



Здружение Македонски комитет за големи брани
Macedonian Committee on Large Dams

Зборник на трудови
Proceedings

5^{ТИ} КОНГРЕС ЗА БРАНИ

5TH CONGRESS ON DAMS

30.9÷2.10. 2021 год.
30.9÷2.10. 2021

Струга, Република С. Македонија
Struga, Republic of N. Macedonia

ОРГАНИЗАТОР

Здружение Македонски комитет за големи брани

ORGANIZED BY

Macedonian Committee on Large Dams

ИЗДАВАЧ

Здружение Македонски комитет за големи брани

PUBLISHED BY

Macedonian Committee on Large Dams

ЗА ИЗДАВАЧОТ

Проф. д-р Љупчо Петковски

Претседател на Здружение Македонски комитет
за големи брани**FOR THE PUBLISHER**

Prof. Ljupcho Petkovski, PhD

President of Macedonian Committee on
Large Dams**ТЕХНИЧКА ОБРАБОТКА**

Стевчо Митовски, Фросина Пановска

TECHNICAL PREPARATION BY

Stevcho Mitovski, Frosina Panovska

ЛЕКТУРА

Тања Стевановска-Цветковска

PROOFREADER

Tanja Stevanovska-Cvetkovska

ПЕЧАТЕЊЕ

Промедиа - Скопје

PRINTED BY

Promedia - Skopje

ТИРАЖ

100 примероци

PRINTING RUN

100 copies

ФОТОГРАФИЈА НА НАСЛОВНА СТРАНАБрана Конско во фаза на градба, поглед од
воздушна страна**COVER PHOTO**

Konsko dam in construction, aerial view

© Сите права се заштитени. Публикацијата не смее да биде преведувана или копирана во целина или во делови без писмена дозвола на издавачот.

© All rights reserved. The publication can not be translated or copied at full or any part of it without written permission from the publisher.

CIP - Каталогизација во публикација

Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

627.8.04/09(062)

621.311.21(062)

КОНГРЕС за брани (5 ; Струга ; 2021)

Зборник на трудови / 5-ти Конгрес за брани, 30.9-2.10.2021 год., Струга, Република С.

Македонија = Proceedings / 5th Congress on dams, 30.9-2.10.2021, Struga, Republic of N.

Macedonia. - Скопје : Здружение Македонски комитет за големи брани = Skopje : Macedonian
committee on large dams, 2021. - 341, [15] стр. : илустр. ; 30 см

Текст на мак. и англ. јазик. - Библиографија кон трудовите

ISBN 978-608-4953-00-5

1. Напор. ств. насл.

а) Брани -- Акумулации -- Хидроцентрали -- Собири

COBISS.MK-ID 55029765

РЕДАКЦИСКИ ОДБОР / EDITORIAL BOARD

Проф. д-р Љупчо Петковски, Претседател на ЗМКГБ

Градежен факултет, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Р.С. Македонија

Prof. Ljupcho Petkovski, PhD, President of MACOLD

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

Проф. д-р Емилија Беднарова, Претседател на Словачкиот комитет за големи брани

Технички Универзитет во Братислава, Словачка

Prof. Emilia Bednarova, PhD, President on Slovak Committee on Large Dams

Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia

Проф. д-р Хасан Тосун

Факултет за инженерство и архитектура, Универзитет во Османгази, Ескисехир, Турција

Prof. Hasan Tosun, PhD

Faculty of Engineering and Architecture, Osmangazi University, Eskisehir, Turkey

Проф. д-р Алтан Абдуламит, Претседател на Романскиот комитет за големи брани

Технички Универзитет во Букурешт, Романија

Prof. Altan Abdulamit, PhD, President on Romanian Committee on Large Dams

Technical University in Bucharest, Romania

Проф. д-р Џорџ Дуњас, Претседател за Здружението за големи брани во Грција

Империјал Колеџ Лондон, Англија; Здружение за големи брани во Грција

Prof. George Dounias, PhD, President on Greek Committee of Large Dams

Imperial College of Science and Technology, London, UK; Greek Committee of Large Dams

Доц. д-р Андреј Крижановски

Факултет за градежништво и геодезија, Универзитет во Љубљана, Словенија

Assoc. prof. Andrej Kryžanowski, PhD

Faculty of engineering and geodesy, University in Ljubljana, Slovenia

Проф. д-р Тина Дашиќ

Градежен факултет, Универзитет во Белград, Србија

Prof. Tina Dasic, PhD

Civil Engineering Faculty, University of Belgrade, Serbia

Проф. д-р Димитар Кислиаков, Претседател на Бугарскиот комитет за големи брани

Универзитет по архитектура, градежништво и геодезија, Бугарија

Prof. Dimitar Kisliakov, PhD, President on Bulgarian Committee of Large Dams

University of Architecture, Civil engineering and Geodesy, Bulgaria

Проф. д-р Зекирија Идризи

Универзитет Мајка Тереза, Р.С. Македонија

Prof. Zekirija Idrizi, PhD

Mother Teresa University, R.N. Macedonia

Проф. д-р Благоја Голомеов

Факултет за технички и природни науки, Универзитет Гоце Делчев, Штип, Р.С. Македонија

Prof. Blagoja Golomeov, PhD

Faculty of technical and natural sciences, University Goce Delchev, Shtip, R.N. Macedonia

Проф. д-р Вилос Илиос

Технички факултет, Универзитет Св. Климент Охридски во Битола, Р.С. Македонија

Prof. Vilos Ilios, PhD

Technical faculty, University Ss Clement of Ohrid, R.N. Macedonia



НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА НА ФИЛТРАЦИЈАТА ПОД ТЕЛОТО НА ГРАВИТАЦИОНА БЕТОНСКА БРАНА

Благоица Данова¹, Стевчо Митовски², Љупчо Петковски³

Резиме

Примарна цел на нумеричката анализа на браната е да се утврди конструкциската (статичка и динамичка) стабилност, како и филтрационата стабилност на браната и на основата. Во конкретниот случај, во рамки на моделирањето е ставен акцент на однесувањето на основата под телото на браната при дејство на филтрациониот тек. Според напредниот пристап за анализа на браните, анализата се извршува преку моделирање со помош на нумерички апарат во облик на програмски модули. Целта е со примена на нумерички модел, базиран на МКЕ, да се придонесе кон методологијата за определување на филтрационата стабилност на основата под браната.

Анализиран е конкретен случај на бетонска гравитациона брана на нестеновата основа. Во нумеричката анализа се применети програмските модули SEEP/W и HYDRA, со чијашто помош се генерирани најважните резултати во домен на решавање на проблемот со филтрацијата: (а) вредности на потенцијалот; (б) големини на порниот притисок; и (в) вредности за излезниот хидраулички градиент. Наведените излезни резултати се споредуваат на рамниште на случаи (случај бр. 1 и случај бр. 2) и на рамниште на програмски модули, односно се споредуваат резултатите од секој поединечен случај помеѓу модулот SEEP/W и модулот HYDRA.

Клучни зборови: филтрација, пропустлива основа, бетонска брана, МКЕ.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE SEEPAGE IN THE FOUNDATION UNDER CONCRETE GRAVITY DAM

Blagica Danova¹, Stevcho Mitovski², Ljupcho Petkovski³

Summary

The primary target of the numerical analysis of the concrete gravity dam is to determine the structural (static and dynamic) stability of the dam, and also stability against seepage phenomena. In this case, the analysis is concentrated in the field of seepage in foundation soil. According to the advanced approach to dam analysis, the analysis is performed by modeling with the help of numerical apparatus in the form of program modules. The purpose of the thesis is by applying a numerical model, based on the finite element method, to make a contribution to the methodology for determining the stability of the foundation under a hydraulic structure under the influence of the seepage.

The analysis is based on a case study about concrete gravity dam on permeable foundation. The important quantities which must be estimated when studying this phenomenon include: (a) water potential, (b) pore pressure and (c) exit gradient. The final results are compared based on the three different cases (case 1 and case 2) and also the comparison is made based on the two numerical modules SEEP/W and HYDRA.

Key words: seepage, permeable foundation, concrete dam, FEM.

¹Д. г. и., УКИМ Градежен факултет – Скопје, blagica.danova@hotmail.com

²Вон. проф. д-р, д. г. и., УКИМ Градежен факултет – Скопје, smitovski@gf.ukim.edu.mk

³Проф. д-р, д. г. и., УКИМ Градежен факултет – Скопје, petkovski@gf.ukim.edu.mk

1. ВОВЕД

Филтрацијата во основата под хидротехнички конструкции се смета за опасна појава, која може да предизвика колапс на конструкцијата со текот на времето доколку не се третира соодветно и не се преземат соодветни мерки. Првите истражувања на полето на филтрацијата датираат од деветнаесеттиот век, а потоа се развиваат бројни теории според кои се анализира процесот на филтрација. Во втората половина од дваесеттиот век земаат замав нумеричките методи, а од понов датум стануваат актуелни и вештачките невронски мрежи [1]. Аналитичките методи ги поставуваат темелите на денешната практика за третирање на оваа проблематика. Тука може да се вбројат теоријата на филтрација според Блај (Bligh), Лејновата теорија (Lane), теоријата на филтрација според Косла (Khosla), Форхајмер (Forchheimer) и др. Нивната истражувачка работа се базира на равенката на континуитет, законот на Дарси (Darcy) и равенките на Лаплас (Laplace), со чијашто помош е изготвена теоретската основа на овој феномен.

Во овој реферат акцентот е ставен на примената на нумеричките методи во инженерството како алатка за моделирање инженерски проблеми, во конкретниот случај тоа е појавата на филтрацијата под телото на бетонска гравитациона брана.

Со помош на методот на конечни елементи се анализирали два карактеристични случаи на филтрација во нестеновата основа под телото на бетонска гравитациона брана, со примена на два програмски пакета за нумеричка анализа, и тоа модулот SEEP/W од софтверскиот пакет Geo Studio и модулот HYDRA од софтверскиот пакет SOFiStiK. Анализираните случаи се однесуваат на хомогена средина и на средина со, главно, хоризонтално протегање на четирите почвени слоеви.

Поконкретно, анализиран е случајот за браната „Шахпурканди“, која е во изградба на реката Рави во Индија, при што како влезни големини и параметри се: (а) геометријата на браната „Шахпурканди“, со соодветно ниво на вода во акумулацијата; (б) инженерско-геолошкиот профил на основата, со соодветни испитувања на основата по параметар на водопропустливост; и (с) коефициентот на филтрација, кој варира за секој поединечен слој.

2. ОПИС НА АНАЛИЗИРАНИОТ СЛУЧАЈ

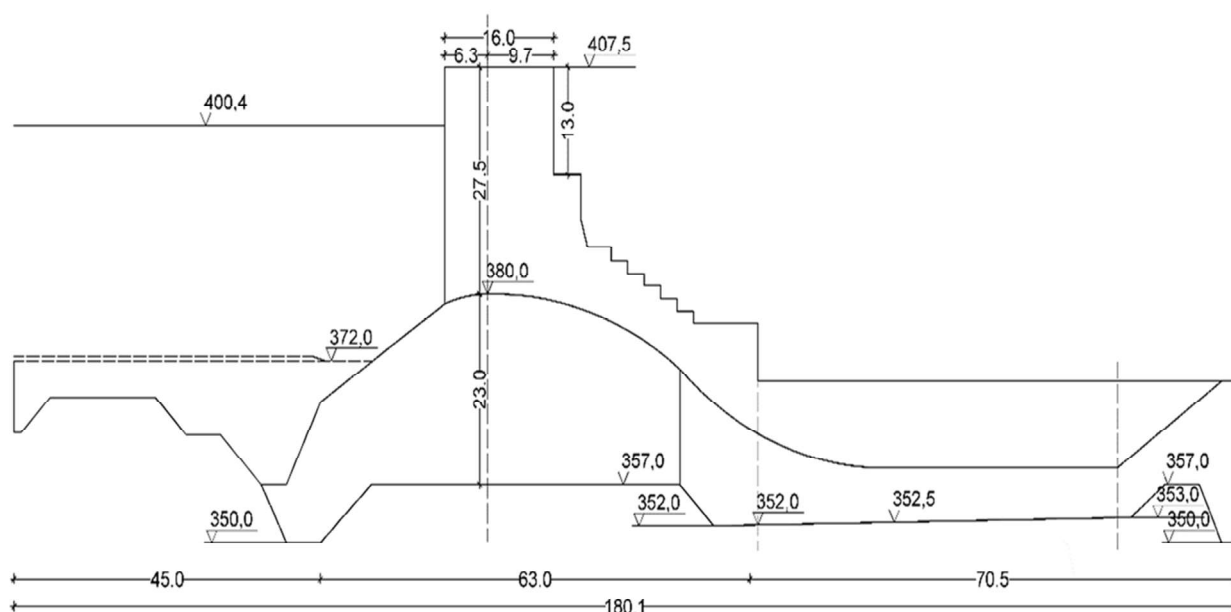
Проектот за браната „Шахпурканди“ (Shahpurkandi), која е лоцирана на реката Рави во Индија, е инфраструктурен проект којшто е од национално значење во согласност со стратегијата на Владата на Индија. По неговото завршување се очекува имплементирање на стратегијата за одржлив развој во областа на земјоделството и во однос на расположливите количини на вода, како и задоволување на зголемените потреби за електрична енергија во Пенџаб и во регионот Џаму и Кашмир [2].

Реализацијата на овој проект е започната во 2014 година и сè уште е во тек. Браната „Шахпурканди“ се изведува 11 km низводно од постојната брана „Ранџит Сагар“ (Ranjit Sagar Dam), а 8 km узводно од браната „Медхопур Хедуркс“ (Madhopur Headworks). Водата што се испушта од браната „Ранџит Сагар“ е предвидено да се користи за генерирање електрична енергија во рамките на овој проект. Планираната инсталирана моќност на хидроцентралата изнесува 206 MW, а со произведената електрична енергија ќе се придонесе за поефикасно управување со областа во рамки на системот од канали, т.н. Горен Бари Доаб (Upper Bari Doab Canal System), кој е еден од најстарите каналски системи во Индија. Покрај производството на електрична енергија, ќе се обезбеди и вода за наводнување на Пенџаб (површина од 5000 ha) и на Џаму и Кашмир (површина од 32173 ha). Изградбата на браната е во склоп на договорот за користење на водите во рамки на сливот на реката Инд, кој е склучен помеѓу Индија и Пакистан.

Според критериумите за проектирање на Меѓународниот комитет за големи брани (ICOLD Bulletin 61, Dam Design Criteria), може да се подвлечат две насоки:

- Да се добие конструкциска целина, којашто ќе функционира како што е проектирана и без значителна детериорација во рамки на предвидениот период на експлоатација.
- Браната да не доживее катастрофален лом при евентуална манифестација на најнеповолното можно сценарио (екстремни услови).

Должината на основата во узводната секција изнесува 108 m и е сочинета од глинен килим со должина 45 m и преливен дел со должина од 63 m. Во низводниот дел е изведено слапиште, со должина од 70,5 m (сл. 1). Глинениот килим е предвиден со цел да се продолжи патот на филтрацијата во основата под браната.



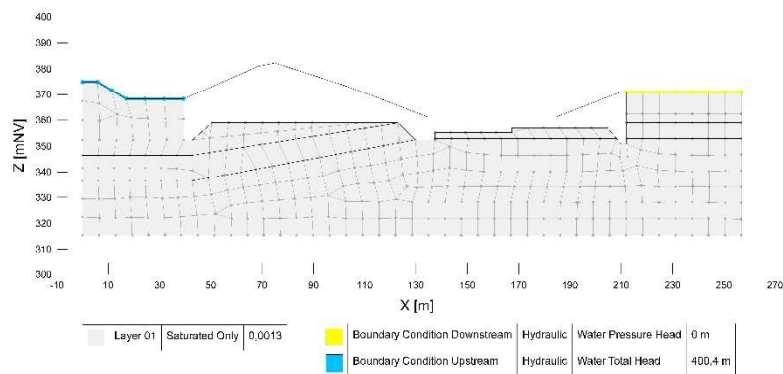
Слика 1. Приказ на геометријата на браната „Шахпурканди“

3. МОДЕЛИРАЊЕ И СПРОВЕДУВАЊЕ НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА

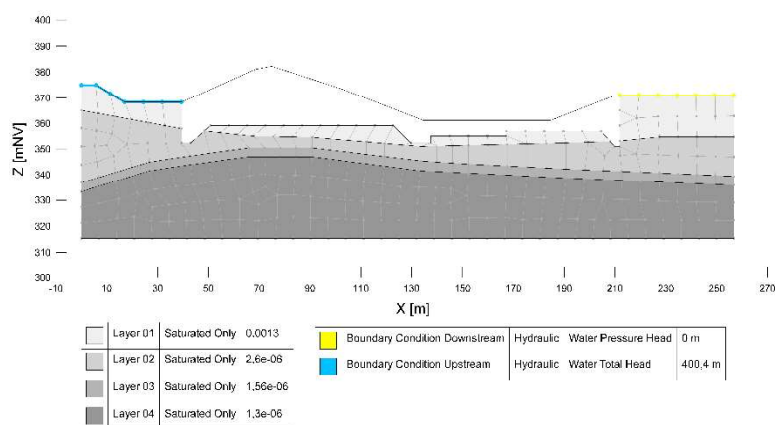
Во модулот SEEP/W, по нанесувањето на геометријата преку точки и зонирање во региони, се врши автоматска дискретизација со конечни елементи [3], а истите може да се приспособат во однос на нивната просечна големина и нивниот број. Обликуваните конечни елементи се со различна форма, односно се забележува микс од квадрилатерална и тетраедарна мрежа. Поголемиот број од елементите се обликувани со по четири точки, а за дискретизација на рабните зони се применети триаголни конечни елементи.

Дискретизација на основата на конечни елементи во модулот HYDRA се прави со задавање точки и линии и со специфицирање на бројот на конечни елементи во двете насоки, кои може да се приспособат во однос на нивната просечна големина и нивниот број [4]. Обликуваните конечни елементи се со различна форма. Применети се квадрилатерални конечни елементи (со четири точки), а за дискретизација на рабните зони се применети триаголни конечни елементи [5].

На слика 2 и на слика 3 се дадени мрежите со конечни елементи за случај бр. 1S и за случај бр. 2S, со приказ на граничните услови и вредностите на коефициентот на филтрација за различните слоеви.



Слика 2. Приказ на зонирање со материјали во основата под браната, мрежа на конечни елементи и гранични услови за случај бр. 1S (јазли N=360, елементи E=310).



Слика 3. Приказ на зонирање со материјали во основата под браната, мрежа на конечни елементи и гранични услови за случај бр. 2S (јазли N=314, елементи E=267).

3.1 Излезни резултати со програмскиот пакет Geo-Studio/ SEEP/W

3.1.1 Случај бр.1S

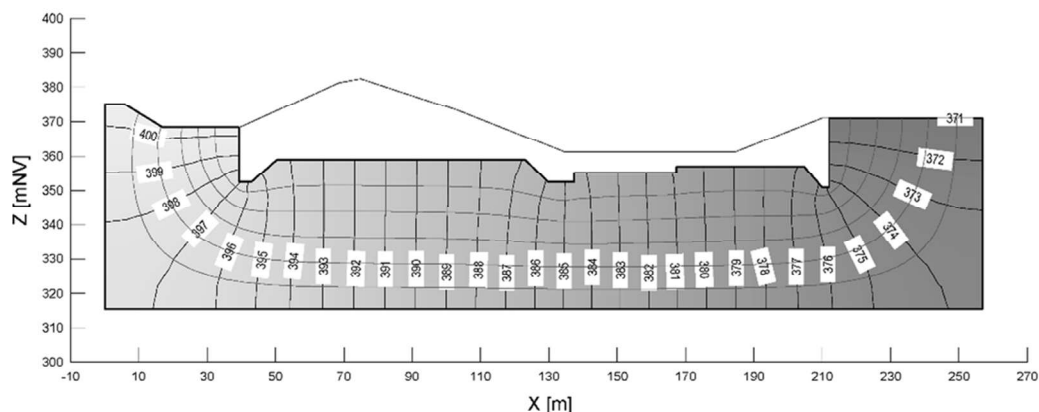
На слика 4 е прикажана мрежата на еквипотенцијалните и струјните линии, којашто претставува графичка репрезентација на равенката на Лаплас [6]. Линиите на потенцијалот се прикажани на растојание од 1,0 m и со тоа се претставени 30 еквипотенцијални падови. Струјните линии се конструирани дополнително и тоа се линиите на текот на водата од нејзиниот влез во нестеновитата основа до излезот низводно од браната.

Распределбата на еквипотенцијалните линии, во граници од 371,0 m_{pnv} до 400,4 m_{pnv}, е во согласност со очекувањата. Во предметниот случај на хомогена средина може да се забележи дека струјните и еквипотенцијалните линии образуваат криволинска мрежа на квадрати и може да се констатира дека нумеричката анализа е спроведена коректно.

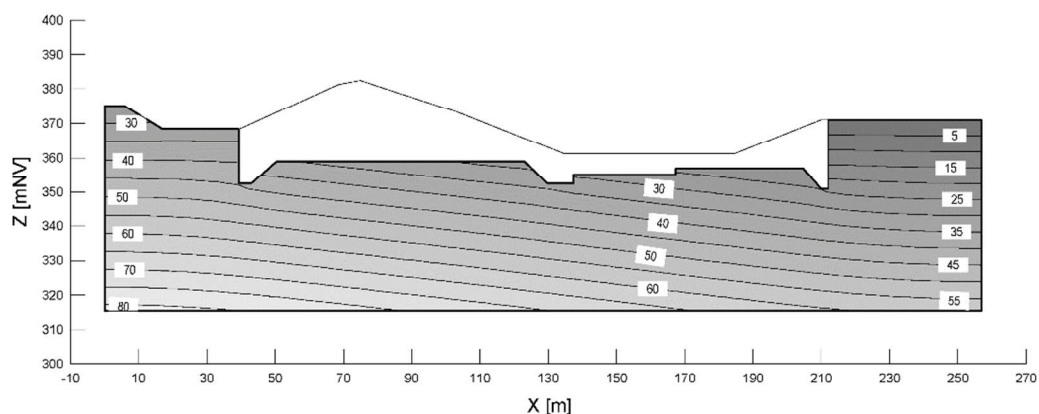
Изобарите на порен притисок се движат во интервал од (0 – 80) kN/m², што е во рамки на очекуваните вредности во согласност со водниот притисок и геометријата на средината (сл. 5).

Пресметувањето на филтрационото протекување во основата под браната е од витално значење при спроведување на анализата. Може да се забележи дека сумарното специфично филтрационо протекување се движи во границите од минимум $9,76 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ до $5,20 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ (0,08 l/s до 3,32 l/s). Околу узводниот, средишниот и низводниот забез, коишто служат токму за продолжување на патот на филтрацијата, се

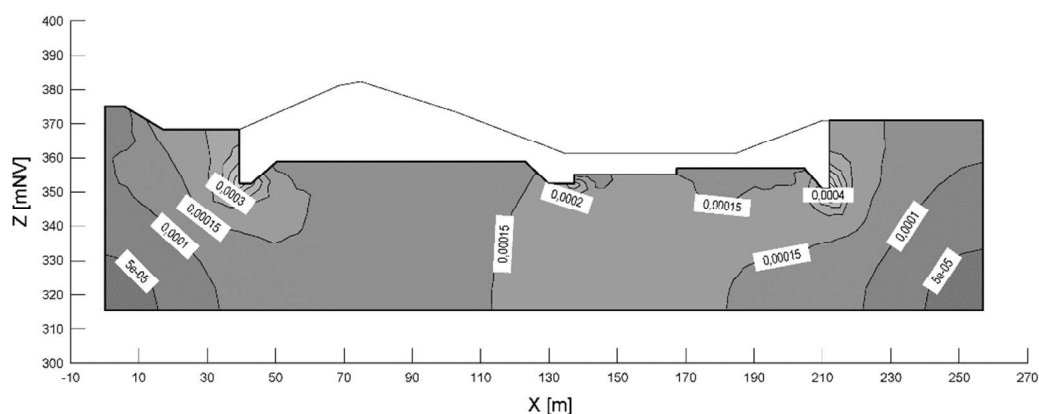
манифестираат највисоки вредности на специфичното филтрационо протекување, што е видно од концентрацијата на изолиниите во овие зони (сл. 6).



Слика 4. Мрежа на еквипотенцијални линии ($\phi = Z + h_w$ [m]) и на струјни линии за ниво на вода $Z_w = 400.4$ m, за случај бр. 1S

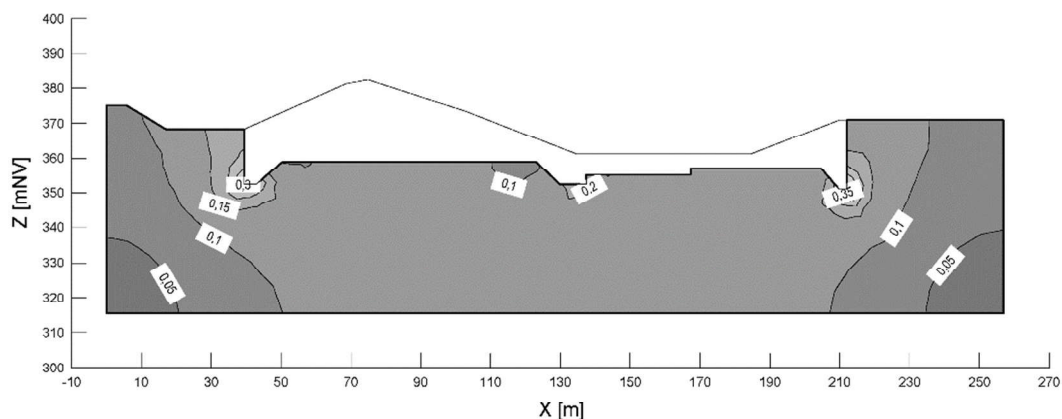


Слика 5. Мрежа на избобари на порен притисок $P_w = \gamma_w h_w$ [kN/m²] за ниво на вода $Z_w = 400.4$ m за случај бр. 1S



Слика 6. Специфично филтрационо протекување q [m³/s/m²] за случај бр. 1S

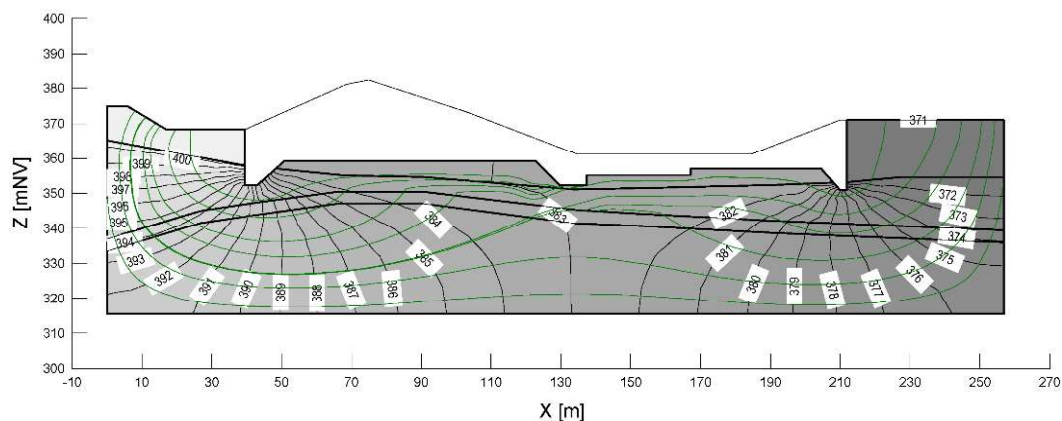
На слика 7 е прикажан сумарниот хидраулички градиент во XY-правец. Вредностите на хидрауличкиот градиент i_{xy} се движат во границите од 0,009 до 0,39. Максималните вредности на хидрауличките градиенти се забележуваат во зоната на узводниот и низводниот забег.



Слика 7. Изолинии на хидраулички градиент i_{xy} за ниво на вода $Z_w=400.4$ mNv за случај бр. 1S

3.1.2 Случај бр. 2S

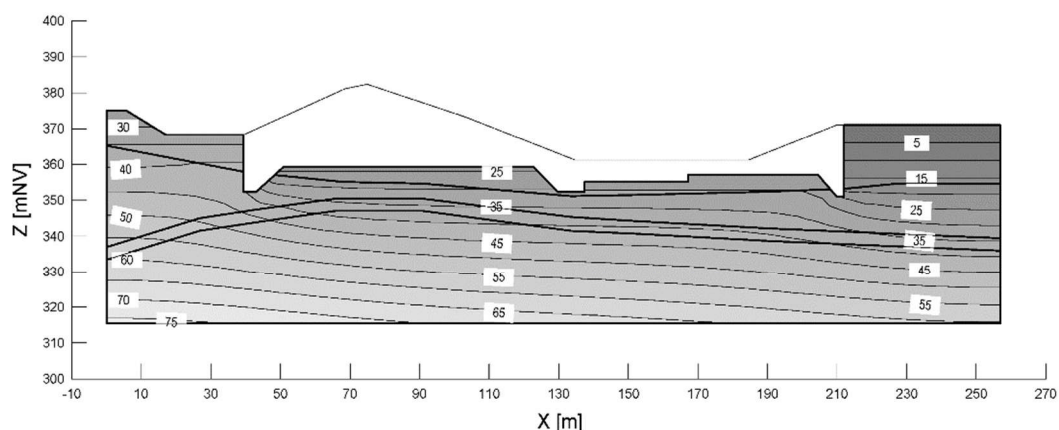
Вредностите и распределбата на еквипотенцијалните линии при случај бр. 2S се во согласност со очекувањата (сл. 8). Во предметниот случај бр. 2S може да се забележи дека, генерално, струјните и еквипотенцијалните линии образуваат криволинска мрежа на квадрати и може да се констатира дека нумеричката анализа е спроведена коректно. Распределбата на еквипотенцијалните линии за случај бр. 2S е со значително поразлична распределба на еквипотенцијалните линии споредено со случај бр. 1S. Имено, јасно се согледува одредена концентрација на еквипотенцијалните линии во зона на узводниот и низводниот забез и извесна релаксација во средишната зона на основата, што директно произлегува од филтрациониот отпор на средината и од протегањето на различните слоеви од геолошката средина [7].



Слика 8. Мрежа на еквипотенцијални линии ($\phi=Z+h_w$ [m]) и на струјни линии за ниво на вода $Z_w=400.4$ mNv, за случај бр. 2S

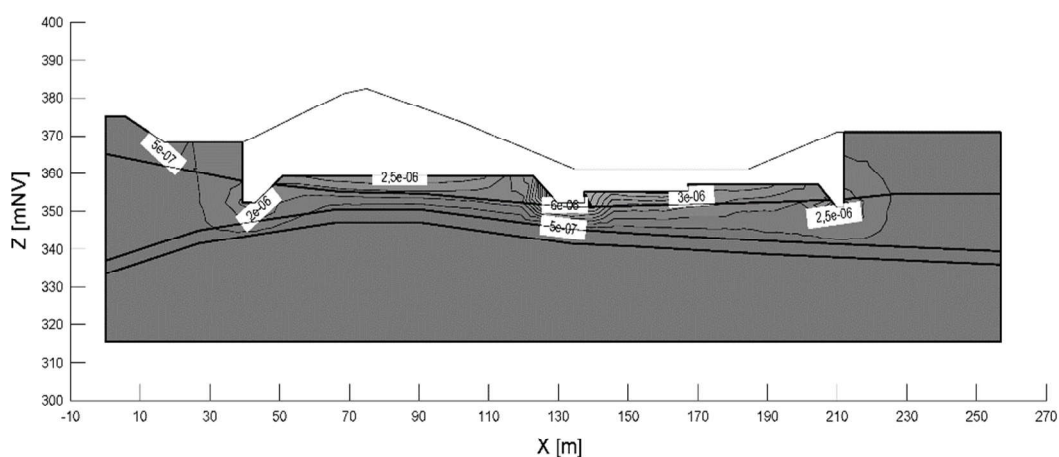
Вредноста на изобарите на порниот притисок се движи во границите од 0 до 76,44 kPa (сл. 9). Се забележува дека мрежата на изобари на порен притисок за случај бр. 2S е во голема мера слична со таа за случај бр. 1S.

Филтрационото протекување во основата под браната за случај бр. 2S значително се разликува од тоа за случај бр. 1S, пред сè поради различната прераспределба на слоевите, кои се карактеризираат со различна водопропустливост. Вредностите на сумарното проточно количество се движат во следниве граници ($1,47 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ - $9,34 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ ($1,03 \times 10^{-4}$ - $6,54 \times 10^{-2}$ l/s)). Максималните вредности се манифестираат во зоната на средишниот фундамент (сл. 10).

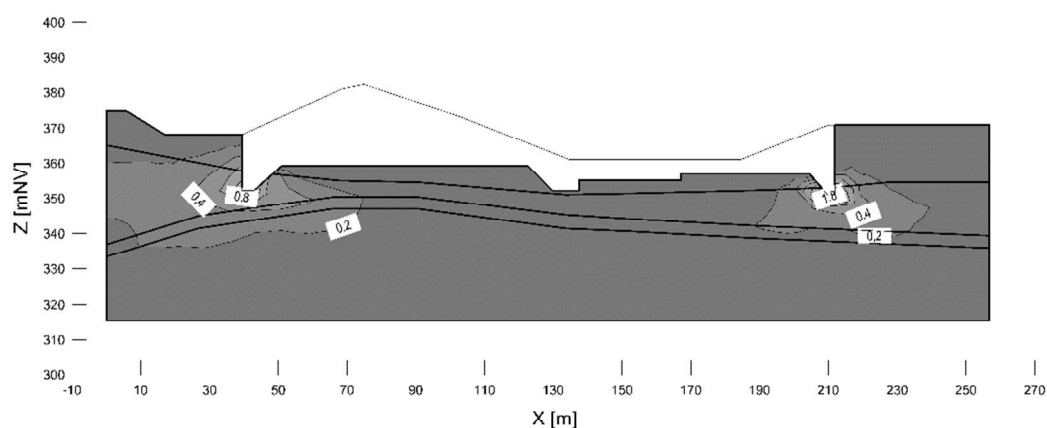


Слика 9. Мрежа на изобари на порен притисок $P_w = \gamma_w h_w$ [kN/m²] за ниво на вода $Z_w = 400.4$ mNV за случај бр. 2S

Хидрауличкиот градиент за случај бр. 2S достигнува максимална вредност 1,8 (сл. 11). Се забележува дека вредноста на хидрауличкиот градиент ја надминува критичната (1,0), со што се појавува ризик од манифестирање појава на внатрешна ерозија, а со тоа и загрозување на стабилноста на браната. Според тоа, потребно е да се преземат соодветни мерки, како, на пример, продолжување на патот на филтрацијата со изведба на низводна дренажа.



Слика 10. Специфично филтрационо протекување за случај бр. 2S



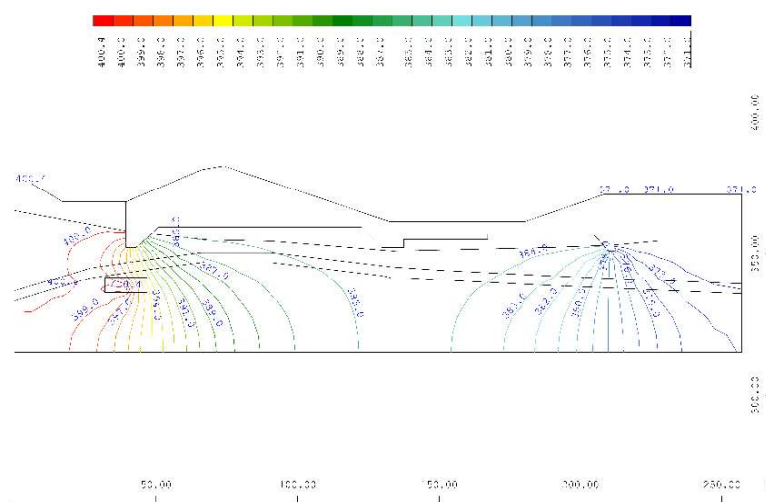
Слика 11. Изолинии на хидраулички градиенти i_{xy} за ниво на вода $Z_w = 400.4$ mNV, случај бр. 2S

3.2 Излезни резултати со програмскиот пакет SOFiSTiK/ HYDRA

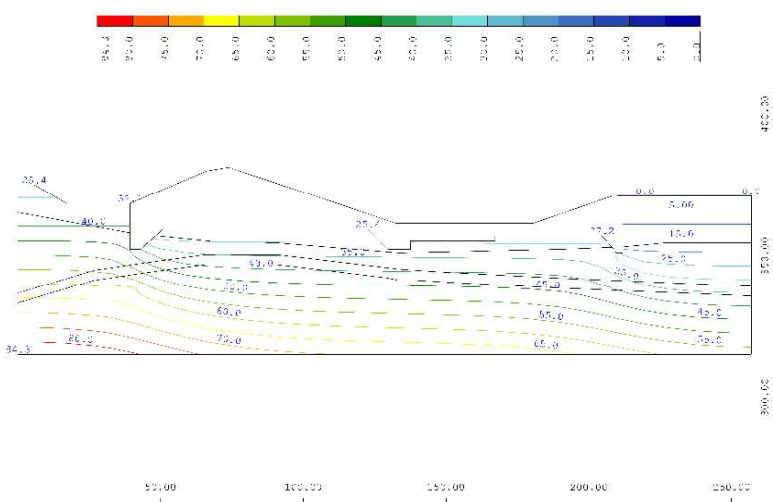
3.2.1 Случај бр. 2Н

На слика 12 е прикажана мрежата на екипотенцијалните линии за случај бр. 2Н. Вредностите на екипотенцијалните линии се во вообичаениот интервал и се во согласност со очекуваните големини и распределба. Главно се концентрирани во зоните околу узводниот и низводниот забец, додека има зона на релаксација во средишниот дел на основата. Распределеноста на слоевите во основата под браната, според очекувањата, и тука е од круцијално значење за распределбата на екипотенцијалните линии. Во споредба со случај бр. 2S се забележува слична распределба, со извесна разлика во узводниот дел на основата (во предметниот случај се забележува „благо прекршување“ на екипотенцијалните линии поради протегањето на различните слоеви).

Вредностите на порниот притисок за случај бр. 2Н се во вообичаениот интервал и се во согласност со очекуваните големини и распределба (сл. 13), со максимална вредност на порниот притисок од 84,3 kN/m². Во споредба со случај бр. 1S и случај бр. 2S се забележуваат, практично, идентична распределба и големини.

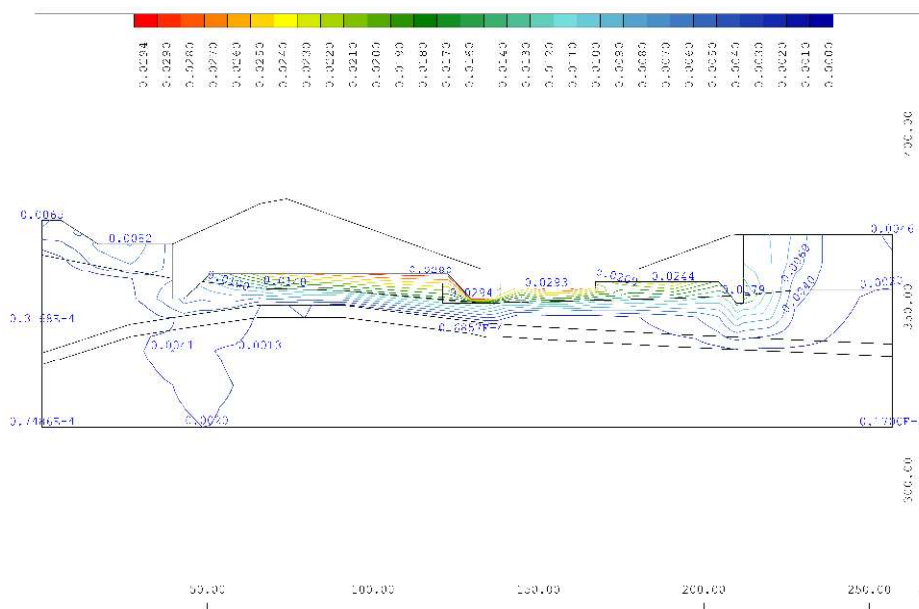


Слика 12. Мрежа на екипотенцијални линии ($\phi=Z+h_w$ [m]) за ниво на вода $Z_w=400.4$ m, за случај бр. 2Н



Слика 13. Мрежа на изобари на порен притисок $P_w=\gamma_w h_w$ [kN/m²] за ниво на вода $Z_w=400.4$ m, за случај бр. 2Н

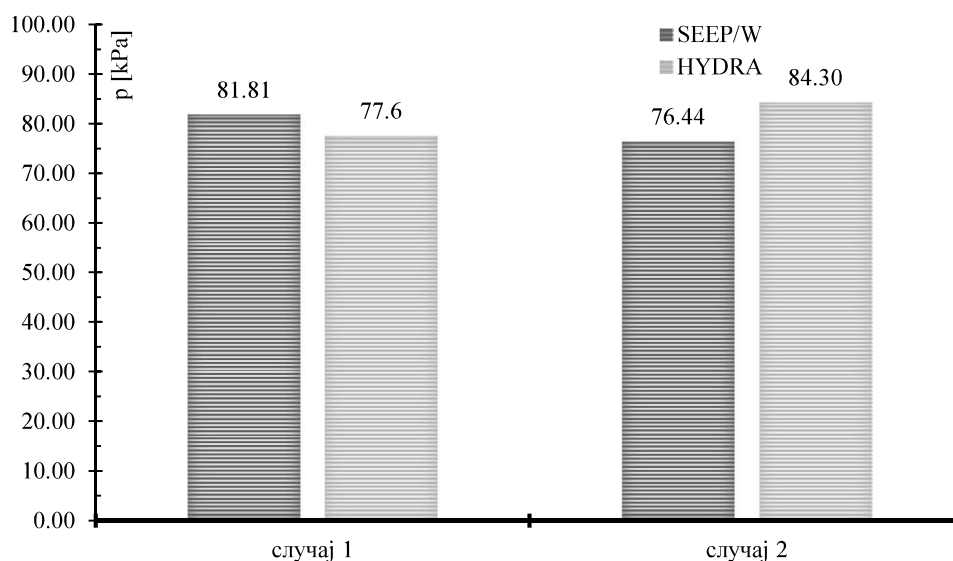
Филтрационото количество ја достигнува максималната вредност во зоната на средишниот забец (0,029 l/s), додека кон узводниот и низводниот дел и кон долната зона на основата под браната вредностите бележат постепено опаѓање (сл. 14). Во споредба со големините и распределбата на филтрационото протекување за случај бр. 2S (сл. 10), генерално, се забележува слична распределба (концентрација во зоната на средишниот забец, каде што се јавува и максималната вредност).



Слика 14. Филтрационно количество [l/s] за случај бр. 2H

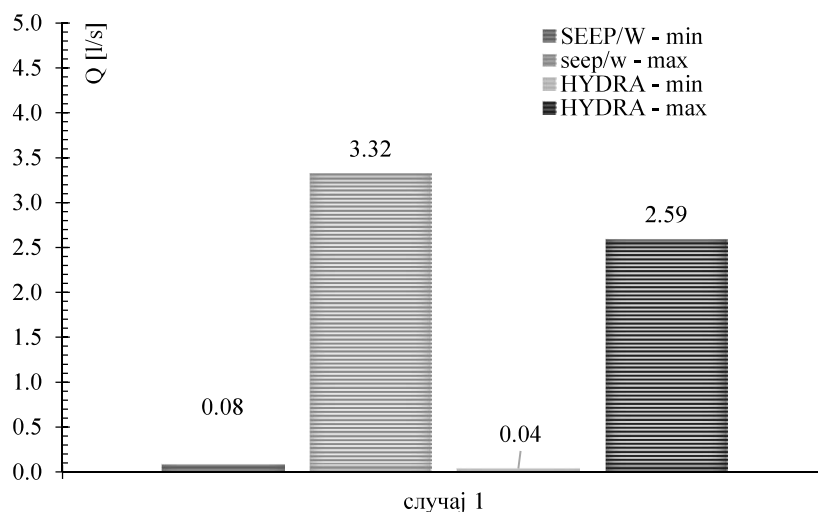
4. СПОРЕДБА НА ИЗЛЕЗНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ДОБИЕНИ СО ПРИМЕНА НА МОДУЛИТЕ SEEP/W И HYDRA

На слика 15 е даден споредбен приказ на вредностите на порниот притисок за двата анализирани случаи, со примена на модулите SEEP/W и HYDRA, од каде што се согледува дека тие се со незначителна разлика, т.е. практично се идентични.

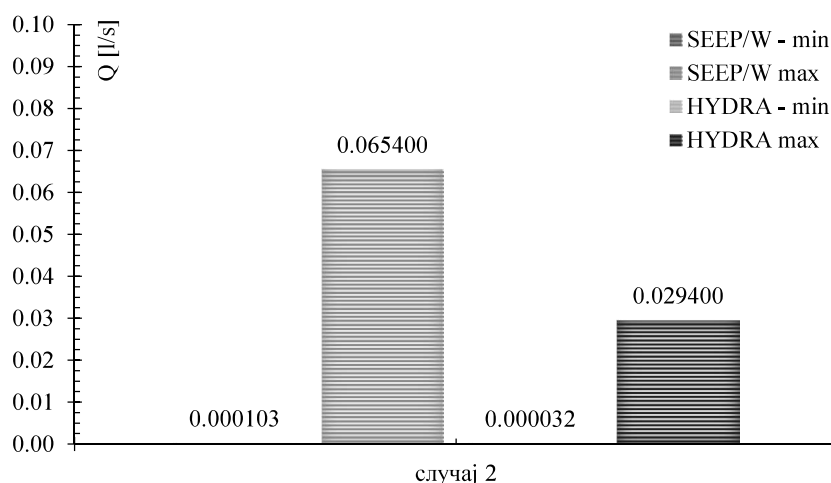


Слика 15. Споредба на вредностите на порните според модули SEEP/W и HYDRA

Аналогно, на слика 16 и слика 17 е прикажана споредбата на вредностите за филтрационото количество за анализираниите случаи со примена на модулите SEEP/W и HYDRA, од каде што се согледува дека тие бележат добро совпаѓање.



Слика 16. Споредба на филтрационото количество за случај бр. 1 според SEEP/W и HYDRA



Слика 17. Споредба на филтрационото количество за случај бр. 2 според SEEP/W и HYDRA

5. ЗАКЛУЧОК

Врз основа на проучувањето на спроведената нумеричка анализа со примена на методот на конечни елементи на процесот на филтрација под телото на бетонската брана, се изведуваат следниве заклучоци:

1. При проектирање и градба на браните еден од клучните аспекти за стабилноста на основата под браната е водонепропустливоста, т.е. процесот на филтрација под телото на браната, како негативна појава која може да ја загрози стабилноста на браната. Во согласност со тоа, потребно е да се определи филтрационата јакоста на основата и да се предвидат соодветни мерки за намалување на штетното дејство на филтрацијата.
2. Првите анализи на проблемот со филтрацијата датираат уште од крајот на деветнаесеттиот и почетокот на дваесеттиот век, започнувајќи со теоријата на хидраулички градиент, воспоставена од Џ. С. Бересфорд. Бројни научници даваат

свој придонес кон развојот на методи за проучување на оваа проблематика, меѓу кои како позначајни може да се наведат Блај, Е. Лејн, А. Н. Косла, К. Терцаги, П. Форхајмер и А. Казагранде.

3. Во првата половина од дваесеттиот век доаѓа до значаен развој на кибернетиката како наука, што директно придонесува за развој на нумерички методи, меѓу кои предничат методот на конечни разлики и методот на конечни елементи.
4. Во овој реферат е извршена анализа на процесот на филтрација под телото на брана, т.е. за студија на случај за браната „Шахпурканди“, која се изведува на реката Рави во Индија. Анализата е спроведена со нумерички модел на основата под телото на браната со примена на модулот SEEP/W од програмскиот пакет Geo Studio и модулот Hydra од програмскиот пакет SOFiSTiK.
5. Во рамки на нумеричките модели се третираат два случаи на протегање на слоевите во основата под браната, и тоа: во случај бр. 1 (хомогена изотропна средина) и случај бр. 2 (нехомогена средина) со, главно, хоризонтално протегање на геолошките формации и со варијација на коефициентот на филтрација за различните материјали.
6. Врз основа на добиените излезни резултати од нумеричкиот модел со примена на модулот SEEP/W може да се издвојат следниве согледувања:
 - 6.1. Вредностите на екипотенцијалните линии се движат во очекуваните гранични големини од 371,0 mmv до 400,4 mmv и со распределба која е во согласност со очекувањата за сите два анализирани случаи и може да се заклучи дека нумеричката анализа е спроведена коректно. Распределбата на екипотенцијалните линии за случај бр. 2S е со значително поразлична распределба на екипотенцијалните линии, споредено со случај бр. 1S, при што се согледува одредена концентрација на екипотенцијалните линии во зона на узводниот и низводниот забец и извесна релаксација во средишната зона на основата, што директно произлегува од филтрациониот отпор на средината и од протегањето на различните слоеви од геолошката средина.
 - 6.2. Изобарите на порен притисок се движат во интервал (0 – 80) kN/m², што е во рамки на очекуваните вредности во согласност со водниот притисок и геометријата на средината и може да се заклучи дека тие се карактеризираат со, практично, иста распределба и вредности на порниот притисок за двата анализирани случаи.
 - 6.3. Сумарното филтрационо протекување за случај бр. 1S се движи во интервал (0,08 l/s - 3,32 l/s). Околу узводниот, средишниот и низводниот забец, коишто служат токму за продолжување на патот на филтрацијата, се манифестираат највисоки вредности на специфичното филтрационо протекување, што е видно од концентрацијата на изолините во овие зони. Големината за филтрационото протекување во основата под браната за случај бр. 2S (интервални вредности 1,03x10⁻⁴ l/s - 6,54x10⁻² l/s) значително се разликува од хомогената средина при случај бр. 1S, при што разликата се должи на различното протегање на слоевите, кои се карактеризираат со различна водопропустливост.
 - 6.4. Вредностите на хидрауличкиот градиент i_{xy} за случај бр. 1S се со интервални големини 0,009 - 0,39, при што максималните вредности се јавуваат во зоната на узводниот чеп, при што заклучокот е дека хидрауличкиот градиент не ја достигнува критичната вредност и е во рамки на дозволените вредности за типот на почвената средина. Максималната вредност на хидрауличкиот градиент i_{xy} за случај бр. 2S е во зоната на низводниот забец, слично како и за случај бр. 1S и изнесува 1,8. Може да се заклучи дека е потребно преземање противфилтрациони мерки за продолжување на патот на филтрацијата или преку изведба на низводен дренажен ров, со цел наведената вредност за хидрауличкиот градиент да е во

границите на дозволените вредности за да не дојде до нарушување на казуалната филтрациона јакост, $J_{\text{doz}}=0.2\div 1.0$ за некохерентни и кохерентни материјали во основата под браната.

7. Врз основа на добиените излезни резултати од нумеричкиот модел со примена на модулот HYDRA може да се издвојат следниве согледувања:
 - 7.1. Вредностите на екипотенцијалните линии се во вообичаениот интервал и се во согласност со очекуваните големини и распределба и за случај бр. 2Н. Тие, главно, се концентрирани во зоните околу узводниот и низводниот забец, додека има зона на релаксација во средишниот дел на основата. Во споредба со случај бр. 2S, се забележува слична распределба, со извесна разлика во узводниот дел на основата (појава на „благо прекршување“ на екипотенцијалните линии поради протегањето на различните слоеви).
 - 7.2. Вредностите на порниот притисок за случај бр. 2Н се во вообичаениот интервал и се во согласност со очекуваните големини (максимална вредност на порниот притисок е 84,3 kPa) и распределба. Во споредба со случај бр. 2S, се забележуваат, практично, идентична распределба и големини.
 - 7.3. Во споредба со распределбата и големините за филтрационото протекување од случај бр. 2Н, може да се забележи значителна разлика во распределбата и значителна разлика во добиените големини, повторно како резултат на вредностите на коефициентот на филтрација и протегањето на слоевите. Во споредба со големините и распределбата на филтрационото протекување за случај бр. 2S, генерално, се забележува слична распределба (концентрација во зоната на средишниот забец).
8. Од споредбата на резултатите добиени со примена на двата модули (SEEP/W и HYDRA) може да се констатира дека, генерално, се добиваат слични вредности за потенцијалот, порниот притисок и за хидрауличкиот градиент. Заклучок е дека се потврдува доверливоста на нумеричката анализа спроведена со двата модули како и на излезните големини, според кои се донесуваат одлуки во однос на филтрационата стабилноста на основата под телото на браната.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Saleh L. A. (2018): Studying the seepage phenomena under a concrete dam using SEEP/W and Artificial Neural Network models. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 433 012029, p. 15.
- [2] Arora N., Deexit G., Jain K. N. (2021): Unique design of concrete gravity high dam on permeable foundations – application of numerical simulation tool. ICOLD Symposium on Sustainable Development of Dams and River Basins. New Delhi, India, p. 8.
- [3] Seep User Manual. (2012): Seepage Modeling with SEEP/W, An Engineering Methodology. GEO-SLOPE International Ltd., p. 199.
- [4] SOFiSTiK User Manual. (2018): Verification Manual, Mechanical Benchmarks. SOFiSTiK AG, Oberschleissheim, Germany, p. 249.
- [5] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. (2013): The Finite Element Method, It's Basis & Fundamentals. Elsevier Ltd., Oxford, UK, p. 753.
- [6] Terzaghi K., Peck B. R., Mesri G. (1996): Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, Inc., New York, US, pp. 213-222.
- [7] Chen S. H. (2019): Computational geomechanics and hydraulic structures. Springer Nature Singapore Pte LTD. Singapore, pp. 189-385