

ANALIZA STABILNOSTI BETONSKE GRAVITACIONE BRANE PRIMENOM METODE KONAČNIH ELEMENATA STABILITY ANALYSIS OF CONCRETE GRAVITY DAM USING FINITE ELEMENT METHOD

Milan Bojović¹, Dragan Rakić¹, Snežana Vulović¹, Miroslav Živković¹
Dejan Divac², Nikola Milivojević², Slobodan Radovanović², Vladimir Milivojević²

*Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu¹
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“²*

Sadržaj – U radu je sprovedena analiza postojećeg stanja betonske gravitacione brane HE Đerdap 1 primenom metode konačnih elemenata. Izvršena je analiza termičkih, filtracionih i naponsko-deformacijskih procesa na osnovu kojih se dobijaju vrednosti uzgonskih sila, napona i deformacija, a zatim metodom redukovane smičuće čvrstoće određen globalni stepena sigurnosti.

Abstract – In this paper it was performed analysis of current state of concrete gravity dam HE Đerdap 1 using finite element method. Analysis of thermic, filtration and stress-strain processes was performed to obtain uplift forces, stress and strain after which safety factor was calculated using Shear Stress Reduction method.

1. UVOD

Na osnovu modela brane, primenom metode konačnih elemenata, izvršena je analiza stabilnosti prelivne brane na Srpskoj strani HE Đerdap 1 upotrebom programskog paketa PAK (Program za Analizu Konstrukcija) [1], [2]. Za pre i post-procesiranje je korišten program Femap [3]. Postupak analize je prikazan na tri karakteristične lamele i analiza je izvršena na nekalibrisanom modelu.

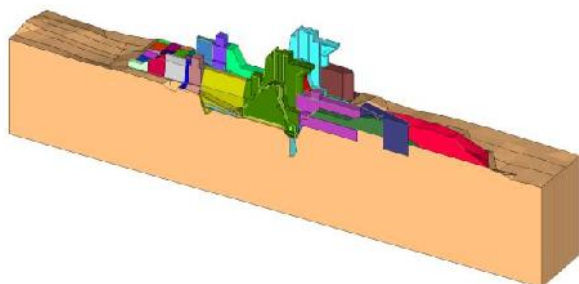
Analiza stabilnosti podrazumeva izvršavanje proračuna na osnovu kojih se dobijaju vrednosti napona i deformacija, a zatim na osnovu metode redukovane smičuće čvrstoće određivanje stepena sigurnosti. Za modele lamela brane sprovode se filtracioni, naponsko-deformacioni proračun [4], [5], [6] i analiza globalne stabilnosti pripadajuće lamele i okolne stenske mase.

Za modeliranje betona i stenske mase koriste se elasto-plastični materijalni modeli, za modeliranje betona koristi se modifikovani elasto-plastični model betona i Mohr-Coulomb materijalni model za okolnu stensku masu i injekcionu zavesu [7], [8], [9].

2. GEOMETRIJA LAMELA

Model predstavlja stanje terena sa zagatom prema poslednjim podvodnim snimcima iz 2014. godine.

U radu su modeliranje tri izabrane lamele 4, 5 i 6 u cilju prikaza metodologije modeliranja.



Slika 1. Prikaz geometrije lamela 4, 5 i 6

U domen jedne lamele, pored same betonske konstrukcije, ulazi u sklop više solida koji predstavljaju elemente injekcione zavesu, betonskog tepiha i više različitih oblasti koje su deo stenske mase i korita reke. Pomenuti solidi su prikazani na slici 1 različitim bojama.

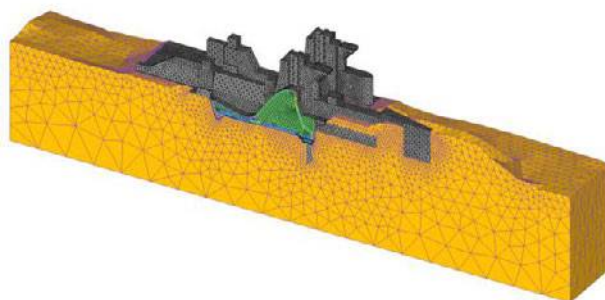
Slapište brane je ankerovano sa 158 čeličnih ankera prečnika 40mm dužine 11 do 19m u stenu. Funkcija ovih ankera je da spreče odizanje slapišta usled sila uzgona.

U modelu konačnih elemenata modelirane su drenažne galerije i šahte. One su realno predstavljene šupljinama unutar modela lamela. Za potrebe filtracionog proračuna prostor galerija i šahti je ispunjen tetraedarskih konačnim elementima, sa koeficijentom filtracije 1m/s.

3. MREŽA KONAČNIH ELEMENATA

Da bi se ispunio uslov optimalnog broja konačnih elemenata, definisane su različite veličine elemenata po zapremini u različitim zonama modela. U telu brane su generisani elementi prosečne veličine 2m, dok je u stenskoj masi zadata inicijalna veličina elemenata od 5m sa faktorom rasta 100 izraženim u procentima. Na ovaj način se na granicama modela, daleko od pregradne konstrukcije, dobiju elementi veličine 10m čime je značajno smanjen broj elemenata (slika 2).

Mreža konačnih elemenata za lamele 4, 5 i 6 je kreirana korišćenjem tetraedarskih konačnih elemenata sa međučvorovima (10 čvorova po elementu). Model se sastoji od 336229 čvorova i 244769 elemenata.



Slika 2. Prikaz mreže konačnih elemenata

4. OPTEREĆENJA I GRANIČNI USLOVI

U nastavku su opisana zadata opterećenja i definisani granični uslovi na modelu konačnih elemenata brane.

Sopstvena težina

Težina brane zavisi od zapremine i gustine. Zbog toga modeli lamela u pogledu geometrije i dimenzija odgovaraju izvedenom stanju brane kao i usvojeni materijalni parametri različitih tela unutar modela.

Sopstvena težina brane, uključujući i deo konstrukcije, sa okolnom stenskom masom se uzima kao inicijalno opterećenje u proračunu čvrstoće. Izračunavanje napona i

pomeranja usled sopstvene težine vrši se u prvom koraku, nakon čega se pomeranja resetuju. Dobijene vrednosti napona predstavljaju početno naponsko stanje za sledeće korake u kojima se razmatra uticaj ostalih opterećenja na branu.

Hidrostatički pritisak

Delovanje hidrostatičkog pritiska, od uticaja gornje i donje vode, zadato je na sve okvašene površine brane. Pritisci su zadati u težištima okvašenih površina konačnih elementa. Na osnovu izmerenih nivoa vode tokom dosadašnje eksploatacije HE Đerdap 1 i na osnovu projektnih slučajeva opterećenja, za proračun su korišćene sledeće vrednosti:

- $KGV_{max}=69,6\text{mm}$
- $KDV_{min}=39,1\text{mm}$

Filtracione sile

Vrednosti filtracionih sila se određuju u proračunu filtracije i koriste se kao opterećenja u proračunu čvrstoće brane.

Na uzvodnom delu konture modela koji odgovara površini terena ili objekta ispod kote gornje vode u jezeru (do radnog zatvarača na prelivu) zadat je potencijal koji je jednak koti gornje vode, na nizvodnom delu konture modela koji odgovara površini terena ili objekta ispod kote donje vode, zadat je potencijal koji je jednak koti donje vode.

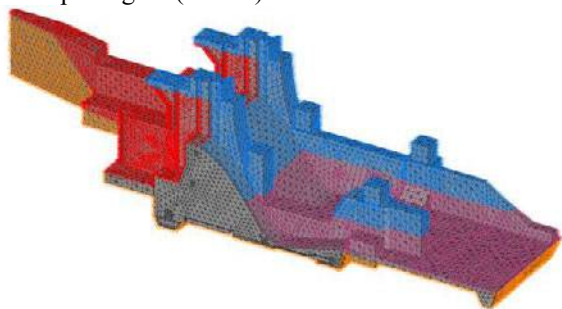
Opterećenje od pritiska vode na ustav

Nivo vode u akumulaciji se održava ustavama na prelivnim poljima (radnim dvostruko kukastim zatvaračima, koji su montirani u najvećim nišama za ustave u stubovima). Ustave se ne modeliraju, ali se opterećenje od vode uzima u obzir tako što se celokupan horizontalni pritisak vode na ustavu raspodeli podjednako na oba stuba na koje se ustava oslanja. Raspodela je površinska (trougona), po površinama oslanjanja ustava.

Ovo opterećenje je zadato preko pritiska na elementima koji se nalaze na unutrašnjoj površini vodice. U modelu je posmatran slučaj brane u normalnoj eksploataciji, pa je spuštena radna ustava, shodno čemu su zadati pritisci na modelu.

Temperaturni uticaj

Na modelu temperatura je zadata po konturi betona lamele, posebno za površine koje su u kontaktu sa vazduhom, vodom i podlogom (slika 3).



Slika 3. Prikaz zadatih temperatura na modelu

Raspodela temperature po zapremini tela brane određuje se na osnovu stacionarne termičke analize, prema zadatim temperaturama na površini lamele. Dobijena raspodela se koristi prilikom strukturne analize kako bi se uzeo u obzir

i uticaj temperature na naponsko-deformacijsko stanje brane. Delovima konture koji su izloženi vazduhu zadaju se konstantne temperature u svim čvorovima. Za usvojeni letnji režim temperatura vazduha iznosi $28\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Delovima konture betona koji su pod vodom zadaje se temperatura vode koja se menja po dubini jezera. Data raspodela temperature se formira za letnji režim na osnovu istorijskih merenja na datoj lokaciji.

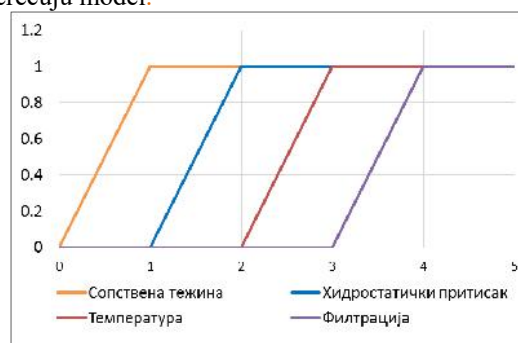
Raspored temperatura za letnji režim je sledeći:

- na dnu akumulacije: $17\text{ }^{\circ}\text{C}$
- na koti 30 mm: $19\text{ }^{\circ}\text{C}$
- na koti 40 mm: $21\text{ }^{\circ}\text{C}$
- na koti 47 mm: $22\text{ }^{\circ}\text{C}$
- na koti 54 mm: $24\text{ }^{\circ}\text{C}$
- na koti 61 mm: $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
- na površini akumulacije: $28\text{ }^{\circ}\text{C}$

Za usvojen letnji režim temperatura stenske mase iznosi $17\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Faze zadavanja opterećenja na branu

Analiza brane se sprovodi u četiri koraka, koji su zadati preko odgovarajućih funkcija (slika 4) koje postepeno opterećuju model.



Slika 4. Raspodela faza opterećenja

U prvom koraku se zadaje opterećenje od sopstvene težine koje deluje u preostala tri koraka. Pomeranja koja nastaju usled sopstvene težine se resetuju u proračunu nakon prvog koraka, tako da pomeranja koja se dobiju nakon drugog koraka su nastala samo usled opterećenja koja deluju u drugom koraku, dok se naponi nastali u prvom koraku prenose u ostale.

Hidrostatički pritisak se zadaje postepeno u drugom koraku i deluje u punom iznosu u trećem i četvrtom. Dejstvo temperature se uključuje u trećem koraku, a filtracione sile se zadaju na početku četvrtog koraka.

Grafični uslovi

U analizi naponsko-deformacionih procesa, grafični uslovi su dati po pomeranjima na granicama modela.

Zadati grafični uslovi su:

- Uslov simetrije vertikalnih stranica
- Fiksiranje horizontalne površine dna modela

Na vertikalnim površinama lamele, koje predstavljaju granice između domena lamela koje nisu modelirane zadati su uslovi simetrije. Čvorovima koji pripadaju ovim površinama, sprečeno je pomeranje u upravnom pravcu dok je dozvoljeno pomeranje u ravni.

Najniža površina modela, u prikazanoj orijentaciji, predstavlja dno modela i čvorovima koji pripadaju toj površini sprečena su pomeranja u sva tri pravca. Čvorovi u stenskoj masi na granicama između lamela koje su

modelirane su spojeni. Na ovaj način se stenske mase tri lamele povezuju kako bi se obezbedilo prenošenje opterećenja i deformacija.

5. PARAMETRI MATERIJALNIH MODELA

Za modeliranje ponašanja betona korišćena je modifikovan materijalni model betona zasnovan na Hoek-Braunovom uslovu tečenja. Parametri proračuna za ovaj materijalni modela dati su u tabeli 1.

U analiziranom modelu nisu uzeti u obzir mehanički diskontinuiteti stenske mase (rasedi) ni zone stene sa različitim materijalnim karakteristikama. Ovim je stenska masa posmatrana kao homogena i njeno ponašanje je modelirano Mohr-Coulomb materijalnim modelom čiji parametri su takođe prikazani u tabeli 1. Ovaj materijalni model korišćen je i za modeliranje injekcione zavese ispod brane.

Tabela 1. Vrednosti parametara modela za naponsko-deformacionu analizu

Mohr-Coulomb materijalni model						
Sredina	Modul el.	Poas. k.	Specif. težina	Kohezija	Ugao unu. trenja	Ugao dilatacije
[kPa]			[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[°]
Stenska masa	3.5e6	0.3	26.0	200.0	38	38
Injkc. zavesa	10e6	0.2	25.0	600.0	32	32
Modifikovan materijalni model betona						
Sredina	Modul el.	Poas. k.	Specif. težina	Mat. konst. σ_{ci}	Mat. konst. m_i	Mat. konst.
[kPa]			[kN/m ³]	[kPa]		
Bran	32e6	0.142	24.0	4.5e3	3.082	5.37e-2

Ankeri su napravljeni od čelika, korišćena vrednost modula elastičnosti je 2,1e5 MPa i Poasonov koeficijent 0,3.

Korišćeni koeficijenti filtracije materijala pri filtracionoj analizi prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2. Koeficijenti filtracije korišćeni u filtracionim proračunima

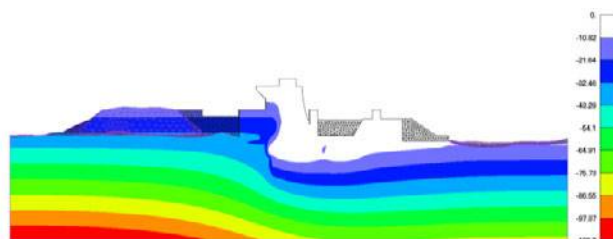
Sredina	Koeficijent filtracije k [m/s]
Stenska masa	1e-8
Injkciona zavesa	1e-9
Bran	1e-14
Fugenbandi	1e-15
Dilatacioni zazori	1
Drenažni kanali	1

6. PRIKAZ REZULTATI ANALIZE STABILNOSTI BRANE

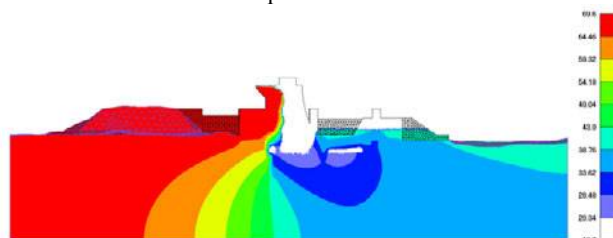
6.1. REZULTATI FILTRACIONIH PRORAČUNA

Rezultati filtracionih proračuna pri normalnom radu sistema za drenažu za najnepogodniju kombinaciju kota gornje (69,6 mm) i donje vode (39,1 mm) prikazani su na sledećim slikama. Biće prikazani samo preseci u osi lamele 4.

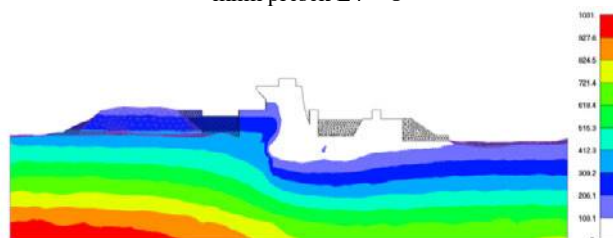
Na slici 5 je prikazano polje raspodele dubine vode u metrima pri radnim uslovima brane za letnji režim. Uticaj injekcione zavese na polje potencijala ispod brane prikazano je na slici 6, dok je raspodela uzgorskog pritiska prikazana na slici 7.



Slika 5. Dubina vode [m] pri KGVmax/KDVmin = 69,6/39,1 mmm presek L4 – O



Slika 6. Polje potencijala pri KGVmax/KDVmin = 69,6/39,1 mmm presek L4 – O

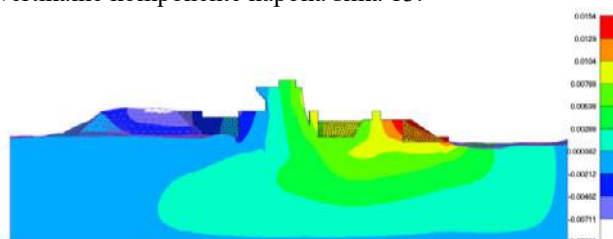


Slika 7. Uzgonski pritisak [kPa] pri KGVmax/KDVmin = 69,6/39,1 mmm presek L4 – O

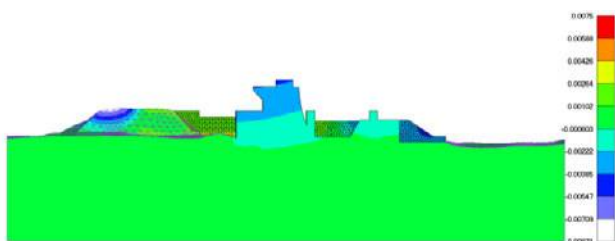
6.2. REZULTATI NAPONSKO-DEFORMACIONIH PRORAČUNA

Rezultati naponsko-deformacionih proračuna, pri prethodno definisanom nivou vode, u letnjem režimu za slučaj kada je sprečen protok vode kroz dilatacione spojnice (fugebandi su u funkciji) i omogućen prodor vode kroz spojnice između tela brane i slapišta prikazani su na sledećim slikama. Biće prikazani samo preseci u osi lamele 4. Vrednosti pomeranja u ostalim preseccima se neznatno razlikuju, u tabeli 3 date su maksimalne vrednosti komponenta pomeranja i ukupnog pomeranja.

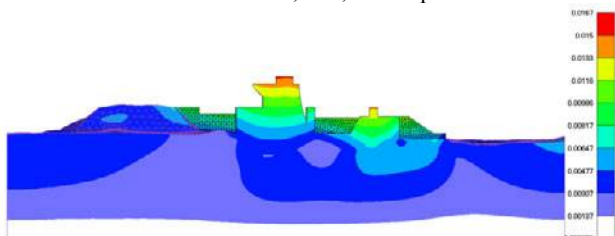
Polje radijalnih pomeranja slika 8, polje tangencijalnih pomeranja slika (upravno na tok Dunava) 9, polje vertikalnih pomeranja slika 10, ukupna pomeranja slika 11, polje radijalne komponente napona slika 12, polje vertikalne komponente napona slika 13.



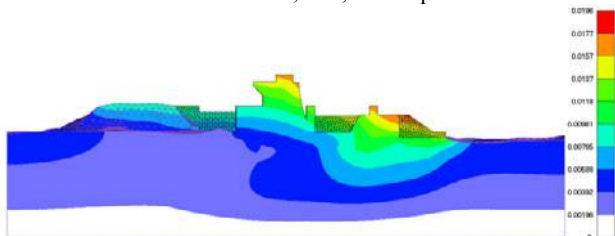
Slika 8. Polje radijalnih pomeranja [mm] pri KGVmax/KDVmin = 69,6/39,1 mmm presek L4 – O



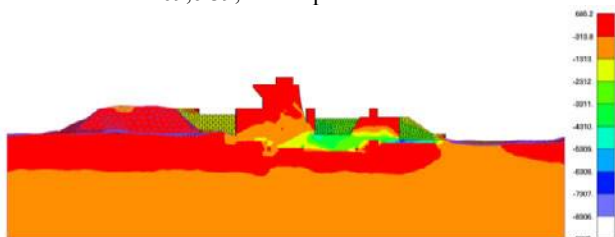
Slika 9. Polje tangencijalnih pomeranja [mm] pri KGVmax/KDVmin = 69,6/39,1 mm preseka L4 – O



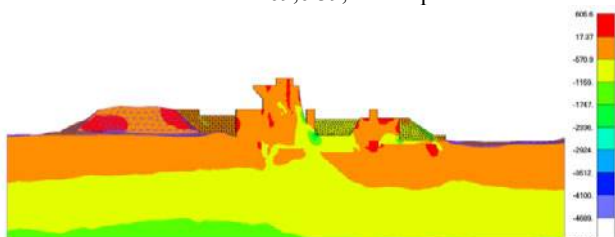
Slika 10. Polje vertikalnih pomeranja [mm] pri KGVmax/KDVmin = 69,6/39,1 mm preseka L4 – O



Slika 11. Ukupna pomeranja [mm] pri KGVmax/KDVmin = 69,6/39,1 mm preseka L4 – O



Slika 12. Polje radijalne komponente napona [kPa] pri KGVmax/KDVmin = 69,6/39,1 mm preseka L4 – O



Slika 13. Polje vertikalne komponente napona [kPa] pri KGVmax/KDVmin = 69,6/39,1 mm preseka L4 – O

Tabela 3. Tabela prikaz maksimalnih vrednosti pomeranja

Vrsta pomeranja	Pomeranje [mm]
radijalna pomeranja	15,4
tangencionalna pomeranja	7,5
vertikalna pomeranja	16,7
ukupna pomeranja	19,6

6.3. DOBIJENI STEPEN SIGURNOSTI

Nakon analize MKE modela za definisani slučaj opterećenja izvršeno je određivanje stepena sigurnosti. Stepenn sigurnosti je određen metodom redukovanja smičuće čvrstoće (en, *Shear Stress Reduction*). Za početne vrednosti parametara materijala su korišćene vrednosti prikazane u tabeli 1. Ovi parametri su zatim postepeno

redukovani sve dok nije narušena stabilnost objekta, tj. do nemogućnosti postizanja konvergencije rezultata.

Izračunata vrednost stepena sigurnosti za posmatrani slučaj iznosi 2.

7. ZAKLJUČAK

U radu je kreirana optimalna mreža konačnih elemenata modela brane, sa elementima manjih dimenzija u zonama oko brane i u samoj brani, dok su u zonama daleko od pregradne konstrukcije kreirani elementi većih dimenzija. Filtracioni proračun je urađen za kombinaciju hidrostatičkog opterećenja KGV=69,6mm i KDV=39,1mm, za slučaj kada fugebandi između lamela ne propuštaju vodu i spojnica između tela brane i slapišta je otvorena, tj. omogućeno je proticanje vode. Prikazana su polja dubine vode, potencijala, uzgonskih pritisaka. Izračunate filtracione sile korišćene su u naponsko–deformacionom proračunu.

Naponsko–deformacioni proračun je izvršen za istu kombinaciju opterećenja kao i filtracioni proračun. Materijalni model za naponsko–deformacionu analizu je zasnovan na elasto–plastičnom modelu materijala za stensku masu i beton. Prikazana su rezultati za polja radijalnih pomeranja, tangencijalnih pomeranja, vertikalnih pomeranja, ukupnih pomeranja, radijalnih napona i vertikalnih napona.

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da ponašanje modela odgovara realnom ponašanju brane. Dobijene vrednosti pomeranja su veće od realnih pomeranja na brani, jer je analiza izvršena na nekalibrisanom modelu. U nastavku analize ovog problema, biće sprovedena kalibracija modela korišćenjem rezultata merenja na realnoj brani.

ZAHVALNICA

Autori izražavaju zahvalnosti za podršku od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, Republike Srbije za projekte TR32036 i TR37013.

LITERATURA

- [1] M. Kojić, P. Slavković, M. Živković, N. Grujović, ПAK-C Програм за анализу конструкција MKE, Корисничко упутство, Крагујевац, 2016.
- [2] M. Kojić, N. Filipović, R. Slavković, M. Živković, N. Grujović, N. Zdravković, ПAK-P, Program for FE Analysis of FlowThrough Porous Media, Крагујевац, 1999.
- [3] Siemens, FEMAP User Guide Version 11.2, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2015.
- [4] M. Kojić, P. Slavković, M. Živković, N. Grujović, Метод коначних елемената I Линеарна анализа, Крагујевац: Машински факултет у Крагујевцу, Сестре Јањић 6, Крагујевац, 2010.
- [5] K.-J. Bathe, Finite Element Procedures, 2006.
- [6] W. Koiter, General theorems for elastic-plastic solids, North-Holland, 1960.
- [7] Д. Ракић, Развој и примена материјалних модела порозних медија у статичкој и динамичкој анализи насутих брана, Докторска дисертација, Крагујевац, 2014.
- [8] M. Kojic, K. J. Bathe, Inelastic Analysis of Solids and Structures, 1 edition., Springer, 2004.
- [9] ХЕПС БЕРДАП, Досије главног објекта ХЕ Бердап, Кладово, 1982.