

ДГКС

Друштво грађевинских  
конструктора Србије



ASES

Association of Structural  
Engineers of Serbia

S-30

Simpozijum 2020  
Symposium 2020

*Uroš Mirković<sup>1</sup>, Slobodan Radovanović<sup>2</sup>, Nikola Divac<sup>3</sup>, Snežana Vulović<sup>4</sup>*

## **UTICAJ ZAVESE I DRENAŽNIH BUŠOTINA NA FILTRACIONU SLIKU U TEMELJNOJ SPOJNICI GRAVITACIONIH BRANA**

### **Rezime:**

U radu je prikazana analiza uticaja injekcione zavesa i drenažnih bušotina na filtracionu sliku u temeljnoj spojnici kod gravitacione brane. Analiza je urađena na MKE modelu dodate elektrane objekta HE „Đerdap 2“. Proračunom su dobijene filtracione sile za zadato stanje konturnih uslova kao i ukupna vrednost sile uzgona u zoni temeljne spojnice u četiri proračunske situacije.

*Ključne reči: injekciona zavesa, drenažne bušotine, temeljna spojnica, filtracija, uzgon, MKE*

## **INFLUENCE OF CURTAIN AND DRAINAGE WELLS ON THE FILTRATION PICTURE IN THE FOUNDATION OF GRAVITY DAMS**

### **Summary:**

The paper presents an analysis of the influence of the injection curtain and drainage wells on the filtration image in the foundation joint at the gravity dam. The analysis was performed on the FEM model of the added power plant of the HPP "Đerdap 2". The calculation obtained filtration forces for a given state of contour conditions as well as the total value of uplift force in the zone of the foundation joint in four calculation situations.

*Key words: injection curtain, drainage wells, foundation joint, filtration, uplift force, FEM*

<sup>1</sup> mast. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Republika Srbija, [urkemir@gmail.com](mailto:urkemir@gmail.com)

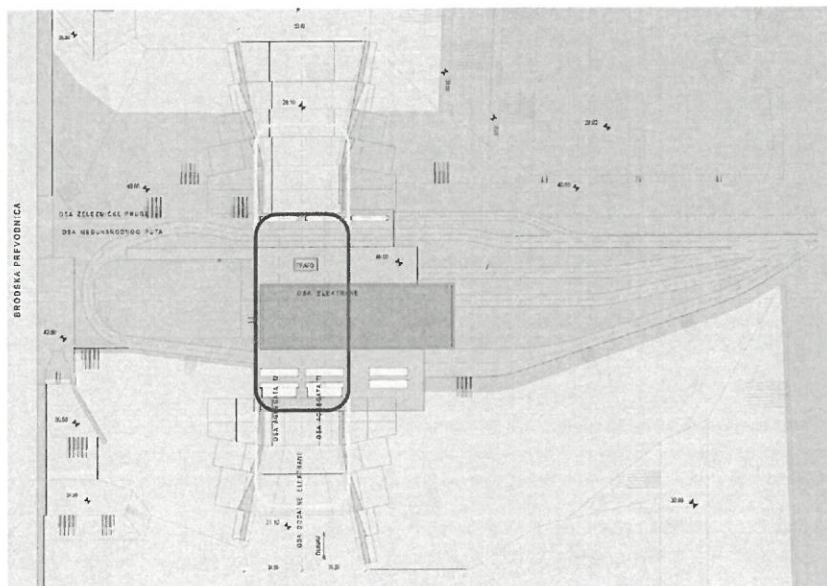
<sup>2</sup> mast. inž. građ., asistent, Građevinski fakultet i Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Republika Srbija, [slobodan.radovanovic@jcerni.rs](mailto:slobodan.radovanovic@jcerni.rs)

<sup>3</sup> mast. inž. građ., student doktorskih studija, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Republika Srbija, [nikola.divac@jcerni.rs](mailto:nikola.divac@jcerni.rs)

<sup>4</sup> dr, naučni saradnik, Institut za informacione tehnologije, Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac, Republika Srbija, [vsneza@kg.ac.rs](mailto:vsneza@kg.ac.rs)

## 1. PODACI O OBJEKTU

Dodatna elektrana objekta HE „Đerdap 2“ locirana je na glavnom toku Dunava, na prethodno izgrađenoj nasutoj brani između brodske prevodnice i desne obale. Osa dodatne elektrane nalazi se na 128,0 m od ose srpske prevodnice ka obali. Objekat se sastoji od bloka agregata u kome su smeštena 2 agregata snage po 27,0 MW i od montažnog bloka.



Slika 1 - Osnova dodatne elektrane objekta HE „Đerdap 2“

## 2. TEORIJSKE OSNOVE FILTRACIONIH PROCESA

Osnovnu jednačinu, koja definiše zakon strujanja podzemne vode (u laminarnom režimu tečenja), postavio je Darsi (Henry Darcy) 1856. godine. Darsijev zakon se može izraziti sledećom jednačinom:

$$q = -ki \quad (1)$$

gde je  $i$  gradijent potencijala  $\varphi$

$$i = \nabla \varphi \quad (2)$$

Potencijal je definisan kao:

$$\varphi = \frac{p}{\gamma} + h \quad (3)$$

gde je  $p$  porni pritisak tečnosti,  $\gamma$  specifična težina tečnosti, a  $h$  visina merenog mesta u vertikalnom pravcu, merena u odnosu na izabranu referentnu ravan (najčešće je referentna ravan nivo mora). [1]

Matrica permeabilnosti  $\mathbf{k}$  za ortotropni materijal ima oblik:

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}$$

gde su  $k_x$ ,  $k_y$  i  $k_z$  koeficijenti filtracije u x, y, z pravcu. Operator  $\nabla$  je

$$\nabla^T = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

Na osnovu jednačine kontinuiteta  $\nabla^T \mathbf{q} = 0$  i Darsijevog zakona (1), izvodi se hidrodinamička jednačina za nestacionarno strujanje, koja ima sledeći oblik:

$$\nabla^T (\mathbf{k} \nabla \varphi) + \mathbf{Q} = \mathbf{S} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (4)$$

gde je  $\mathbf{Q}$  zapreminski fluks (izvor ili ponor, kao količina tečnosti po jedinici zapremine porozne sredine);  $\mathbf{S}$  je efektivna poroznost sloja podeljena sa debljinom sloja - za slobodno strujanje, a specifična izdašnost (akumulativnost) - za ograničeno (potopljeno) strujanje. Ukoliko je strujanje stacionarno desna strana jednačine (4) jednaka je nuli. [1]

Granični uslovi koji se sreću u rešavanju problema strujanja kroz poroznu sredinu, opisanog gornjim jednačinama mogu biti:

a) zadat potencijal

$$\varphi = \bar{\varphi}(t) \text{ na } \Gamma_1,$$

b) zadat površinski protok (fluks)

$$\mathbf{q}_n = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \bar{q}(t) \text{ na } \Gamma_2.$$

Na slobodnoj površini i površini sa curenjem važe sledeći uslovi:

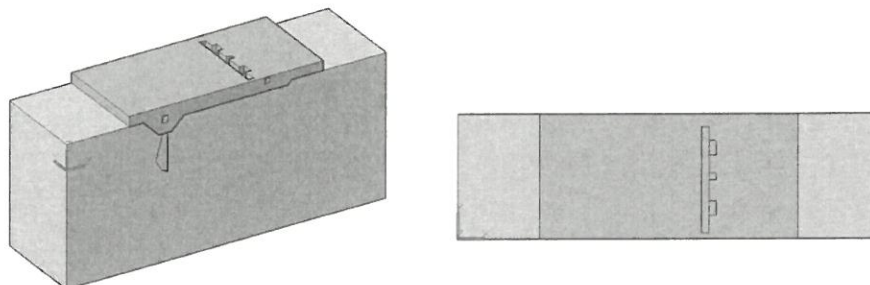
$$\mathbf{p} = 0, \varphi = z(t), \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \text{ na } \Gamma_3.$$

gde su  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ , i  $\Gamma_3$  delovi površine kontinuuma,  $\mathbf{n}$  je normala na graničnu površinu, a  $t$  vreme. [1]

### 3. TRODIMENZIONALNI STRUKTURNI I MKE MODEL

Za potrebe izrade MKE modela dodatne elektrane najpre je formiran trodimenzionalni strukturni model obeleženog dela objekta (Slika 1, pri čemu je crveno - betonski deo dodatne elektrane a žuto - stenska masa). [2] Montažni blok dodatne elektrane nije uzet u obzir kao ni betonski deo objekta uzvodno i nizvodno od granice koja je označena crvenom bojom jer su isti dilatacionim razdelnicama odvojeni od glavnog betonskog dela objekta.

Trodimenzijski geometrijski model (Slika 2) obuhvata deo dodatne elektrane ispod kote 14,1 m sa pripadajućom stenskom masom. Dimenzije modela u osnovi su 128,4 x 38,0 m. Granice modela su produžene 25 m uzvodno i nizvodno od krajnjih ivica betonskog dela objekta koji je modeliran. Najniža kota modela je na -45,9 m [2].

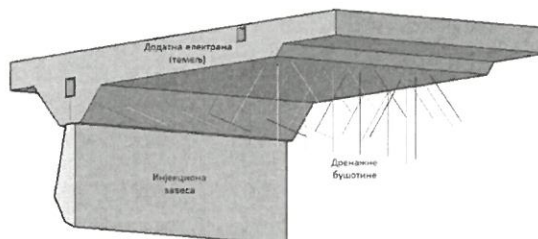


*Slika 2 - Izgled geometrijskog modela dodatne elektrane*

Za potrebe prikaza rezultata, postavljen je novi lokalni koordinatni sistem sa koordinatnim početkom u donjem levom uglu (Slika 2), pozitivnim smerom X ose u pravcu toka reke i Y ose ka levoj obali.

Na objektu ne postoji injkciona zavesa i drenažne bušotine ali su za potrebe ove analize injkciona zavesa i 32 drenažne bušotine uvedeni u proračun kako bi se sagledali uticaji ovih elemenata na filtracionu sliku objekta (Slika 3).

Betonski deo dodatne elektrane ispod kote 14,1 m modeliran je jednim zapreminskim telom - 3D solidom. Pripadajuća stenska masa modelirana je jednim zapreminskim telom - 3D solidom. Injkciona zavesa modelirana je jednim zapreminskim telom - 3D solidom. Drenažne bušotine (32 kom.) su modelirane linijskim elementima.

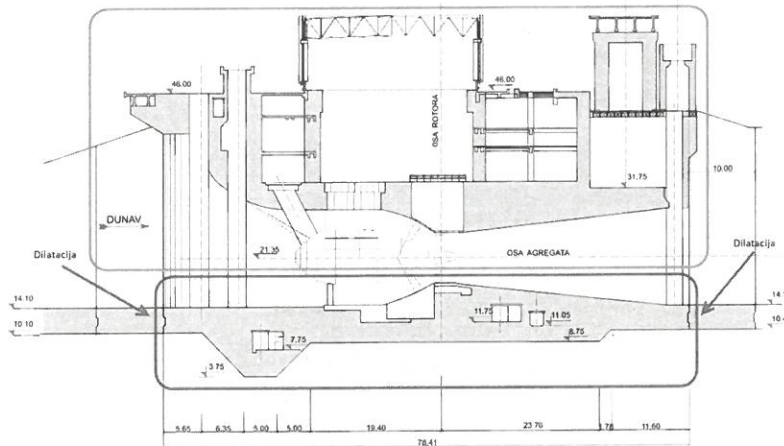


*Slika 3 - Prikaz elemenata modela*

Na Slici 4, crvenom bojom je označen betonski deo objekta koji je modeliran za potrebe filtracione analize. Zeleno uokvireni deo izostavljen je u filtracionim proračunima kao deo koji nije od značaja za filtracione procese.

U model uvedena injkciona zavesa, koja bi se izvela iz uzvodne galerije na koti 7,75 m, ima više važnih uloga: smanjenje gubitka vode kroz temelje objekta, stabilnost tla odnosno objekta u odnosu na mehaničku sufoziju i sprečavanje mogućnosti stvaranja koncentrisanih tokova u tlu ispod objekta. Dubina modelirane injkcione zavese iznosi 15 m.





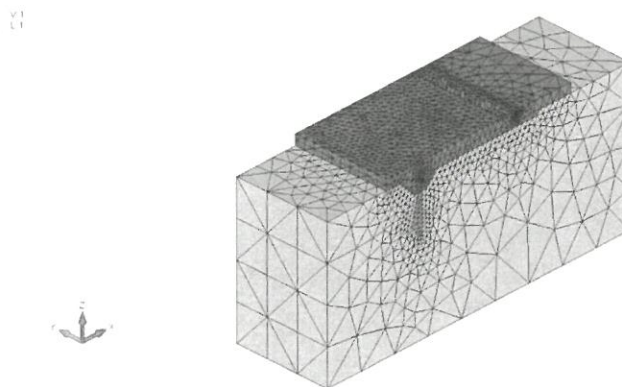
*Slika 4 - Prikaz granica modeliranog betonskog dela dodatne elektrane*

Modelirane drenažne bušotine imaju ulogu smanjenja uzgonskih pritisaka u zoni temeljne spojnice. Pretpostavljene su 32 drenažne bušotine koje su raspoređene u 9 profila. Dužina svake bušotine je 15 m. Pretpostavka je da je prečnik svih drenažnih bušotina 85,0 mm.

Kao što je već ranije navedeno, trodimenzionalni model brane obuhvata i okolni teren i to 25 m nizvodno i uzvodno od krajnjih ivica betonskog dela objekta koji je modeliran, a po dubini do kote -45,9 mm.

Za potrebe modeliranja filtracionih procesa formiran je trodimenzionalni MKE model (Slika 5) primenom metode konačnih elemenata. [2]

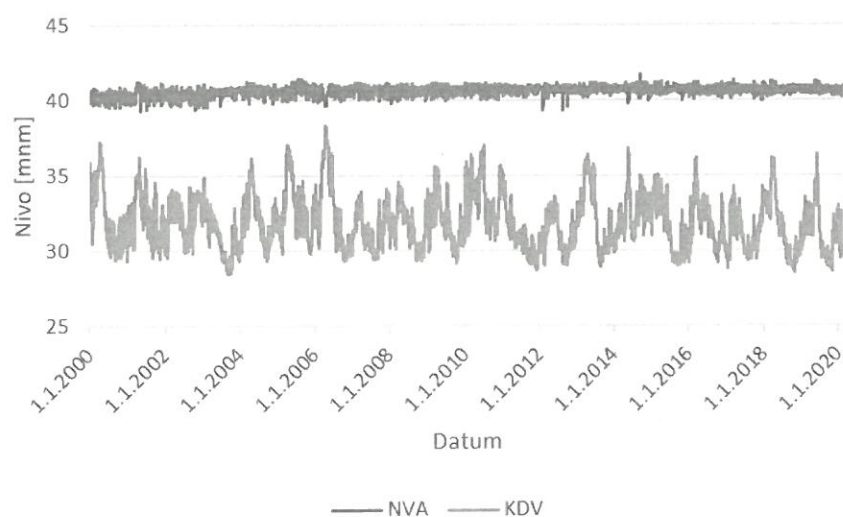
MKE model je formiran na osnovu prethodno izrađenog trodimenzionalnog strukturnog modela, inženjersko - geološke građe terena i eksploatacionih uslova na terenu. MKE model je formiran u programskom paketu FEMAP [3].



*Slika 5 - Trodimenzionalni MKE model*

Mreža konačnih elemenata je kreirana korišćenjem tetraedarskih konačnih elemenata sa međučvorovima (10 čvorova po elementu). Model se sastoji od 205894 elemenata i 280255 čvorova.

Na uzvodnom licu terena i betona, zadat je potencijal koji je jednak koti gornje vode (41 mm - odgovara koti normalnog uspora), dok je na nizvodnom licu objekta i terena zadat potencijal koji je jednak koti donje vode (31 mm - približno prosečan nivo donje vode u toku 2017. godine).



Slika 6 - Prikaz nivoa gornje (NVA) i donje vode (KDV) u poslednjih 20 godina

Svi procesi koje opisuje MKE filtracioni model mogu se definisati kroz koeficijente filtracije  $k$  [m/s] kao materijalne parametre (parametri kojima je definisana vodopropusnost svake zone). Za modeliranje filtracionih procesa, kao parametri se definišu koeficijenti filtracije koji su dati u sledećoj tabeli za svaki od modeliranih elemenata. Parametri su usvojeni na osnovu dostupne dokumentacije o objektu kao i iz stručne literature.

Tabela 1 - Filtracioni parametri materijala korišćeni pri proračunu

Materijal	Koeficijent filtracije (m/s)
Betonski deo objekta	$10^{-11}$
Stenska masa	$10^{-7}$
Injekciona zavesa	$10^{-9}$
Drenažne bušotine	$10^{-3}$

#### 4. PRORAČUNSKE SITUACIJE

Prva proračunska situacija podrazumeva slučaj kada u proračun nisu uključene ni injecciona zavesa ni drenažne bušotine.

Druga proračunska situacija podrazumeva slučaj kada je u proračun uključena injecciona zavesa dok su sve drenažne bušotine isključene.

Treća proračunska situacija podrazumeva slučaj kada su u proračun uključene sve drenažne bušotine dok je injecciona zavesa isključena.

Četvrta proračunska situacija podrazumeva slučaj kada su u proračun uključene i injecciona zavesa i drenažne bušotine.

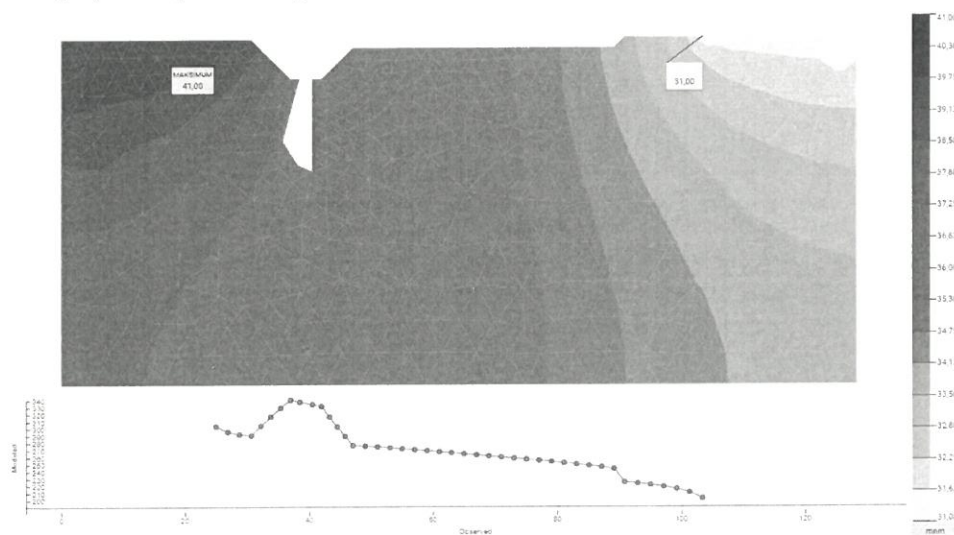
#### 5. REZULTATI PRORAČUNA

Proračuni su izvršeni u programskom paketu PAK [4, 5].

Filtracioni proračun se sprovodi tako što se zadaju konturni uslovi po kotama gornje i donje vode u okviru proračunskih situacija. Kao rezultat dobijaju se filtracione sile za zadato stanje konturnih uslova i ukupna vrednost sile uzgona u zoni temeljne spojnice.

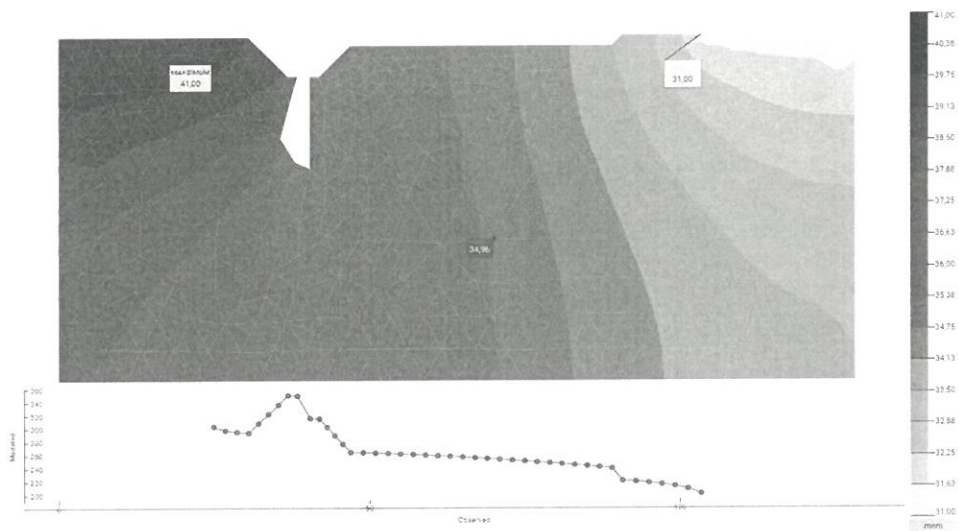
Prikaz rezultata je dat kroz presek po osi bloka dodatne elektrane.

Ukupna vrednost sile uzgona na spojnici između betona i stenske mase za prvu proračunsku situaciju (nisu uključene ni injecciona zavesa ni drenažne bušotine) iznosi  $U= 631\ 205\ \text{KN}$ .



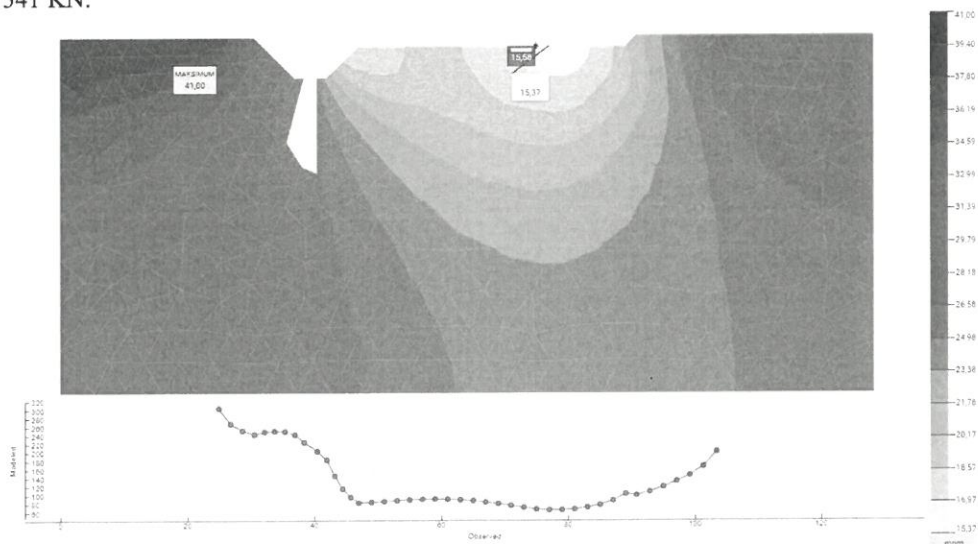
Slika 7 - Pijezonivo [mm] i porni pritisak [kPa] za prvu proračunsku situaciju

Ukupna vrednost sile uzgona na spojnici između betona i stenske mase za drugu proračunsku situaciju (uključena injecciona zavesa dok su sve drenažne bušotine isključene) iznosi  $U= 617\ 818\ \text{KN}$ .



Slika 8 - Pijezonivo [mm] i porni pritisak [kPa] za drugu proračunsku situaciju

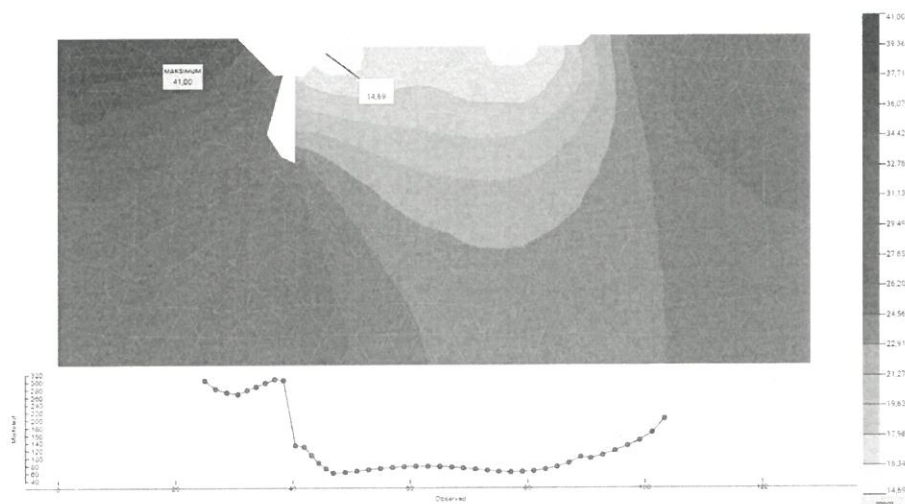
Ukupna vrednost sile uzgona na spojnici između betona i stenske mase za treću proračunsku situaciju (uključene sve drenažne bušotine dok je injekciona zavesa isključena) iznosi  $U = 255\,541$  KN.



Slika 9 - Pijezonivo [mm] i porni pritisak [kPa] za treću proračunsku situaciju

Ukupna vrednost sile uzgona na spojnici između betona i stenske mase za četvrtu proračunsku situaciju (uključene i injekciona zavesa i drenažne bušotine) iznosi  $U = 244\,387$  KN.





Slika 10 – Pijezonivo [mm] i porni pritisak [kPa] za četvrtu proračunsku situaciju

## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih rezultata, može se uočiti značajna promena sile uzgona kombinovanjem dva sistema koji se najčešće primenjuju za redukciju ove sile kod gravitacionih betonskih brana. Najveća uzgonska sila javlja se u slučaju kada konstrukcija nema niti jedan od prikazanih sistema. Sa druge strane, najmanja sila javlja se u slučaju kada objekat ima izvedenu injekcionu zavesu i sistem pravilno raspoređenih drenažnih bušotina. Posmatrajući ove sisteme izdvojeno, na posmatranom modelu i za definisane parametre materijala, značajno bolji efekat se postiže izvođenjem drenažnih bušotina u odnosu na izvedenu injekcionu zavesu..

## LITERATURA

- [1] Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Sistem za upravljanje bezbednošću brane HE "Đerdap 2" v2019, Knjiga 9 - Izveštaj o teorijskim osnovama, algoritmima i numeričkim solverima MKE modela termičkih, filtracionih i naponsko-deformacionih procesa, Beograd, 2019.
- [2] Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Sistem za upravljanje bezbednošću brane HE "Đerdap 2" v2019, Knjiga 10 - Izveštaj o preliminarnim analizama primenom MKE modela filtracionih i naponsko - deformacionih procesa na brani, Beograd, 2019.
- [3] Siemens. FEMAP User Guide Version 11.2 2015.
- [4] Živković M, Vulović S, Kojić M, Slavković R, Grujović N. Program for FE Analysis of Flow Through Porous Media, 2019.
- [5] Živković M, Vulović S, Kojić M, Slavković R, Grujović N. User manual and examples for PAK-P - Program for FE Analysis of Flow Through Porous Media, Kragujevac: Faculty of Engineering, University of Kragujevac, 2019.

Društvo građevinskih konstruktora Srbije

SIMPOZIJUM 2020

13-15. maj 2021- ARANĐELOVAC

# ZBORNİK RADOVA SA NACIONALNOG SIMPOZIJUMA DGKS



U SARADNJI SA



Република Србија  
Министарство  
просвете, науке и  
технолошког развоја

POKROVITELJ



PLATINASTI SPONZORI

Metal **link** ara

ŠIRBEGOVIĆ®  
INŽENJERING

DELTA  
REAL ESTATE

balini  
studio

INTERNATIONAL

STRABAG  
TEAMS WORK.

PUT INŽENJERING

ZLATNI SPONZORI



PERI

MG  
PRECAST OOO.

ARMONT  
LICA ZGRADA

MORAVACEM  
A CRH COMPANY

ProClub

DNEC

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

624(082)(0.034.2)  
69(082)(0.034.2)

ДРУШТВО грађевинских конструктора Србије. Симпозијум 2020 (2021 ; Аранђеловац)  
Зборник radova sa Nacionalnog simpozijuma DGKS [Elektronski izvor] / Друштво  
грађевинских конструктора Србије, Симпозијум 2020, 13-15. мај 2021, Аранђеловац ; [уредници  
Златко Марковић, Иван Игњатовић, Бошко Стевановић]. - Београд : Универзитет, Грађевински  
факултет : Друштво грађевинских конструктора Србије, 2021 (Аранђеловац : Графопак). - 1 USB  
fleš memorija ; 5 x 2 x 1 cm

Sistemska zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Radovi na srp. i  
engl. jeziku. - Tiraž 200. - Bibliografija uz svaki rad. - Summaries.

ISBN 978-86-7518-211-5 (GF)

а) Грађевинарство -- Зборници  
COBISS.SR-ID 37696777

**Izdavač:** **Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet**  
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/I

**Suizdvač:** **Društvo građevinskih konstruktera Srbije**  
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

**Urednici:** prof. dr Zlatko Marković  
v.prof. dr Ivan Ignjatović  
prof. dr Boško Stevanović

**Tehnički urednik:** v.prof. dr Jelena Dobrić

**Tehnička priprema:** doc. dr Nina Gluhović  
doc. dr Marija Todorović  
Isidora Jakovljević

**Grafički dizajn:** Tijana Stevanović

**Dizajn korica:** Tijana Stevanović

**Štampa:** Grafopak, Arandelovac

**Tiraž:** 200 primeraka

**Beograd, maj 2021.**



<b>S-30</b>	<i>Uroš Mirković, Slobodan Radovanović, Nikola Divac, Snežana Vulović -</i> UTICAJ ZAVESE I DRENAŽNIH BUŠOTINA NA FILTRACIONU SLIKU U TEMELJNOJ SPOJNICI GRAVITACIONIH BRANA .....	407
<b>S-31</b>	<i>Uroš Mirković, Vladan Kuzmanović, Goran Todorović -</i> TERMIČKA ANALIZA GRAVITACIONE BETONSKE BRANE U FAZI IZGRADNJE I EKSPLOATACIJE .....	416
<b>S-32</b>	<i>Uroš Mirković, Vladan Kuzmanović -</i> PRORAČUN TERMIČKIH NAPONA GRAVITACIONE BETONSKE BRANE U FAZI IZGRADNJE I EKSPLOATACIJE .....	426
<b>S-33</b>	<i>Faris Trešnjo, Azra Mahinić -</i> PRIMJENA METODE PRITISNUTIH ŠTAPOVA I ZATEGA NA VISOKOSTIJENOM NOSAČU .....	436
<b>S-34</b>	<i>Petar Subotić, Duško Lučić -</i> PREGLED METODA ZA ODREĐIVANJE PRORAČUNSKOG OPSEGA NAPONA PREMA EN 1993-1-9 .....	448
<b>S-35</b>	<i>Nikola Božović, Jovana Ivanović, Olga Đurić-Perić -</i> METODOLOGIJA PRORAČUNA ANKERA PREMA EN1992-4 SA OSVRTOM NA STARE SRPS PROPISE .....	454
<b>S-36</b>	<i>Snežana Mašović, Nenad Pecić, Saša Stošić, Dragan Mašović -</i> NOVI PROPISI ZA SAOBRAĆAJNA OPTEREĆENJA DRUMSKIH MOSTOVA	464
<b>S-37</b>	<i>Zlatko Marković, Jelena Dobrić, Milan Spremić -</i> NOVA GENERACIJA EVROKODA 3 – NAJVAŽNIJE IZMENE .....	474
<b>S-38</b>	<i>Jelena Skoković -</i> U KORAK SA DRUGOM GENERACIJOM EVROKODOVA – DOSADAŠNJA ISKUSTVA I PROJEKCIJE .....	484
<b>S-39</b>	<i>Nemanja Jakovljević, Ivan Miličević, Branko Milosavljević -</i> ANALIZA RAZLIČITIH MODELA UTEZANJA AB ZIDOVA SLOŽENIH POPREČNIH PRESEKA PREMA EVROKODU 8 .....	492
<b>S-40</b>	<i>Mladena Luković, Zhe kang Huang and Dick Hordijk -</i> DUKTILAN BETON (SHCC) ZA KONTROLISANJE ŠIRINE PRSLINA U ARMIRANOBETONSKIM GREDAMA .....	504
<b>S-41</b>	<i>Aljoša Filipović, Jelena Dobrić, Dragan Blagojević, Mileva Samardžić –</i> <i>Petrović, Dragan Buđevac, Zlatko Marković -</i> POČETNE IMPERFEKCIJE STUBOVA RAVNOKRAKOG L POPREČNOG PRESEKA OD NERĐAJUĆEG ČELIKA .....	513
<b>S-42</b>	<i>Zoran Mišković, Siniša Savatović, Marko Popović, Marina Latinović -</i> ODREĐIVANJE PRIGUŠENJA I MODALNIH KARAKTERISTIKA MODELA NOSAČA PRIMENOM WAVELT TRANSFORMACIJE .....	523