

ПОМЕРАЊА КОМБИНОВАНЕ ЈАЛОВИШНЕ БРАНЕ - СТУДИЈА СЛУЧАЈА

Проф. д-р Љупчо ПЕТКОВСКИ
Грађевински факултет у Скопју,
Универзитет Св. Кирил и Методиј, РС Македонија

РЕЗИМЕ

Јаловишне бране, због огромног обима седиментних језера, представљају земљане насуте конструкције са највећом потенцијалном опасношћу по околину. Међутим, бројни извештаји о рушењу јаловишних брана у последње три деценије указују да се поступци и технике у пројектовању, изградњи, одржавању и техничком осматрању насутих брана за водне акумулације нису примењивани на јаловишним бранама, са истом пажњом и дужном строгошћу. Поређење израчунатих и измерених хоризонталних и вертикалних померања у постексплоатационом периоду јаловишне бране је неопходно да би се донео ваљан закључак о регуларном понашању и задовољавајућој стабилности ових сложених хетерогених земљано насутих брана.

У овом раду, израчуната померања из нумеричког модела статичке анализе хидројаловишне бране Тополница упоређена су са измереним вредностима из геодетске оскултације, као део процеса мониторинга. Комбинована јаловишна брана Тополница, рудника бакра/злата Бучим, Радовиш, у источном делу РС Македоније, формирана је низводним грађењем (у првој фази, брана бр. 1) и узводном методом изградње (у другој фази са две етапе, бране бр. 2-1 и бр. 2-2), укупне висине од круне највише бране до низводне ножице бране од 141,2 m.

Кључне речи: јаловишне бране, статичка анализа, техничко осматрање

1. УВОД, ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Хидројаловишта су сложене инжењерске грађевине, које се састоје од почетне бране, песковите бране, седиментног језера, система за одводњавање, водоводних цеви за одвођење бистре воде и објеката

за заштиту од спољних вода. (Petkovski L., Gocevski B., Mitovski S., 2014.06), (Petkovski L., Peltechki D., Mitovski S., 2014.09). Јаловишта, с једне стране, због бројних објеката од којих су састављене, треба проверити на велик број сигурности у условима статичког оптерећења, слично конвенционалним насутим бранама (Petkovski L., Tančev L., Mitovski S., 2007. 06), а с друге стране, због огромног обима седиментног језера, то су насуте конструкције са највећом потенцијалном опасношћу по околину (Petkovski L., Mitovski S., 2015.06). Због велике важности хидројаловишта, један од техничких комитета ICOLD-а је за јаловишне бране и језера за таложење (ICOLD Committee on Tailings dams and Waste Lagoons), који је објавио 10 билтена (ICOLD, 1982, Bulletin 45) – (ICOLD, 2011, Bulletin 139). Због дугог периода изградње, приступ код конвенционалних брана (за формирање резервоара за воду) ради потврђивања сигурности хидротехничких конструкција - уз пуни надзор над изградњом и тестирањем бране контролом првог пуњења акумулације, као и процена регуларног понашања бране са изведеним параметрима преко поређења са подацима из оскултације, обично се не примењује у потпуности код јаловишних брана. Нажалост, ова главна разлика између конвенционалних насутих брана и јаловишних брана погоршава се код решења са комбинованим грађењем (Petkovski L., 2015.09) и са честим захтевима за надоградњу (Petkovski L., Mitovski S., 2012.10) чиме се повећава простор за таложење код хидројаловишта. Овде треба напоменути додатне проблеме са јаловишним бранама, у поређењу са конвенционалним бранама, због слегања у постексплоатационом периоду од дисипације порног притиска у језеру за таложење (Petkovski L., Mitovski S., 2018.04) и повећане подложности/ осетљивости феномену ликвидације. (Petkovski L., Mitovski S., 2018.07), (Petkovski L., Mitovski S., 2019.05), (Petkovski L., Mitovski S., 2019.10), (Petkovski L., 2019.11).

Током изградње јаловишне бране или коришћења таложног језера, као и у одређеном постексплоатационом периоду хидројаловишта, неопходно је техничко осматрање бране. Сврха оскултације бране је потреба за сталним увидом у њено понашање. Једино техничким осматрањем бране могу се на време открити могуће грешке - код пројектовања или изградње. Правовремено откривање одређених недостатака у бранама је пресудно, с обзиром на то да системи - бране са језерима за таложење, спадају у категорију вештачких система са највећим потенцијалним ризиком за низводну долину реке. Мониторинг јаловишне бране укључује спровођење мерења за: померања, филтрационе појаве, укупна напрезања, порног притиска и сеизмичка убрзања. Праћењем одговора јаловишне бране под дејством различитих оптерећења, контролише се дали појединачни конструктивни елементи бране (као и брана у целини) раде исправно. Под правилним (или регуларним) понашањем бране подразумева се понашање конструкције (са усвојеним саставом, геометријом и параметрима материјала), које се процењује (предвиђа) конструктивним (статичким и динамичким) анализама у фази пројектовања. Према методи спровођења осматрања код јаловишне бране, постоје: визуелна оскултација, геодетска мерења површинских померања и мониторинг уграђеним инструментима. Инжењерска интерпретација измерених резултата наведених контролних (обавезних) посматрања даје систематско објашњење хидрауличног и механичког одговора јаловишне бране. Најпоузданији резултати понашања бране, који би требало да кореспондирају величинама осталих резултата, добијају се применом геодетских метода. За мерење површинских померања у одређеним мерним ознакама у телу бране прво се формира микро-тригонометријска мрежа стубова за постављање геодетских инструмената. Референтне тачке (стубови) треба да буду удаљени од бране, како би се избегао утицај тежине јаловишне бране и седиментног језера, на лако доступним местима и са видљивошћу мерних ознака од најмање три репера. Вертикална померања се мере нивелмански, а хоризонтална померања се мере тригонометријски, са тачношћу од ± 10 mm, што је стандард за насуте бране.

Оскултација великих брана није сама себи циљ (да би се удовољило законским захтевима), већ

упоређивањем измерених вредности оскултације са израчунатим вредностима са математичким моделима да би се дошло до ваљаног закључка о сигурности јаловишта. Сврха овог истраживања је процена стабилности комбиноване јаловишне бране, проценом степена регуларног одговора у постексплоатационом периоду хидројаловишта. Процена нормалног понашања бране (након њене изградње) врши се упоређивањем измерених површинских померања и израчунатих одговарајућим математичким моделима. У даљем тексту презентација ће бити илустрована подацима из поређења израчунатих и измерених померања у постексплоатационом периоду таложног језера, за јаловишну брану комбинованим начином градње - Тополница, рудника Бучим, Радовиш, РС Македонија.

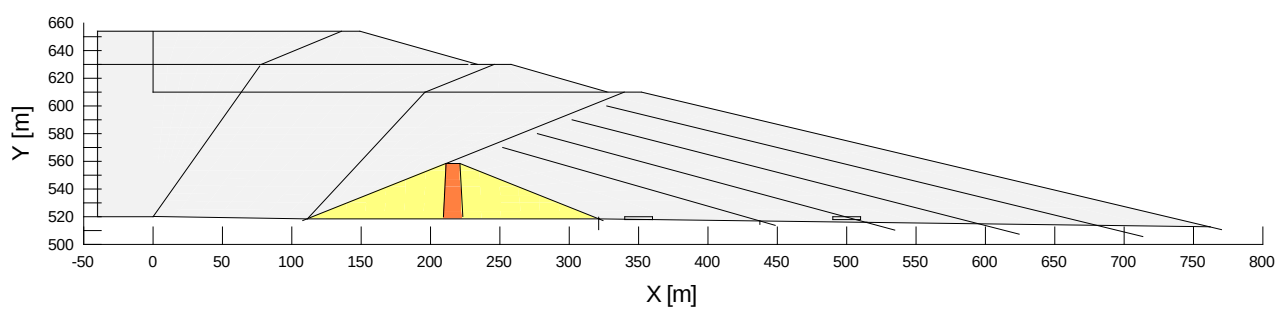
2. ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ХИДРОЈАЛОВИШТА ТОПОЛНИЦА

Хидројаловиште Тополница рудника бакра Бучим, Радовиш, пуштено у рад 1979. године, добија се одлагањем флотационе пулпе. Методом хидроциклонирања пулпе, од песка се формира низводна песковита брана, а изливање из хидроциклона (а понекад и нециклониране јаловине) испушта се у узводно седиментно језеро. На тај начин се у седиментном језеру врши механичко таложење најмањих честица и хемијско пречишћавање употребљених реагенса, присутних у јаловину. У протеклом периоду на јаловишту Тополница (слика 1) одложена је јаловина у количини од преко 130 M-m^3 и акумулирана је вода од око $9,0 \text{ M-m}^3$.

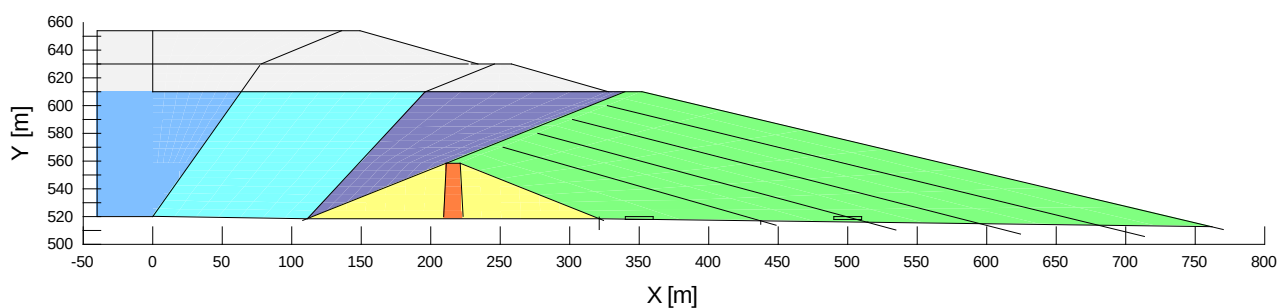
Ову јаловишну брану карактеришу фазна изградња и комбиновани начин градње, са низводним напретком у првој фази и узводним напретком у надишењу код друге фазе, оствареним у две етапе. Изградња песковите бране у почетној фази, до коте 610 мнв (фаза I), слика 3, изведена је у косим слојевима, напредујући низводно од почетне бране, слика 2, са котом у основи 518,5 m и котом круне 558,5 m надморске висине. Затим, изградња песковите бране до коте 630 мнв (II фаза, етапа 1), због близине села Тополница до низводе ножице бране, изграђена је насипањем у узводном смеру, слика 4. У завршној фази усвојена је круна песковите бране до нивоа од 654,0 мнв (II фаза, етапа 2), са напретком у узводном смеру, слика 5.



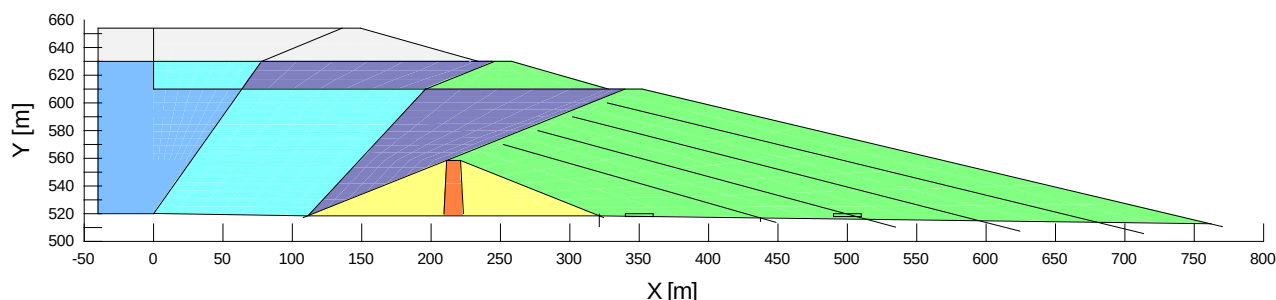
Слика 1. Круна бране дужине 930 m, седиментно језеро и рекултивисана низводна косина јаловишне бране Тополница



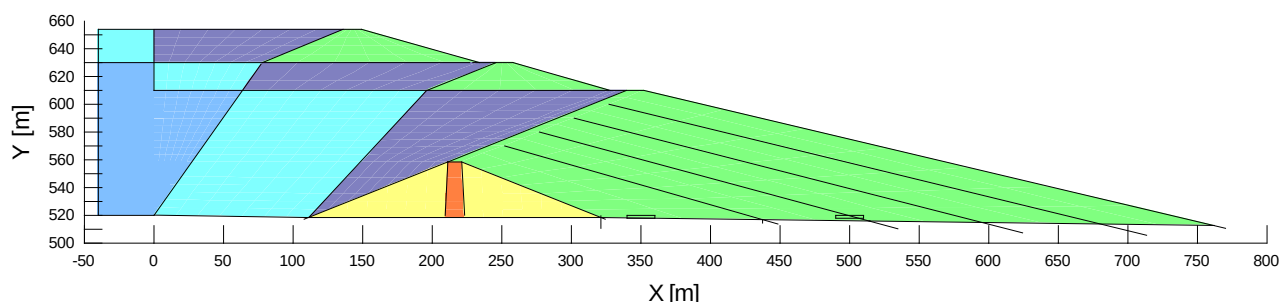
Слика 2. Изградња почетне бране до 558,5 m надморске висине



Слика 3. Изградња хидројаловишта до коте 610 мнв, (I фаза)



Слика 4. Изградња хидројаловишта до коте 630 мнв, (II фаза, етапа 1)

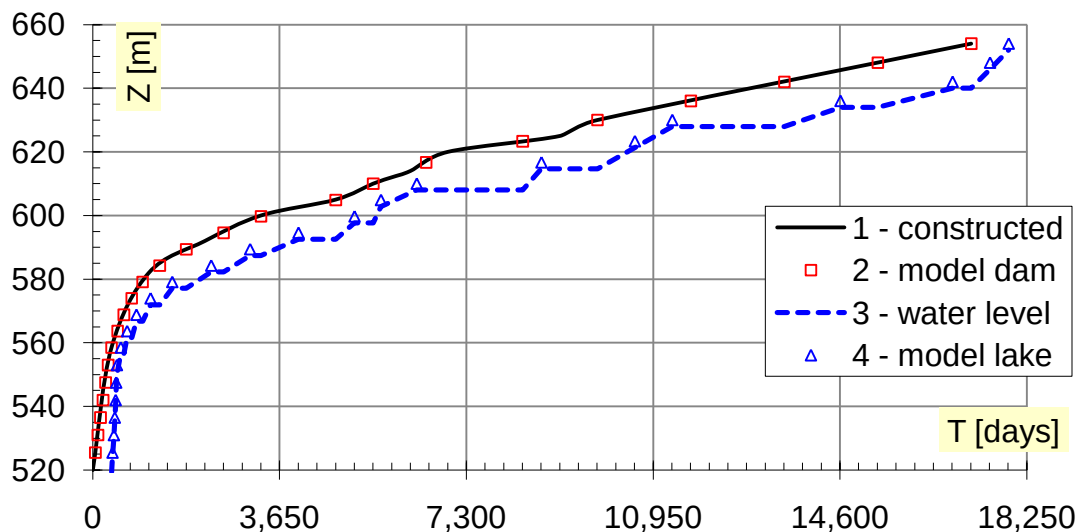


Слика 5. Изградња хидројаловишта до коте 654 мнв, (II фаза, етапа 2)

Габаритне димензије репрезентативног попречног пресека за конструктивну (статичку, филтрациону, динамичку) анализу су ширина 801,4 m и висина 141,2 m. Хидројаловиште Тополница, са висином бране од 2-2 изнад основе на почетној брани $H_0 = 654,0 - 518,5 = 135,5$ m, једна је од највиших јаловишних брана у Европи. Коначна висина јаловишне бране 2-2, од круне до низводне ножице износи $H_2 = 654,0 - 512,8 = 141,2$ m, што брану Тополница чини највишом браном у РС Македонији. Наиме, највиша конвенционална брана (за акумулацију воде), брана Козјак, према подацима за изграђено стање из 2001. године, има конструктивну висину од круне бране до темеља језгра од $H_c = 472,2 - 341,8 = 130,4$ m. Огромне димензије песковите бране, хетерогени састав геосредине и комбиновани начин градње, низводно у фази I и узводно у фази II, речито указују да је брана Тополница једна од најсложенијих и најважнијих насипних конструкција у РС Македонији.

3. СТАТИЧКА АНАЛИЗА БРАНЕ ТОПОЛНИЦА У ЕКСПЛОАТАЦИОНОМ ПЕРИОДУ

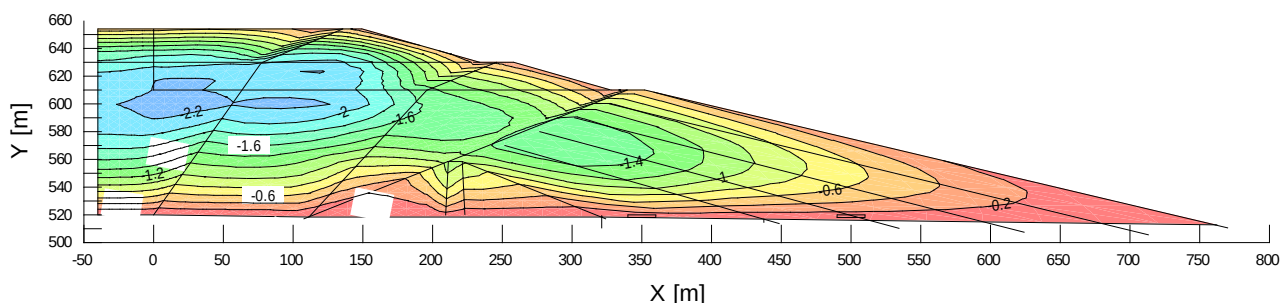
Почетно стање напрезања и развој порног притиска за испитивање померања у постексплоатационој фази јаловишта Тополница је стање - непосредно након изградње бране. Стварна динамика изградње пешчане бране апроксимована је са 48 временских корака за хидројаловиште, различитих трајања. Ових 48 временских етапа подељено је на 24 (за стартер брану и песковите бране) и 24 за седиментно језеро, где се реално време изградње јаловине пресликовано у данима (слика 6) за потребе математичког модела. Модел симулира стварни напредак хидројаловишта, односно пуњење седиментног језера је са одговарајућим временским кашњењем након изградње пешчане бране. Засићење јаловине узводно, због постојећег дотока воде из реке Тополнице у хидројаловишту, током напредовања седиментног језера, усвојена је 2,0 m ниже од наталожене јаловине. Овај нестационарни хидраулични гранични услов неопходан је за анализу ефективних напона, за варијанту са водозасићењем јаловине током изградње, односно током употребе објекта.



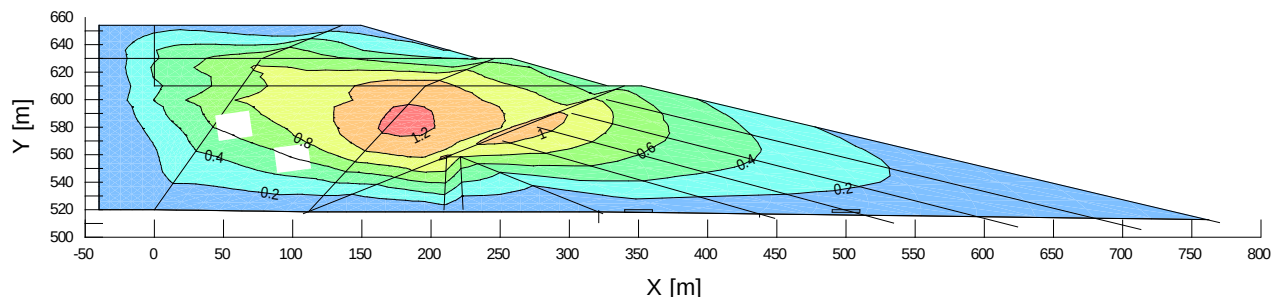
Слика 6. Дијаграм грађења, изведено стање у данима (1 брана, 3 језеро) и моделирано у 48 корака са различитим трајањем терета (2 бране, 4 језера)

У овој консолидационој анализи, анализом ефективних напона у дренажним условима у реалном времену (*Geo-Slope SIGMA/W*, 2016), усвојена је функција пуњења воде у седиментном језеру, као променљиви улазни гранични хидраулички услов за анализу нестационарне филтрације (*Geo-Slope SEEP/W*, 2016). У тако сложеној и комбинованој анализи (са паралелним механичким и хидрауличким одговором) симулирају се истовремено: (а) етапна изградња, (б) повећање и дисипација консолидационог порног притиска, (в) промена узводног хидростатичког притиска и (г) хетерогени окружење са неправилном геометријом. У примењеној анализи, која најреалније одражава понашање хидројаловишта, утичу и материјални параметри и временска компонента, односно стварна динамика изградње.

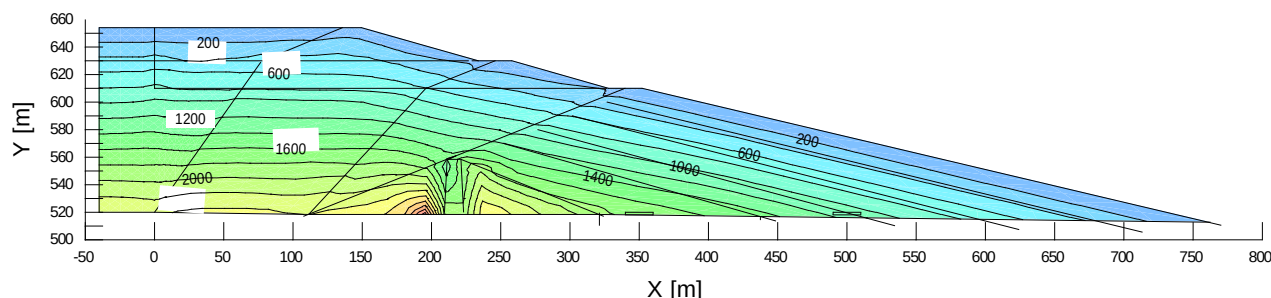
У продужетку, за изградњу бране бр. 2-2 (са котом круне 654,0 m надморске висине) дати су: изолиније хоризонталних померања (слика 8), вертикалних померања (слика 7) и максимална нормална укупна напрезања (слика 9), добијене са линеано еластичним (ЛЕ) моделом, са анализом ефективних напона у дренажним условима и са узводним водозасићењем. Упоредивањем парцијалних померања у зони инклинометра Ј4 (постављеног од 625 мнв до 570 мнв), за почетно стање за изградњу бране 2-2 до коте 630 мнв и коначног услова за пуњење јаловине до 654 мнв, потврђено је регуларно понашање насуте конструкције и верификовани су параметри локалних материјала, помоћу којих је урађена статичка анализа.



Слика 7. Вертикална померања у јаловиште II фаза - етапа 2 (инкремент 48), $K_{II2} = 654,0$ мнв, $Y = (-2,347 \div 0,000)$ m



Слика 8. Хоризонтална померања у јаловиште II фаза - етапа 2 (инкримент 48), $K_{II2} = 654,0 \text{ mnv}$, $X = (-0,000 \div 1,249) \text{ m}$

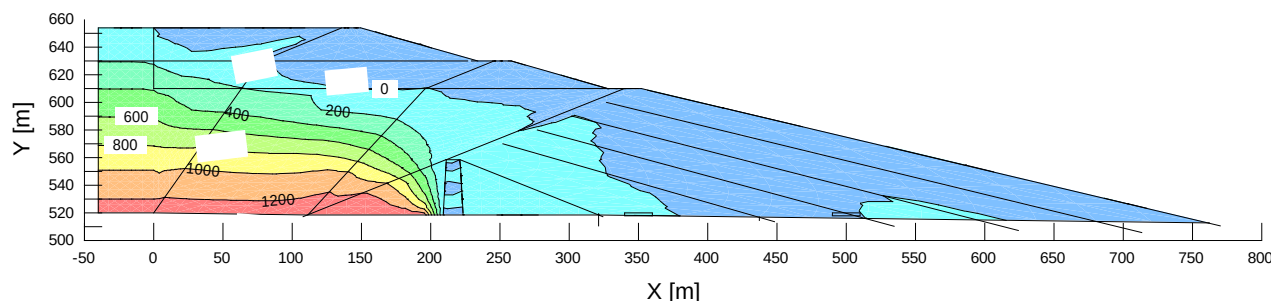


Слика 9. Максимално нормално тотално напрезање у јаловиште II фаза - етапа 2 (инкримент 48), $K_{II2} = 654,0 \text{ mnv}$, $\sigma_1 = (25,19 \div 3.503,14) \text{ kN/m}^2$

4. ПРОЦЕНА ПОНАШАЊА БРАНЕ ТОПОЛНИЦА У ПОСТЕКСПЛОАТАЦИОНОМ ПЕРИОДУ

У истраживању понашања хидројаловишта, од посебног интереса за утврђивање безбедности објекта је процена максималних величина хоризонталног и вертикалног померања пешчане бране у постексплоатационој фази. Ови подаци су важни, како за поређење са вредностима оскултације (која ће бити спроведена у том периоду), тако и за доношење ваљаних закључака о

регуларном понашању хидројаловишта, као и за усвајање потребног надвишења изнад коте бране бр. 2-2 на коти 654,0 m надморске висине, што ће покрити преостало слегање након изградње бране. У истраживању одговора јаловишта са еластично пластичном (ЕП) моделу, током трансформације консолидационог порног притиска, генерисаног у последњем временском кораку у дренажним условима, током градње (слика 10), у будућем постексплоатационом периоду разматрају се три сценарија: (1) потпуна дисипација консолидационог притиска, (2) трансформација консолидационог

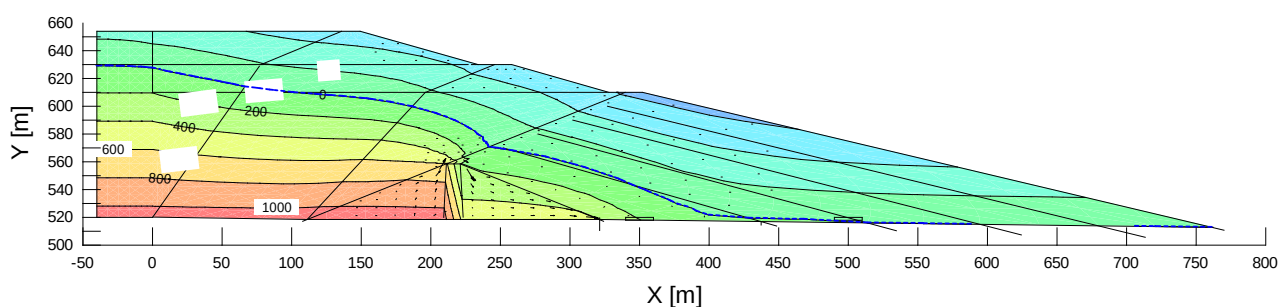


Слика 10. Порни притисак у јаловиште II фаза - етапа 2 (инкримент 48), са ЛЕ моделом, са анализом ефективних напона у дренажним условима и са узводним водо-засићењем, према стварној динамици градње до коте круне круна $K_{II2} = 654,0 \text{ mnv}$, $P_w = (-157,03 \div 1.309,24) \text{ kN/m}^2$

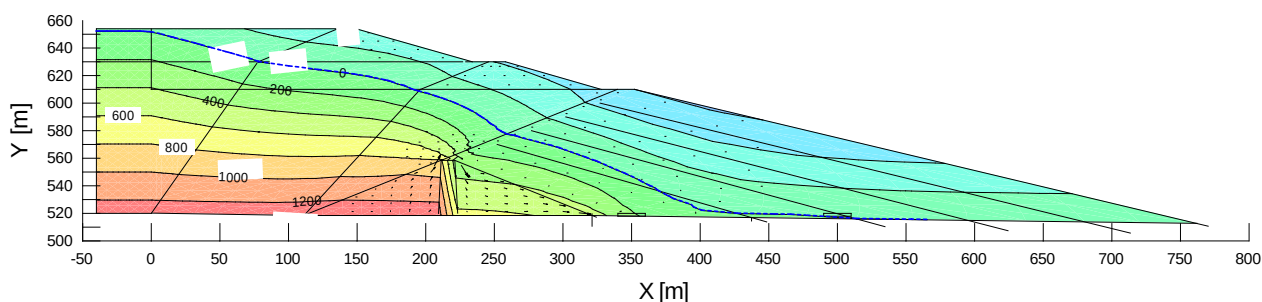
притиска у стационарни филтрациони порни притисак са константним горњим нивоом воде на 630,0 m надморске висине (слика 11) и (3) трансформација консолидационог притиска у стационарни филтрациони порни притисак са константним горњим нивоом воде на 652,0 m надморске висине (слика 12).

Први сценарио, са потпуним расипањем притиска консолидације (слике 13 и 14), несумњиво је фиктивна ситуација, јер је у постексплоатационом

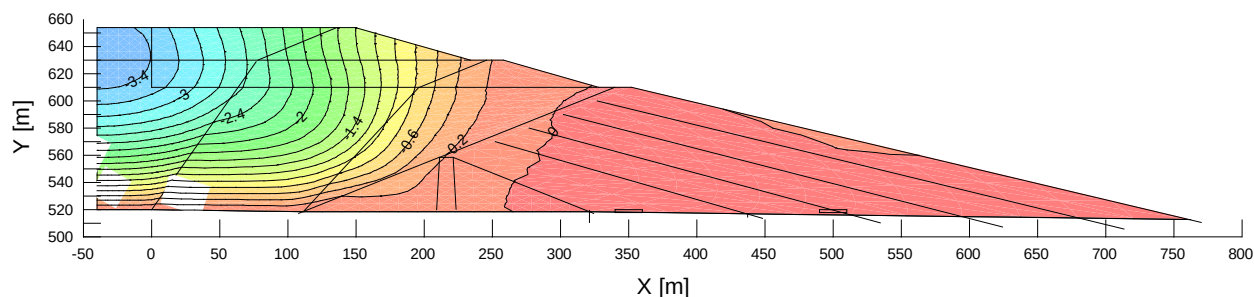
периоду постојећи доток воде из реке Тополнице у таложном језеру формираће стационарни режим филтрације кроз јаловиште и мало је вероватно да ће омогућити потпуну дисипацију порног притиска. Према томе, вредности из ове анализе треба третирали као максималне теоријске величине. Ако се током оскултације померања песковите бране региструју вредности веће од оних наведених у овој анализи, то је сигуран показатељ да постоје одређени поремећаји у регуларно понашању хидројаловишта.



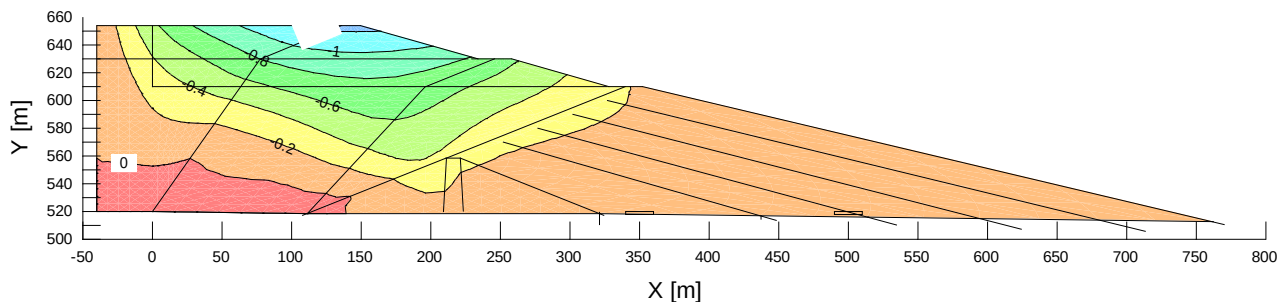
Слика 11. Порни притисак у јаловиште II фаза - етапа, за стационарну филтрацију, са засићењем воде узводно на 630,0 мнв, $P_w < 1.093,48 \text{ kN/m}^2$



Слика 12. Порни притисак у јаловиште II фаза - етапа, за стационарну филтрацију, са засићењем воде узводно на 652,0 мнв, $P_w < 1.309,23 \text{ kN/m}^2$



Слика 13. Изолиније вертикалних померања $\Delta Y = (-3,583) - (+0,023) \text{ m}$, са потпуним расипањем притиска консолидације

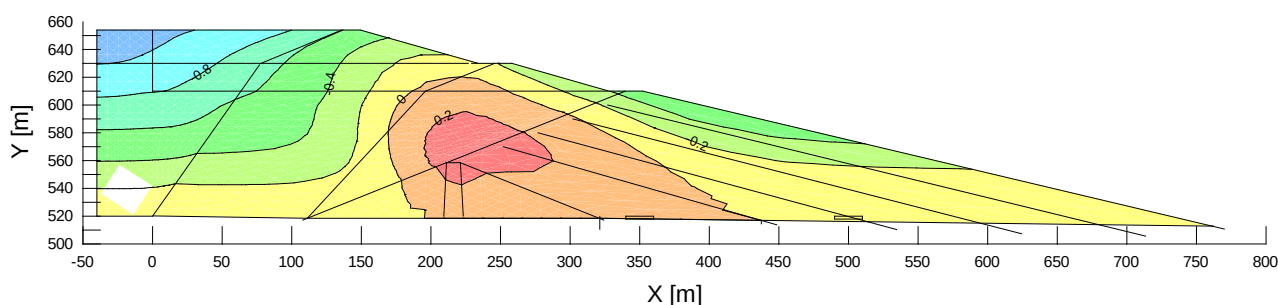


Слика 14. Изолиније хоризонталних померања $\Delta X = (-1,269) - (+0,057)$ m, са потпуним расипањем притиска консолидације

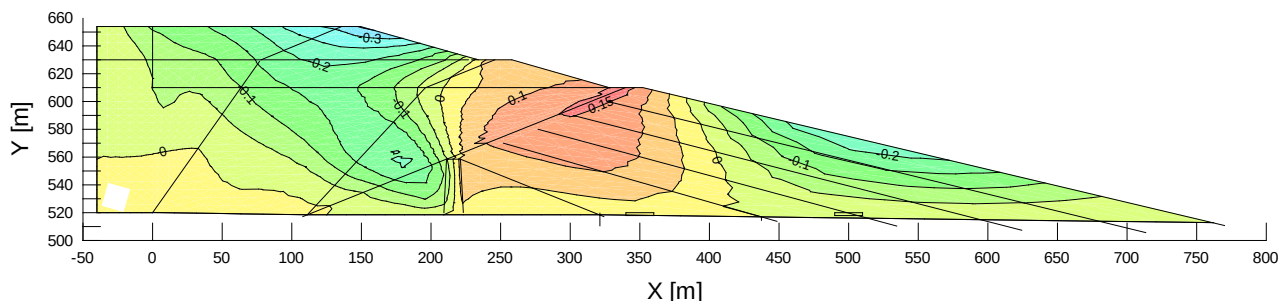
У другом сценарију са трансформацијом притиска консолидације у стационарни притисак за коту 630,0 m надморске висине (слике 15 и 16), што сматрамо највероватнијим у будућности, у круни бране бр. 2-2 на коти 654,0 m надморске висине, очекивано слегање је око 60,0 cm.

У трећем сценарију са трансформацијом притиска консолидације у стационарни притисак за коту 652,0 m надморске висине (слике 17 и 18), што

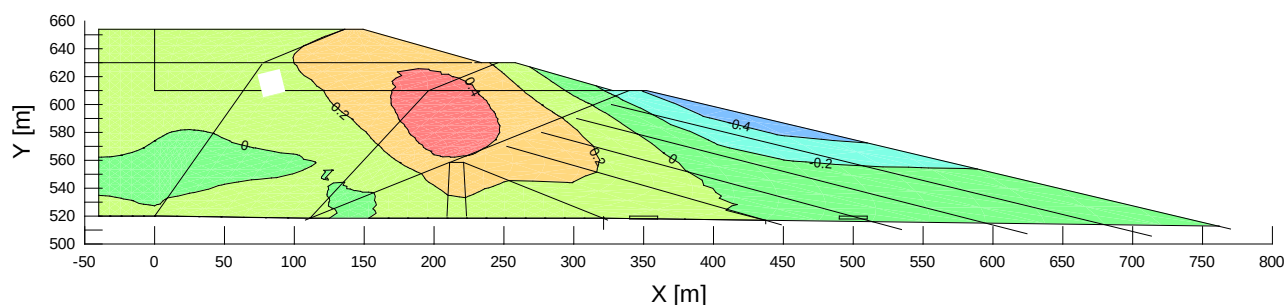
сматрамо практично немогућим и има теоријски значај као могуће гранично стање, у круни бране бр. 2-2 на коти 654,0 m надморске висине, због бубрења материјала од узводног засићења водом, подигла би се кота од око 20,0 cm. Међутим, ова вредност добијена еластичним одговором насуте конструкције према нумеричком експерименту, у стварном објекту није могућа због деформација од пузања материјала, које се још не могу задовољавајуће моделирати.



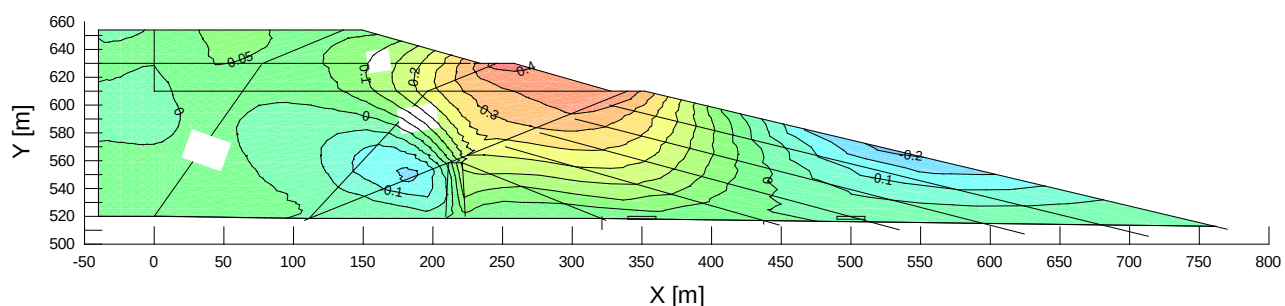
Слика 15. Изолиније вертикалних померања $\Delta Y = (-1,176) - (+0,281)$ m, претварањем притиска консолидације у стационарни притисак филтрације за горњу воду на 630,0 m



Слика 16. Изолиније хоризонталних померања $\Delta X = (-0,363) - (+0,177)$ m, претварањем притиска консолидације у стационарни притисак филтрације за горњу воду на 630,0 m



Слика 17. Изолиније вертикалних померања $\Delta Y = (-0,553) - (+0,497)$ m, претварањем притиска консолидације у стационарни филтрациони притисак за горњу воду на 652,0 m



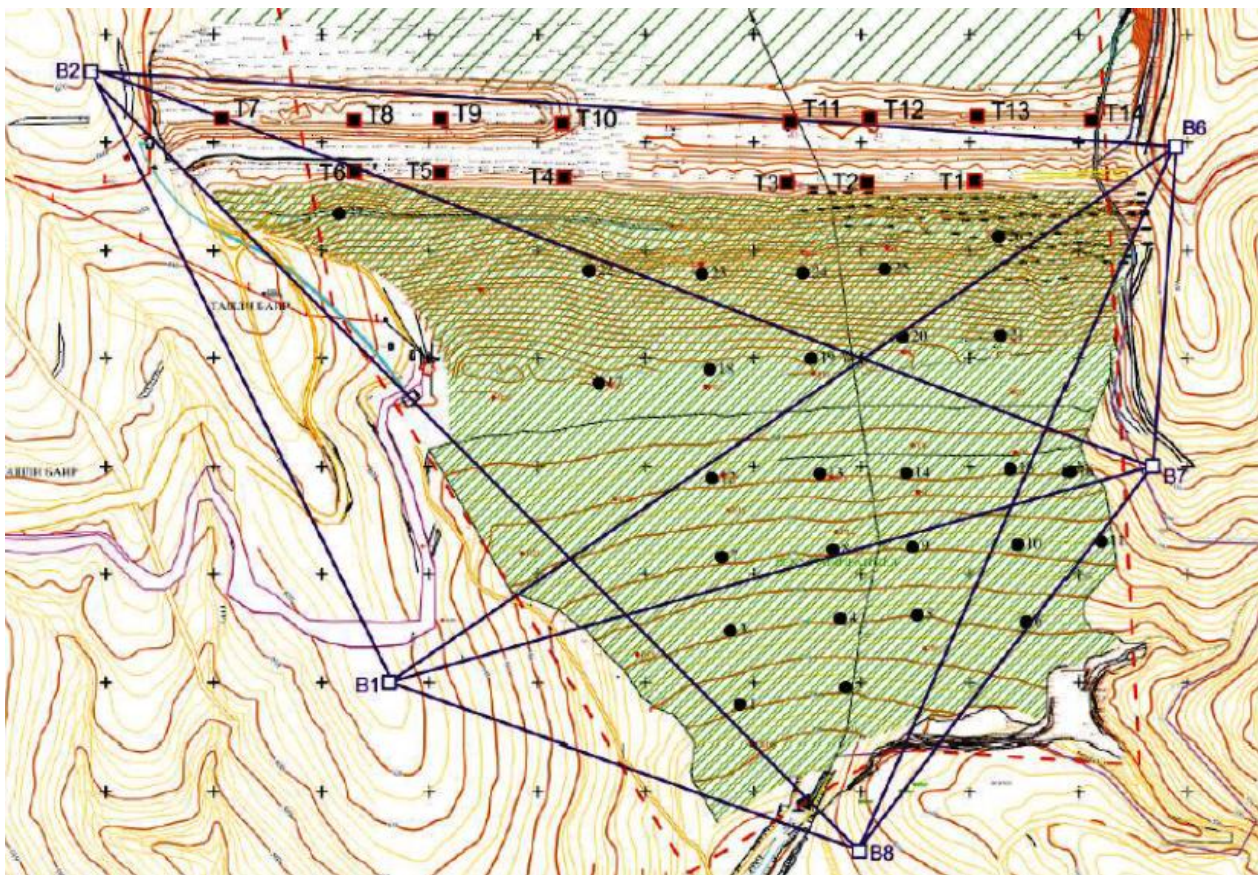
Слика 18. Изолиније хоризонталних померања $\Delta X = (-0,218) - (+0,431)$ m, претварањем притиска консолидације у стационарни филтрациони притисак за горњу воду на 652,0 m

5. РЕЗУЛТАТИ ГЕОДЕТСКИХ МЕРЕЊА БРАНЕ ТОПОЛНИЦА 2019. ГОДИНЕ

Геодетска мерења бране за Тополницу, у новембру 2019. године, извршена су на основу Пројекта оскултације јаловишне бране са припадајућим објектима и таложног језера. Геодетска мерења односе се на површинска померања на мерним местима бране, за хоризонтална (позициона) померања (слика 19) и за вертикална (висинска) померања (слика 20). Максимална померања (у поређењу са нултим стањем) су хоризонтално померање (уздочно) у тачки Т2 од 6,4 cm и вертикално слегање у тачки Т2 од 10,8 cm. Релевантне израчунате вредности за поређење са онима измереним из техничког осматрања добијени су математичким моделом за појаве филтрације и одговор бране при статичким оптерећењима. Овим моделом јаловишне бране 2-2, понашање и стабилност хидројаловишта процењени су коришћењем: (а) изведене геометрије бране, (б) података о понашању бране из претходне оскултације, за калибрацију параметара материјала,

и (в) савремених модела за нумеричку анализу насипних брана.

Из поређења измерених померања из геодетске аускултације у новембру 2019. године (за узводни филтрациони услов од 641,0 m надморске висине и нулто стање за октобар 2016. године) са израчунатим математичким моделом за статичку и филтрациону анализу (за потпуно расипање порног притиска у пост-експлоатационом периоду, за узводни филтрациони услов од 630,0 mнв, у периоду непосредно након изградње бране), процењујемо да се брана хидројаловишта Тополница, Радовиш, понашала регуларно у новембру 2019. Наиме, израчунате вредности у целом постексплоатационом периоду за максимална померања у круни бране 2-2, на коти 654 m надморске висине су хоризонтално узводно од 30 cm и вертикално слегање од 50 cm. Измерена максимална померања (у периоду 10.2016 - 11.2019) део су израчунатих и представљају хоризонтално узводно од 6,4 cm и вертикално слегање од 10,8 cm.



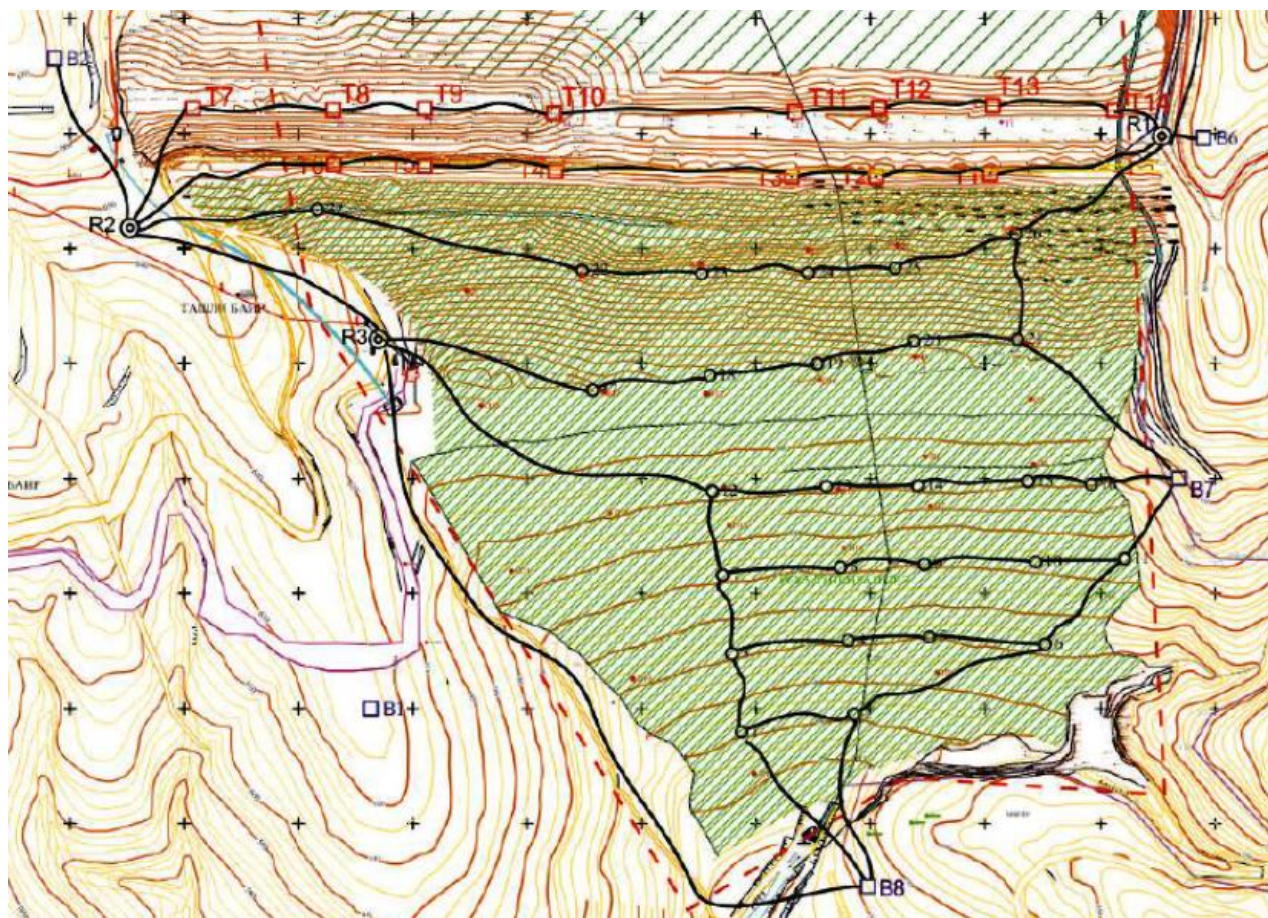
Слика 19. Прегледна скица микротригонометријске мреже (од 5 реперних стубова у близини бране) и мреже од 40 мерних тачака у телу бране, за одређивање хоризонталних померања, (+ Y) је у смеру севера или приближно у смеру узводно, (+ X) је у смеру искота или приближно према левој страни долине

Правац измерених померања је идентичан израчунатим, а однос између хоризонталних и вертикалних померања је приближно једнак, односно $(30/50 = 0,60) \approx (6,4 / 10,8 = 0,59)$. Према интензитету измерених померања, може се закључити да је у периоду геодетске оскултације (10.2016-11.2019) остварено 21,6% од израчунатих померања, који се односе на цео будући период након изградње бране. Ова три параметра: (а) смер померања, (б) однос између хоризонталних и вертикалних померања и (ц) интензитет померања кључни су за процену регуларног понашања комбинованих јаловишних брана, па се стога може закључити да јаловиште за сада показује нормалан одговор.

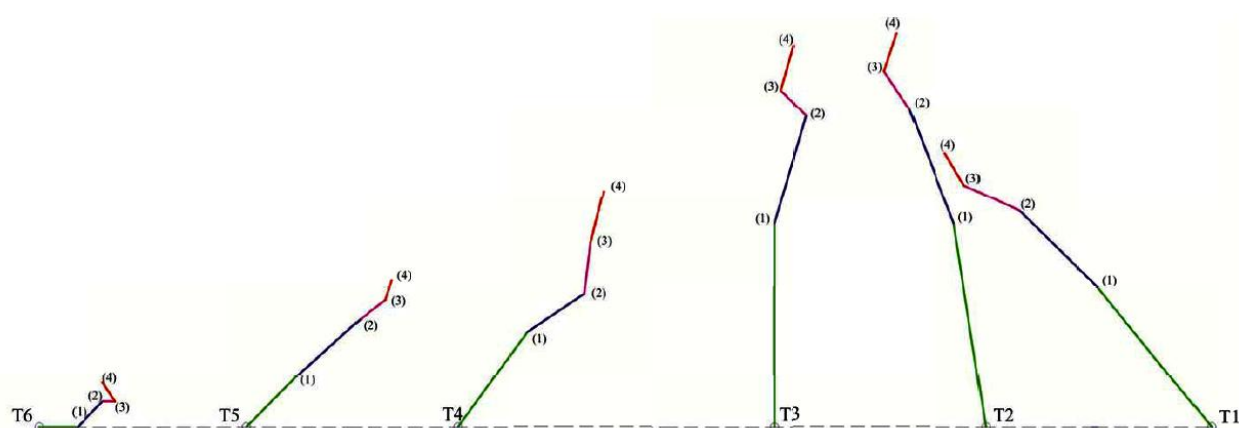
Према интензитету и правцу измерених хоризонталних померања, највећа узводна померања

су на круни бране 2-2, кота 654 мнв (слика 21), а нешто мања су низводна померања на круни бране 2-1, кота 630 мнв (слика 22). Интензитет и правац израчунатих хоризонталних померања на крунама брана 2-2 и 2-1 су идентични, а однос интензитета је сличан, који је у математичком моделу већи, јер се односи на бесконачан временски период, а не на период од 3 године, који је до сада био обухваћен геодетском оскултацијом.

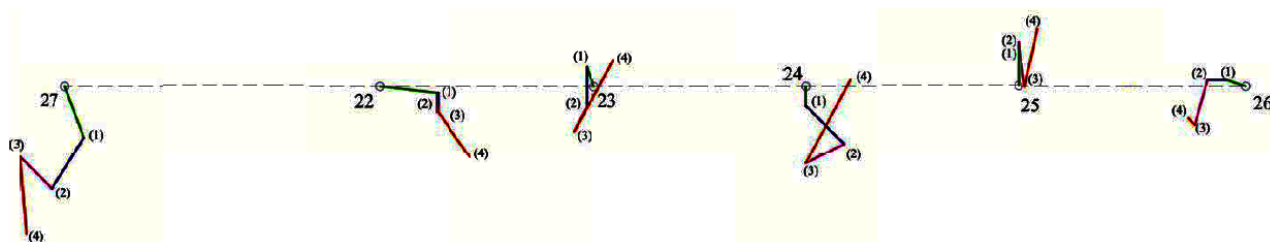
Према измереном вертикалном слегању њихов интензитет опада са 10,8 cm на круни бране 2-2 (кота 654 m н.в.), слика 23, до 2,3 cm на круни бране 2-1 (кота 630 m н.в.), слика 24. Сличан одговор добија се и са математичким моделом, где су слегања смањена са 50 cm на 10 cm, тако да је однос смањења приближно једнак, односно $(50/10 = 5,0) \approx (10,8 / 2,3 = 4,7)$.



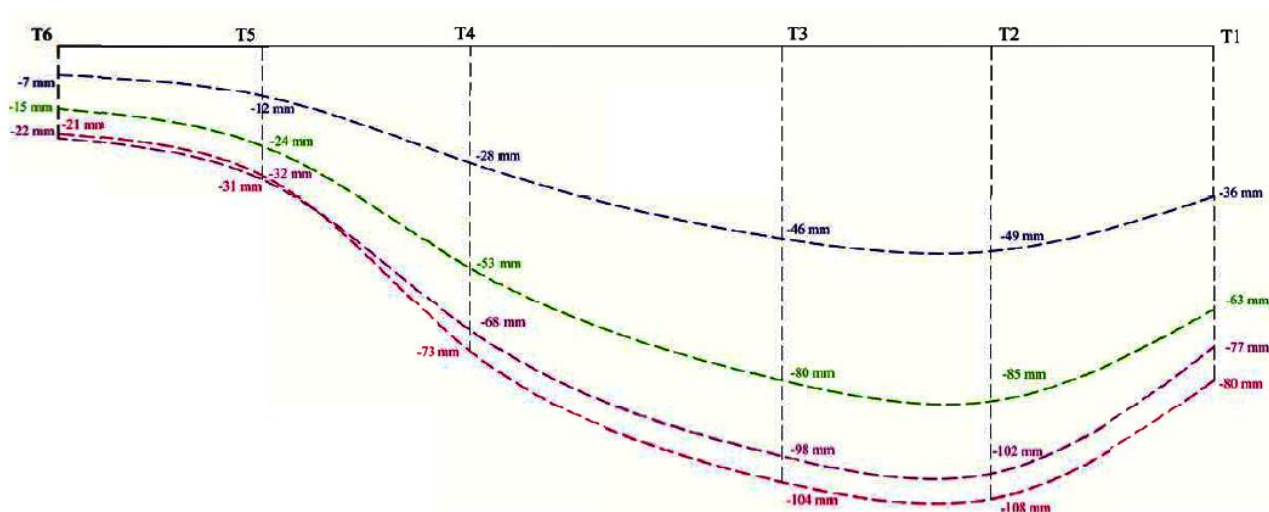
Слика 20. Скица нивелманске мреже (од 3 репера у близини бране) и мреже од 40 мерних места у телу бране, за одређивање вертикалних померања, (-Z) је слегање и (+ Z) је подизање



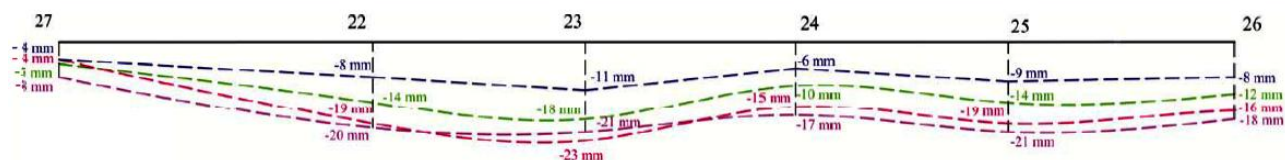
Слика 21. Хоризонтална померања, на круни бране 2-2 на коти 654 m надморске висине, од серије 0 до серије 4



Слика 22. Хоризонтална померања, на круни бране 2-1 на коти 30 m надморске висине, од серије 0 до серије 4



Слика 23. Вертикално слегање, на круни бране 2-2 на коти 654 m надморске висине, од серије 0 до серије 4



Слика 24. Вертикално слегање, на круни бране 2-1 на коти 630 m надморске висине, од серије 0 до серије 4

6. ЗАКЉУЧАК

Значај оскултационих мерења (геодетске и са инструментима) је процена степена регуларног понашања бране. Ако се померања региструју у другом смеру и већим интензитетом од израчунатих, онда је то аларм да се са насутом конструкцијом догађа нешто неправилно. У таквом случају треба извршити додатна геотехничка истраживања и иновирати анализу стања напона и деформација, како би се открио узрок, а затим прешло на санацију бране.

Упоређивањем измерених вредности за површинска померања, положајне (хоризонталне) и висинске (вертикалне) тела бране, систематизоване у извештају о геодетским мерењима у новембру 2019. године и израчунатих померања у телу бране Тополница, закључује се да су измерена померања у истом смеру, али са нижим интензитетом од израчунатог математичким моделом. Стога ценимо да се брана понаша нормално у текућем периоду и да се сазнањима из тумачења геодетске оскултације у новембру 2019. може закључити да је стабилност бране задовољена.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Geo-Slope SEEP/W, 2016. " User's Guide for finite element seepage analysis ", GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada
- [2] Geo-Slope SIGMA/W, 2016. " User's Guide for finite element stress/deformation analysis ", GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada
- [3] ICOLD, 1982, Bulletin 45, Manual on tailings dams and dumps
- [4] ICOLD, 1989, Bulletin 74: Tailings Dam Safety Guidelines
- [5] ICOLD, 1994, Bulletin 97: Tailings Dam - Design of Drainage
- [6] ICOLD, 1995, Bulletin 101: Tailings Dams, Transport, Placement and Decantation - Review and Recommendations
- [7] ICOLD, 1995, Bulletin 98: Tailings Dams and Seismicity - Review and Recommendations
- [8] ICOLD, 1996, Bulletin 103: Tailings Dams And Environment - Review and Recommendations
- [9] ICOLD, 1996, Bulletin 104: Monitoring of Tailings Dams - Review and Recommendations
- [10] ICOLD, 1996, Bulletin 106: A Guide to Tailings Dams and Impoundments - Design, Construction, Use and Rehabilitation
- [11] ICOLD, 2001, Bulletin 121: Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences - Lessons Learnt From Practical Experiences
- [12] ICOLD, 2011, Bulletin 139, Improving tailings dam safety - Critical aspects of management, design, operation and closure
- [13] Petkovski L., 2015.09 "MODIFIED CONVENTIONAL DAM IN PHASE CONSTRUCTION – AN ALTERNATIVE TO TAILINGS DAM", UDK: 627.821, Original scientific paper, Watereconomy, ISSN 0350-0519, Vol. 47 (2015), No. 273-275, p. 41-50, Beograd, Srbija;
- [14] Petkovski L., 2019.11 "APPLICATION OF "IN SITU" INVESTIGATIONS ON LIQUEFACTION MODELING AND ANALYSIS OF THE PRIMARY MEASURES TO INCREASE THE SEISMIC RESISTANCE OF THE TAILINGS DAMS", UDK: 532.532/624.058.83, Originalni naučni rad, VODOPRIVREDA, ISSN 0350-0519, Vol. 51 (2019), No. 297-299, p. 55-68, Beograd, Srbija
- [15] Petkovski L., Gocevski B., Mitovski S., 2014.06 "COMPARATIVE ANALYSIS ON CHOICE OF MOST FAVORABLE METHOD FOR TAILINGS DAM CONSTRUCTION", paper, IV Symposium of MAG, June 25-28, Struga, R.Macedonia, Proceedings 293-300;
- [16] Petkovski L., Mitovski S., 2012.10 "Structural safety of tailings dams at increasing of the deposit space", Conference, Talinigs dams in Republic of Macedonia, MACOLD, 30-31.10.2012, Shtip, R.Macedonia, Proceedings, 89-100
- [17] Petkovski L., Mitovski S., 2015.06 "Creating of tailings space by stage construction of rockfill dam", 25. Congress on Large Dams, ICOLD, 13–19 June 2015, Stavanger, Norway, CD Proceedings Q.98-R.4, p. 53-65
- [18] Petkovski L., Mitovski S., 2018.04 "NUMERICAL ANALYSIS OF DISPLACEMENTS IN THE POST-EXPLOITATION PERIOD OF TAILINGS DAMS WITH A COMBINED CONSTRUCTION METHOD", Topic - Tailings Dams, USSD 38th Annual Meeting and Conference, A balancing Act: Dams, Levees and Ecosystems, April 3- May 4, 2018, Miami, Florida, USA, CD Proceedings
- [19] Petkovski L., Mitovski S., 2018.07, "ASSESSMENT OF SEISMIC RESISTANCE OF COMBINED TAILINGS DAMS", 26. Congress on Large Dams, ICOLD, 1–7 July 2018, Vienna, Austria, CD Proceedings Q.101-R.58, p.978-991
- [20] Petkovski L., Mitovski S., 2019.05, "Application of SPT Results On Liquefaction Phenomenon Modeling Of Tailings Dam", 3-rd International Symposium on Dams and Earthquakes, organized by WGDE-EC-ICOLD and PCOLD, ISBN: 978-972-49-2308-6 Proceedings, p.209-220, (6-8).05.2019, Lisbon, Portugal
- [21] Petkovski L., Mitovski S., 2019.10 "An analysis of the waste lagoon water level influence on the liquefaction resistance of the tailings dams", 11th ICOLD European Club Symposium, "The future of Dams (in Europe): Prospects and Challenges in a changing Environment", CD Proceedings - Session 8: Advances in dam engineering: modelling, 2-4 October 2019, Chania, Crete, Greece,
- [22] Petkovski L., Peltechki D., Mitovski S., 2014.09 "CONTRIBUTION TO THE METHODOLOGY

ON CHOICE OF MOST FAVORABLE SITE AND OPTIMAL DAM TYPE FOR CREATION OF TAILINGS”, paper, 10th Conference on water economy and hydrotechnics, 18-19 September 2014, Struga, R. Macedonia, Proceedings, p.227-236, ISBN 978-608-65373-3-3;

- [23] Petkovski L., Tančev L., Mitovski S., 2007. 06 "A Contribution to the standardization of the modern approach to assessment of structural safety of

embankment dams", 75th ICOLD Annual Meeting, International Symposium "Dam Safety Management, Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operation of Large Dams", 24-29 June 2007, St.Petersbourg, Russia, Abstracts Proceedings p.66, CD-ROMX

DISPLACEMENTS OF A COMBINED TAILINGS DAM - A CASE STUDY

by

Ljupcho PETKOVSKI, PhD, CEng, Prof.
Faculty of Civil Engineering in Skopje,
University Sts Cyril and Methodius, RN Macedonia

Summary

The tailings dams, due to the enormous volume of the waste lagoon, are earth-fill structures with highest potential hazard for the surrounding. However, the numerous reports of collapses of the tailings dams in the last three decades, indicate that the procedures and techniques in the design, construction, maintenance and technical monitoring of the embankment dams for water storage were not applied to the tailings dams, with the same carefulness and the proper caution. The comparison of the calculated and measured horizontal and vertical displacements in the tailings dam post-service period is necessary to make the valid conclusion about the regular behavior and for the satisfactory stability of these complex heterogeneous earth-fill structures.

In this paper, the calculated displacements from the numerical model of the static analysis of the hydro tailings dam Topolnica are compared with the measured values from geodetic survey, as a part of the monitoring process. The combined tailings dam Topolnica of the copper/gold mine Buchim, Radovich, in the east part of RN Macedonia, is formed by downstream (in the first stage, dam No. 1) and upstream (in the second stage with two phases, dams No. 2-1 and No. 2-2) method of construction, with total height from the crest of the highest dam to the downstream toe of the dam of 141.2 m.

Key words: tailings dams, static analysis, technical monitoring

Redigovano 5.11.2020.