gra evinski fakultet Sveu ilišta u Mostaru

Sažetak: U radu se pokušalo dati više informacija o nasipnim gra evinama s hidrotehni ko-hidrauli kog aspekta, faktorima o kojima je važno voditi ra una prilikom projektiranja i izgradnje ovakvih objekata, kao i varijantnim rješenjima jedne ovakve konstrukcije. Na prakti nom primjeru DKB Svitava, pokazana je hidrotehni ko-hidrauli ka analiza pouzdanosti nasipa izgra enih od lokalno dostupnih materijala (glina), kao i trenutno stanje nasipa, koji su na pojedinim mjestima zna ajno erodirali s obzirom da je izgradnja pregradnog nasipa i rekonstrukcija (nadvišenje) nasipa uz rijeku Krupu i nasipa uz obodni kanal izvršena davne 1978. godine. U hidrogeološkom pogledu, Svitavska potolina je svojevstan dren kome gravitiraju podzemne vode iz njenog krškog zale a. Formirani kompenzacijski bazen nije potpuno vodonepropustan. Prora un koli ine gubitaka iz Svitavskog jezera ura en je numeri kim modeliranjem kroz nasipe koji ga formiraju, uz najnepovoljnije odnose voda u jezeru i okolnom vodnom podru ju.

Ključne riječi: nasip, koeficijent filtracije, trodimenzionalni model, CHE apljina, FEFLOW 6.2

HYDRAULIC NUMERICAL ANALYSIS OF WATER FLOW THROUGH EMBANKMENT AND THE SURROUNDING SOIL

Abstract: The paper attempts to provide more information on embankment structures from the hydrotechnical-hydraulic aspect, the factors for which it is important to make allowance during the design and construction of such facilities, as well as variant solutions of one such structure. Using the practical example of the LCB Svitava, it shows the hydrotechnical-hydraulic reliability analysis of embankments constructed from locally available materials (clay), as well as the present condition of the embankments, which have significantly eroded in some places, since the construction of the barrier embankment and reconstruction (superelevation) of embankments along the Krupa River and embankments along the boundary channel was performed back in 1978. In hydro-geological terms, the Svitava depression is a kind of drain to which groundwaters from its karst hinterland gravitate. The formed compensation basin is not completely impermeable. Calculation of the amount of losses from the Svitava lake through embankments that form it was carried out by numerical modeling, with the least favorable rates of water in the lake and in the surrounding water area.

Key words: embankment, coefficient of permeability, three-dimensional model, PSPP Capljina, FEFLOW 6.2



1. KONCEPTUALNI HIDRAULI KI MODEL

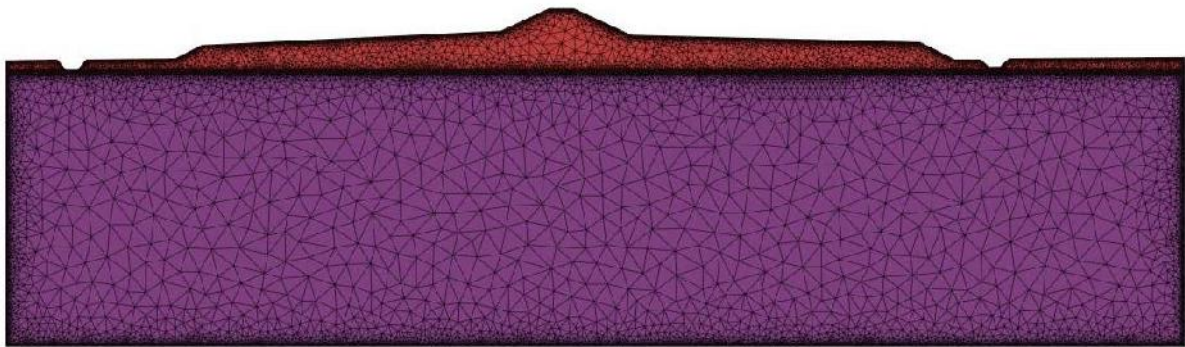
Sagledavajući i problematiku područja, analizirani su hidraulički odnosi u promatranom području na osnovu raspoloživih podataka. Analiza se sastojala od sljedećeg:

- Formiranje dvodimenzionalnog stacionarnog matematičkog modela za analizu područja i intenziteta strujanja podzemnih voda kroz i oko nasipa. Simuliranje stanja potencijala na razmatranom području uz unošenje vrijednosti za razinu vode u DKB Svitava, obodnom kanalu i kaseti Mala Svitava. Sve je urađeno za karakteristične poprečne profile, za koje postoje hidrogeološki podaci.

- Koeficijenti filtracije su kvalitativno pridruženi prema opisu hidrogeoloških značajki bušotina. Postavljanjem Darcyeva zakona filtracije i jednadžbe kontinuiteta za svaku elementarnu prizmu, dobio se izraz za razinu podzemne vode u jednoj točki mreže konačnih elemenata, ovisno o razini u svim susjednim točkama – središtima elementarnih prizmi. Prvi korak u formiranju modela sastojao se u tome da se iz cjeline područja izdvoji područje od interesa za modeliranje. Izdvojeno područje je diskretizirano trokutnim prizmatičnim konačnim elementima. Razmatrano je stacionarno tečenje u nezasićenom vodonosniku sa slobodnom površinom. Rubni uvjeti su zadani kao apsolutna vrijednost razine vode u DKB Svitava, obodnom kanalu i kaseti Mala Svitava.

2. PREGRADNI NASIP

Dvodimenzionalni model nasipa se sastoji od dva sloja, prvi (površinski) sloj debljine 6,20 m s koeficijentom filtracije od $k = 8,12 \cdot 10^{-6}$ m/s i drugi sloj sa koeficijentom filtracije od $k = 5,106 \cdot 10^{-7}$ m/s.

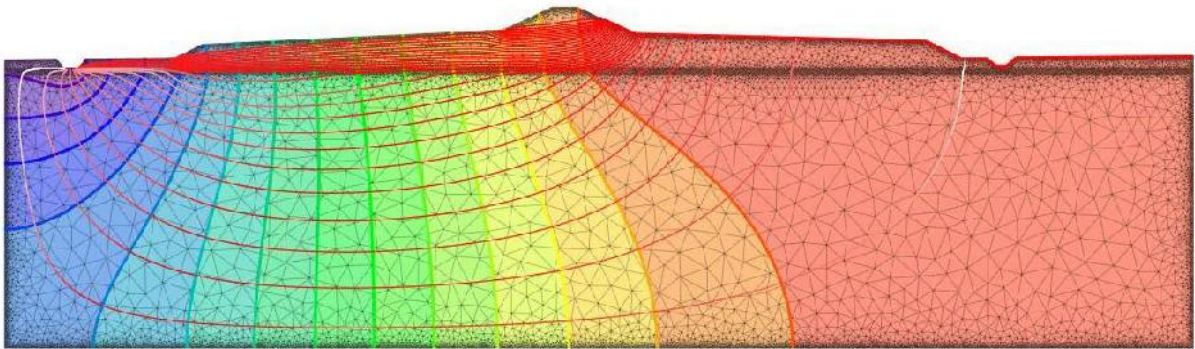


Slika 1. Pregradni nasip - diskretizacija

Geometrija nasipa je dobivena iz postojeće projektne dokumentacije EP HZ HB. Diskretizacija profila urađena je trokutnim konačnim elementima. Rubni uvjeti za hidrauličku analizu obodnog nasipa bili su sljedeći:

- razina vode u Svitavskom jezeru: 5,00 m,
- kaseti Mala Svitava bez vode,

što ujedno predstavlja i najnepovoljniji slučaj s hidrauličkog gledišta strujanja kroz nasip i okolno područje.



Slika 2. Pregradni nasip – strujna i ekvipotencijalna mreža

Nakon provedene numeričke analize za ranije navedene uvjete, kao rezultat slijedi da količina vode koja se procjeđuje iz Svitavskog jezera prema kaseti Mala Svitava kroz i ispod pregradni nasip iznosi: $QPN = 3897,60 \text{ m}^3/\text{dan}$ ili $QPN = 0,045 \text{ m}^3/\text{s}$ na dužini nasipa od 1680 metara.

2.1. Proračun količina voda koje se procjeđuju kroz nasipe i okolno tlo

Strujanje vode kroz poroznu sredinu može u određenim hidrodinamičkim uvjetima izazvati procese deformacije vrste faze (vezanog i nevezanog, odnosno koherentnog i nekoherentnog tla) i promjenu strukture porozne sredine. Pri procesu deformacije tla dolazi do promjene zapremine (zapreminske težine), odnosno promjene poroznosti tla, a posredno i do promjene filtracijskih karakteristika porozne sredine. Kod razmatranja mogu nastati i uvjeta pojave filtracijske nestabilnosti tla, na elno se mogu razlikovati dva vida stabilnosti: lokalna i opća stabilnost. Lokalna filtracijska stabilnost je vezana samo za užu zonu objekata i ona može biti narušena u pojedinim, izoliranim lokalitetima, na mjestima povećanih brzina filtracijskog toka. Prema krajnjim efektima procesa lokalne filtracijske nestabilnosti tla, mogu se razlikovati dva tipa lokalnih filtracijskih rušenja: bezopasna filtracijska rušenja (koja se po pravilu javljaju u dubljim dijelovima tla) i opasna filtracijska rušenja (koja se najčešće javljaju na mjestima izlaza filtracijskih tokova), a koja su po pravilu progresivna.

Uobičajena klasifikacija lokalne filtracijske deformacije tla je sljedeća:

Za tlo bez opterećenja, na površini (na mjestu izlaska filtracijskog toka), filtracijsko rušenje se može manifestirati kao:

- fluidizacija i
- sufozija.

Za tla koja su u kontaktu s krupnozrnim materijalima (balast, odnosno obrnuti filtar), što drugim riječima predstavlja vanjsko opterećenje koje tlo štiti od sufozije i fluidizacije, vidovi filtracijske deformacije su izraženi u obliku:

- kontaktne fluidizacije i
- kontaktne erozije.

Za slučaj vezanog, koherentnog tla (kod kojeg je izraženo postojanje kohezijskih svojstava), pored iznijetih vidova deformacijskih rušenja, javlja se i specifičan vid deformacije koherentnog tla:

- odslojavanje

Opća filtracijska stabilnost se povezuje s filtracijskom stabilnošću u hidrotehničkim objektima u cjelini. Opća filtracijska stabilnost objekta može biti ugrožena uslijed postojanja privilegiranih putova na nekim mjestima u zoni strujnog toka, kao posljedica određenih prirodnih uvjeta ili neadekvatne i nestrukturirane izgradnje objekta.



2.2. Sufozija

Od naprijed spomenutih vidova lokalnih filtracijskih deformacija tla s obzirom na važnost, odnosno dominantnost javljanja na prostoru nasutih objekata u nastavku će se više pažnje posvetiti sufoziji. Sufozija predstavlja takav vid filtracijskog rušenja kod kojeg pod utjecajem filtracijskog toka dolazi do pojave iznošenja sitnih estica iz mase zemljišta.

Po pravilu se javlja u sredinama s izrazito neujedna enim granulometrijskim sastavom i kada hidrauli ki gradijenti pre u odre enu kriti nu vrijednost. U ovisnosti o položaju na kome se sufozija javlja, razlikuje se:

- unutarnja sufozija (javlja se unutar mase porozne sredine),
- vanjska sufozija (javlja se po liniji kontakta porozne sredine s površinskom vodom ili atmosferom).

S gledišta sufozijskih svojstava, nevezana tla, se prema rezultatima V. S. Istomine, mogu razvrstati u tri skupine:

- nesufozivna < 10
- sufozivna > 20
- prijelazno podru je (tla koja mogu biti sufozivna i nesufozivna) $10 < < 20$

$$= d_{60} / d_{10}$$

Jedan od kriterija za odsustvo sufozije može biti izražen i kroz veli inu koeficijenta filtracije. Sufozija se prema rezultatima eksperimenata V. S. Istomine ne može javiti kod prirodnih materijala u uvjetima kada je koeficijent filtracije:

$$K < (2-2,5) \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Za odre ivanje veli ine kriti ne brzine, pri kojoj je mogu a pojava sufozije u praksi se esto koriste klasi ni kriteriji Ziharta i Abramova.

$$\text{Zihart: } V_{kr} = K^{1/2} / 15 \text{ (m/s)}$$

$$V_{kr} = K^{1/3} / 15$$

K - koeficijent filtracije osnovne sredine (m/s).

Me utim, laboratorijska ispitivanja pojave sufozije pokazuju da se predložene vrijednosti kriti nih filtracijskih brzina ve nalaze u domenu pojave sufozije. Prema Cistinu, trebalo bi brzine sra unate prema Zihartu i Abramovu umanjiti 2 do 4 puta.

G. Kova je prema rezultatima laboratorijskih istraživanja na modelima paralelnog strujanja izrazio kriti nu brzinu pri kojoj dolazi do pojave kretanja finih estica unutar porozne sredine u obliku:

$$V_{kr} = K^{0,356} / 200 \text{ (K i } V_{kr} \text{ dati u m/s)}$$

Prema ovim rezultatima, kriti na brzina pri kojoj dolazi do pomaka finih estica u tijelu porozne sredine može se izraziti u obliku:

$$V_{kr} = V_{kr}^{\text{Abramova}} / 6$$

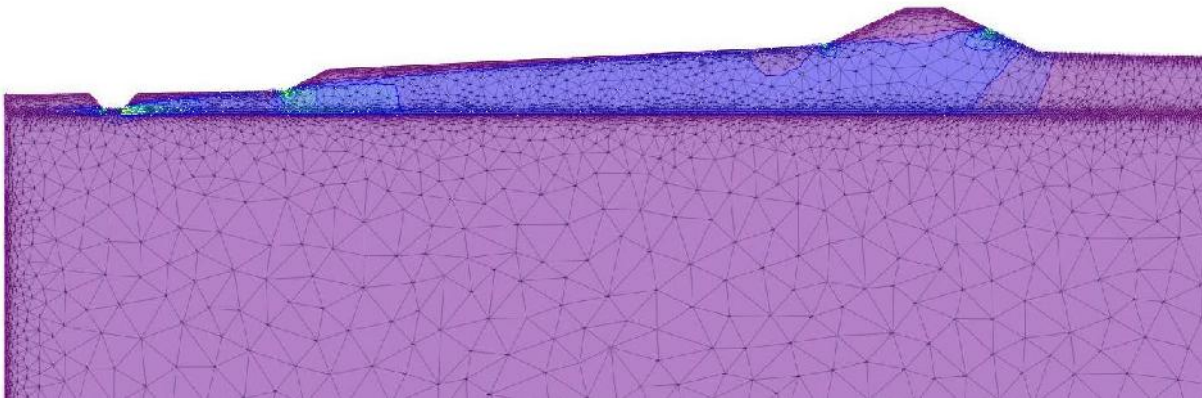


3. PREGRADNI NASIP-REZULTATI PRORAUNA

Na osnovi rezultata numeričkog modela urađena u programu FEFLOW, gdje se za maksimalnu brzinu tečenja kroz pregradni nasip dobila vrijednost od $v_{max.} = 0,24 \cdot 10^{-4}$ m/s, urađena je analiza mogućnosti pojave sufozije na spomenutom nasipu kako slijedi.

$$= d_{60} / d_{10} = 0,0095 / 0,0003 = 31,67$$

Prema kriteriju: > 20 tlo nasipa spada u sufozivna tla.
Koeficijent filtracije prvoga sloja iznosi: $k = 8,12 \cdot 10^{-6}$ m/s.



Slika 3. Linije jednakih brzina – pregradni nasip

Podaci za koeficijent poroznosti za uzorke uzimane iz osovine nasipa sa različitim dubinama (Zavod za geotehniku i fundiranje Građevinskog fakulteta u Sarajevu: "PHE – aplijina – kompenzacijski bazen Svitava, rezultati istražnih radova i geotehničkih ispitivanja na postojećim nasipima uz rijeku Krupu (RK) i obodni kanal (OK)", Sarajevo, 1974. god.).

koef. poroznosti	n
	0,45
	0,47
	0,60
sr. vrijednost:	0,5067

Tablica 1. Koeficijent poroznosti

$$v_{eff.} = \frac{v_{model}}{n} = \frac{0,24 \cdot 10^{-4}}{0,5067} = 4,74 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Prema Zihartu:

$$v_{kr.} = \frac{k^{1/2}}{15} = \frac{(8,12 \cdot 10^{-6})^{1/2}}{15} = 1,90 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Prema Abramovu:

$$v_{kr.} = \frac{k^{1/3}}{30} = \frac{(8,12 \cdot 10^{-6})^{1/3}}{30} = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$



Prema Kova u:

$$V_{kr.} = \frac{k^{0,356}}{200} = \frac{(8,12 \cdot 10^{-6})^{0,356}}{200} = 7,50 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$\frac{V_{kr.}^{Abramov}}{6} = 1,12 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

U Tablici 2. dana je usporedba brzina koje su izraunate pomoću u numeričkog modela FEFLOW i dozvoljenih brzina koje se dobiju na osnovu kriterija danih u prethodnoj točki. Analiza pokazuje da područje pregradnog nasipa nije podložno razvoju procesa sufozije.

K^M (m/s)	V_{bruto}^M (m/s)	$V_{stvarno}^M$ (m/s)	$V_{kr.}^{Abramov}$ (m/s)	$V_{kr.}^{Abramov}/6$ (m/s)	Podložno sufoziji
$8,12 \cdot 10^{-6}$	$0,24 \cdot 10^{-4}$	$4,74 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$	NE

Tablica 2. Podložnost sufoziji – pregradni nasip

4. 3D MODEL

Kod zadanog trodimenzionalnog modela analizirani su hidraulički odnosi u promatranom području na osnovu raspoloživih podataka. Model je postavljen na način:

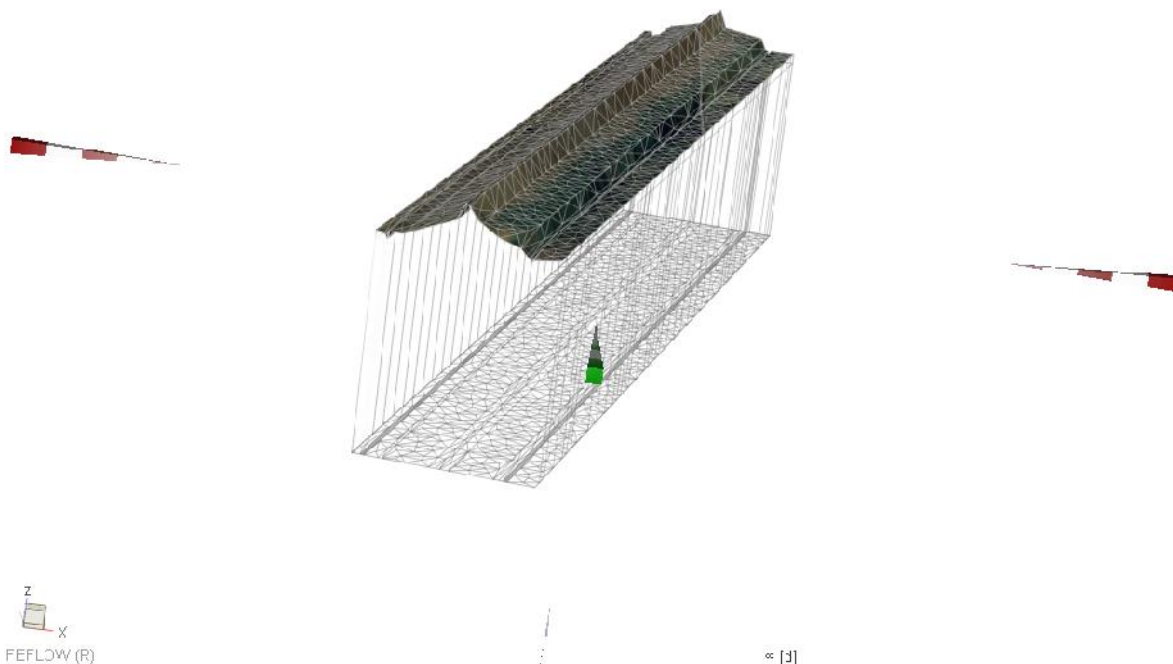
- Formiranje trodimenzionalnog stacionarnog matematičkog modela za analizu područja i intenziteta strujanja podzemnih voda kroz i oko nasipa. Mreža kojom je predstavljen model je sastavljena od 3498 prizmatičnih elemenata i 2787 vorova. Razmatrano je stacionarno tečenje u zasićenom vodonosniku sa slobodnom površinom. Razmatran je ravni dio pregradnog nasipa u duljini od 720 m.



Slika 4. Nasip u tlocrtnom pogledu

Trodimenzionalni prikaz izveden je na inom pridruživanja to aka iz tlocrta nasipa, prema raspoloživim geodetskim podlogama, to kama koje formiraju mrežu modela unutar programskog alata Feflow 6.2.

Model se sastoji od 2 sloja kojima su pridruženi geodetski, hidrauli ki i geomehani ki uvjeti na osnovi istraživa kih radova.



Slika 5. Diskretizacija podru ja

Simuliranje stanja potencijala ura eno je na razmatranom podru ju uz unošenje vrijednosti za razinu vode u DKB Svitava i kaseti Mala Svitava. Sve je ura eno za karakteristi ne popre ne profile, za koje postoje hidrogeološki podaci.



Postavljeni su sljedeći rubni uvjeti:

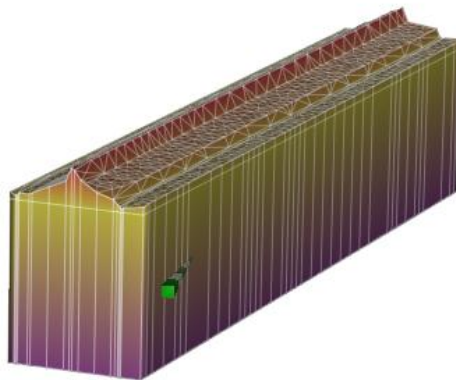
- Apsolutna vrijednost razine vode kaseti Mala Svitava jednaka je 0.
- Apsolutna vrijednost razine vode u DKB Svitava iznosi 5 metara.

Ovakvi uvjeti ujedno predstavljaju i najnepovoljniji slučaj s hidrauličkog gledišta strujanja kroz nasip i okolno područje.

- Koeficijenti filtracije su kvalitativno pridruženi prema opisu hidrogeoloških značajki bušotina i jednaki su vrijednostima u predstavljenom dvodimenzionalnom modelu.

Prvi (površinski) sloj debljine 6,20 m s koeficijentom filtracije od $k = 8,12 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ i drugi sloj debljine 26,8 metara sa koeficijentom filtracije od $k = 5,106 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$.

Postavljanjem Darcyeva zakona filtracije i jednadžbe kontinuiteta za svaku elementarnu prizmu, dobio se izraz za razinu podzemne vode u jednoj točki mreže konačnih elemenata, ovisno o razini u svim susjednim točkama – središtima elementarnih prizmi.



Slika 6. Prikaz 3D modela sa zadanim koordinatama

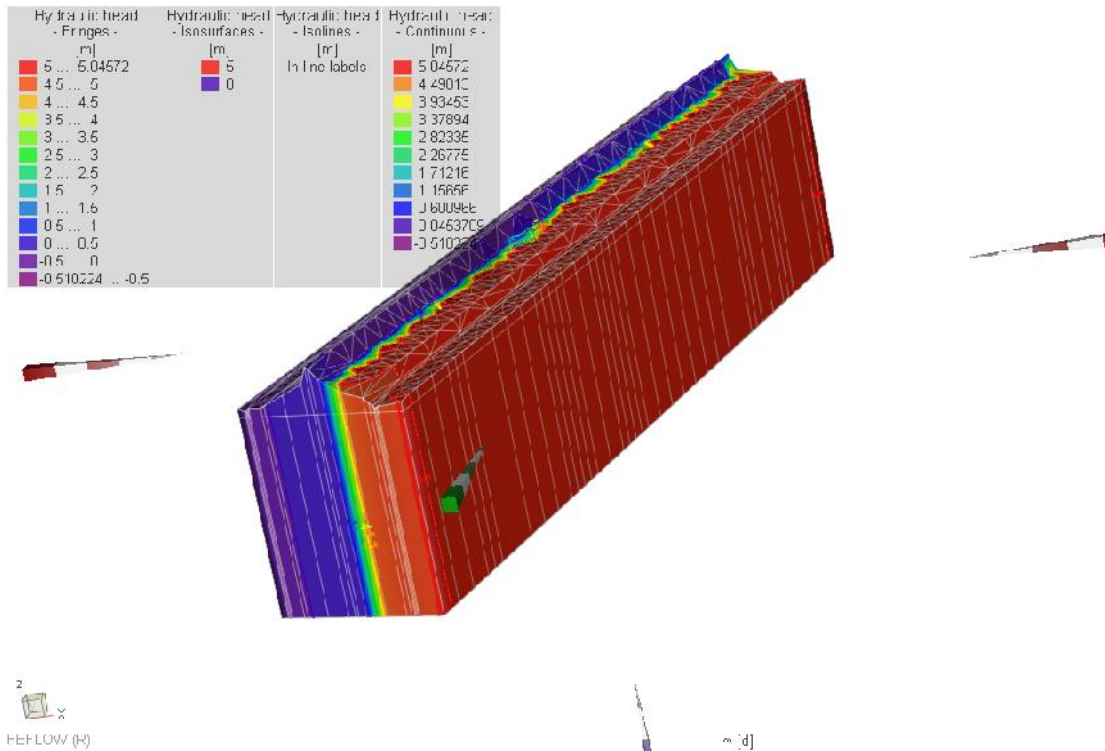
5. REZULTATI PRORAČUNA

Nakon provedene numeričke analize za ranije navedene uvjete, kao rezultat slijedi da količina vode koja se procjeđuje iz Svitavskog jezera prema kaseti Mala Svitava kroz i ispod pregradni nasip iznosi $Q_{PN} = 0,022 \text{ m}^3/\text{s}$ na dužini nasipa od 720 metara.

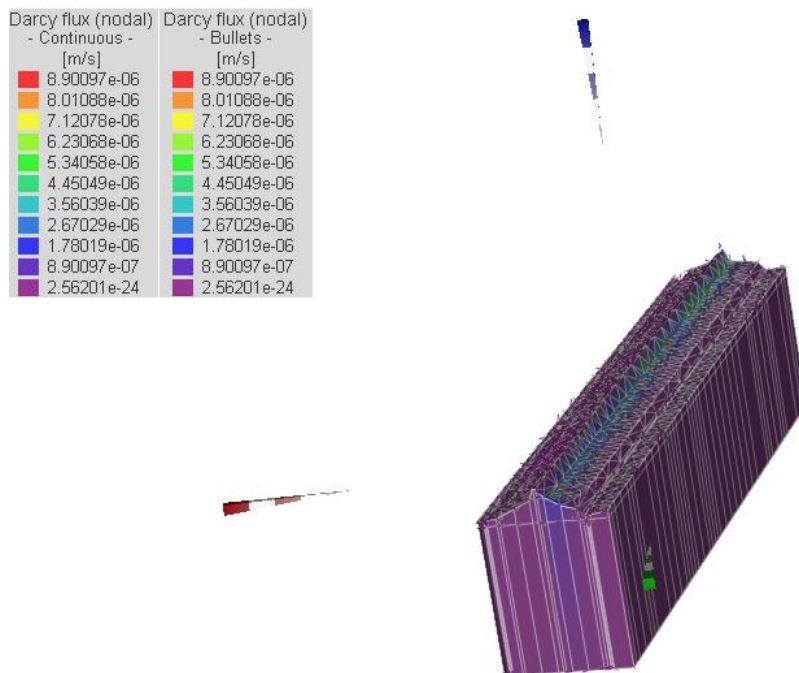
Rezultati ranije urađena enoga 2D modela strujanja za rezultat su dali količinu vode koja se procjeđuje kroz nasip od $Q = 0,019 \text{ m}^3/\text{s}$ na dužini nasipa od 720 m.

Vrijednost maksimalne brzine koja se ostvaruje na modeliranom području i iz simulacije proračuna 3D modela je $v_{ef, 3D \text{ model}} = 1,75 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, dok je vrijednost iz 2D modela

$v_{ef, 2D \text{ model}} = 0,24 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.



Slika 7. Prikaz linija ekvipotencijala



Slika 8. Darcyjeve brzine



6. ZAKLJU AK

Rad je pokazao kako je za hidrauli ku analizu mogu e koristiti ravninski model umjesto prostornoga za slu aj odre ivanja koli ine vode koja se procje uje kroz ravne nasipe. Ovo dokazuju rezultati navedeni u radu, a koji se odnose na rezultate protoka za 2D i 3D model strujanja kroz nasip.

Rezultati za brzine procje ivana daju odstupanja, gdje su se u prostornom modelu dobile manje vrijednosti efektivnih brzina u odnosu na brzine dobivene iz ravninskog modela.

LITERATURA

[1] Ljubodrag M. Savi , *Uvod u hidrotehni ke gra evine*, 2. izd., Gra evinski fakultet Beograd, Beograd 2009.

[2] Vukovi , M., Puši , M., *Filtracione deformacije i stabilnost tla*, posebno izd. knjiga 31, Institut za vodoprivredu "Jaroslav erna", Beograd 1986.

[3] Puši , M., *Dinamika podzemnih voda*, Rudarsko geološki fakultet Beograd, Beograd 2000.

[4] *Elaborat o utjecaju donjeg kompenzacijskog bazena na kasetu Mala Svitava*, Gra evinski fakultet Sveu ilišta u Mostaru, Mostar 2013.

[5] *Elaborat o stanju obala i korita rijeke Krupe s analizom geomehani ke i hidrauli ke stabilnosti*, Gra evinski fakultet Sveu ilišta u Mostaru, Mostar 2013.

[6] Andri evi , R., *Groundwater flow and transport modeling, autorizirana predavanja (na engleskom)*, University of Nevada, USA, 1999.;

[7] Zheng, C. and G. D., Bennet, *Applied Contaminant transport modeling*, John, Willey & Sons, Inc., 2002.;

[8] *Stochastic subsurface hydrology*, Academic press, 1993.

[9] V., Jovi , V., *Osnove hidromehanike*, Sveu ilište u Splitu, Element, Zagreb, 2006.;