

НАСИПИ ИЗНАД ПОСТОЈЕЋИХ ТАЛОЖНИХ ЈЕЗЕРА – ГЕОСРЕДИНЕ СА НАЈВЕЋИМ ПОТЕНЦИЈАЛНИМ ОПАСНОСТИМА

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

РЕЗИМЕ

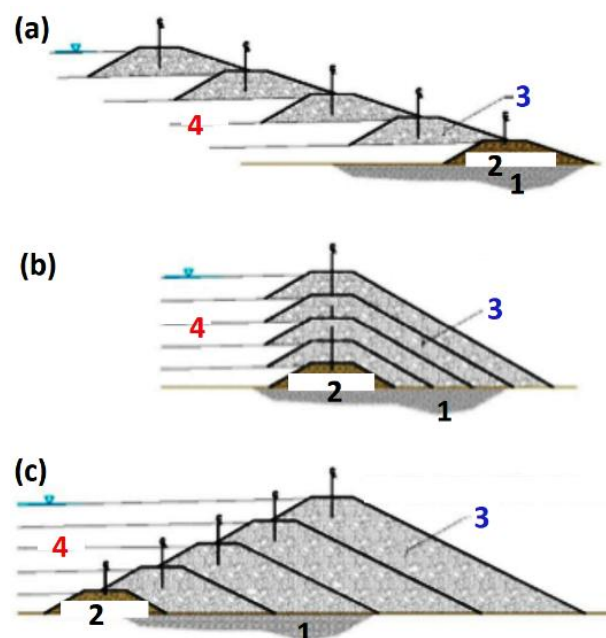
Насипи изнад таложних језера или надоградња постојећих хидројаловишта, са аспекта стабилности хетерогених геосредина, имају велике сличности са јаловишним бранама са узводним начином изградње. Јаловишна брана изнад таложног језера или јаловишна брана са узводним начином изградње подложна је ликвидацији под статичким и динамичким (цикличним) оптерећењем и стога представља хидрограђевински објекат са највећим ризиком у погледу стабилности. Потреба за обезбеђивањем додатне запремине за депоновање јаловинског материјала, неопходног за редован рад рудника у условима просторне ограничености, актуелизира доградњу постојећих таложних језера. Ову надоградњу карактеришу детаљна геотехничка истраживања и софистициране конструктивне анализе, које су илустрирани резултатима испитивања стабилности насипа сувог одлагања изнад таложног језера Саса 2, Македонска Каменица.

Кључне речи: јаловишне бране, таложна језера, суво одлагање, надоградња, конструктивна анализа, ликвидација

1. ПОТРЕБА ЗА НАДОГРАДЊОМ ПОСТОЈЕЋИХ ТАЛОЖНИХ ЈЕЗЕРА

У фази коришћења хидројаловишта, флотациона јаловина са хидротранспортом (углавном гравитационом пулповодом) се одводи до круне јаловишне бране. Тамо се циклонирањем раздваја на две фракције. Јаловишна брана се гради од крупније или суве фракције (циклонски песак), а финија или течна фракција (циклонски муљ) се одлаже у таложно језеро. Према начину напредовања или

изградње јаловишне бране разликују се три методе: низводно, централно и узводно (слика 1.1).



Слика 1.1. Методе изградње јаловишних брана: (а) узводни, (ц) централни, (с) низводни. 1 – основа, 2 – почетна брана, 3 – циклонирани песак, 4 – циклонирани муљ

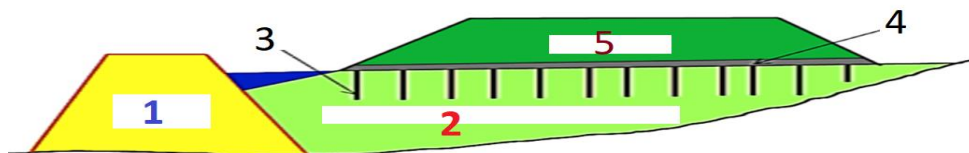
Досадашња пракса је потврдила да се највећа стабилност јаловишне бране постиже низводним начином напредовања. У том случају се круна бране помера низводно и циклонирани песак се наноси у нагнутим слојевима дуж низводне косине преко постојећег насипа од јаловишног песка. Најнижа стабилност хетерогне геосредине се добија узводним методом фазног напредовања. Тада, у свакој следећој фази, круна пешчане бране се помера

узводно, односно пешчане бране се темеље на постојећи таложени јаловински муљ.

Хетерогена геосредина – јаловишна брана изнад тачожног језера или јаловишна брана са узводним начином изградње подложно је ликвидацији под статичким и динамичким (цикличним) оптерећењем. Статичка ликвидација (Petkovski L., Mitovski S., 2019.05) је могућа: (а) са додатним спољним оптерећењем које условљава повећање смичног напона, при чему се стање напона на $(q-p')$ дијаграму помера „горе“ до пресека са површином колапса и/или (б) са даљим засићењем водом и смањењем ефективних нормалних напона, при чему се стање напрезања у $(q-p')$ дијаграму помера „улево“ до пресека са површином колапса. Динамичка ликвидација (Petkovski L., Mitovski S., 2018.07) настаје при деловању земљотреса, где циклично оптерећење изазива континуирано повећање порног притиска, што условљава смањење ефективних напона, при чему се стање напона у $(q-p')$ дијаграму се помера „лево“ до пресека са површином колапса. Када дође до ликвидације, разара се структура гранула и чврстоћа материјала на смицање опада до „steady-state strenght“. Због тога се јаловишне бране са узводним начином

изградње третирају као хидрограђевински објекти највећег ризика и не препоручују се у сеизмички активним регионима. У неким земљама са високом сеизмичношћу, на пример у Чилеу и Перуу, изградња јаловишних брана узводним методом изградње је забрањена законом.

Надоградња таложних језера код постојећих хидројаловишта, са аспекта стабилности хетерогене геосредине, има велике сличности са јаловишним бранама са узводним начином изградње. Кључна разлика је у томе што је завршен период са хидротранспортом пулпе и што је формирано таложно језеро хидројаловишта са коначном котом. За рад рудника у наредном периоду, уколико нема простора за ново таложно језеро, односно нема хидротранспорта јаловине, онда се за пулпу из флотационог постројења примењује метода са пресовањем и филтрирањем, која резултира „сувом јаловином“. Ако се горња површина постојећег јаловишта користи као подлога за насип сувог слагања (dry stacking), онда због постојања вишка порног притиска (excess pore pressure) унутар таложног језера од слабо пропусног јаловинског муља, стандардно решење су мере за дисипацију порног притиска, слика 1.2.



Слика 1.2. Надоградња постојећег таложног језера са сувим одлагањем. 1 – постојећа брана, 2 – постојеће таложно језеро хидројаловишта, 3 – вертикални дренажи за ослобађање вишка порног притиска (wick drain), 4 – дренажни тепих (granular bedding), 5 – суво одлагање (dry stack)

Поставља се логично питање – одакле потреба рударских компанија да иницирају решења са надоградњом постојећих таложних језера? Очигледно је да се ради о насутим конструкцијама са највећим ризиком и да би се потврдила њихова стабилност неопходна су детаљна геотехничка истраживања и софистициране конструктивне (статичке, филтрационе, динамичке) анализе, односно велика финансијска улагања. Објашњење је, по нашем мишљењу, следеће. С једне стране, простор за опстанак, развој и раст рударских предузећа, неопходних за егзистенцију становништва у појединим регионима (који се

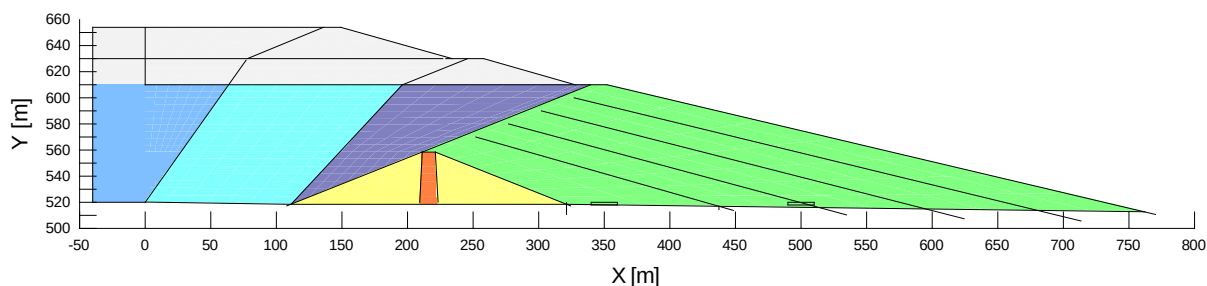
ослањају на рударски комплекс), због наметања све строжијих еколошких и социолошких критеријума, постаје све ограниченији. С друге стране, добијање дозволе за проширење концесионог подручја (или повећање индустријског обима) од огромног броја агенција/институција, у земљама које су јако бирократизоване и, нажалост, корумпиране, за рударске компаније се дугорочно одуговлачи у исцрпљујући административни процес са неизвесним исходом на крају. Стога се рударске компаније све више одлучују за решења за ризичне хидротехничке објекте, односно насипе изнад постојећих таложних језера.

2. ПРИМЕРИ НАДОГРАДЊЕ ПОСТОЈЕЋИХ ТАЛОЖНИХ ЈЕЗЕРА У МАКЕДОНИЈИ

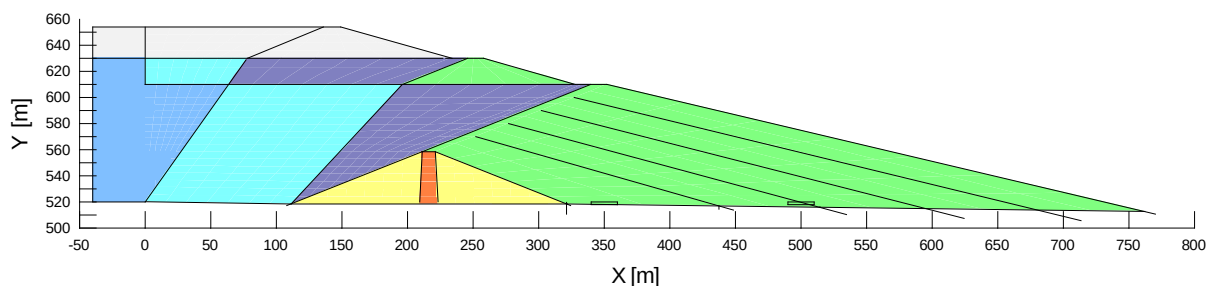
Примери надоградње постојећих таложних језера (или хидро грађевинских објеката високог ризика) такође постоје у Р. С. Македоније, од којих ћемо издвојити три код рударских предузећа „Бучим“ – Радовиш, „Булмак“ – Пробиштип и „Саса“ – Македонска Каменица.

Хидројаловиште Тополница рудника бакра „Бучим“ Радовиш је у употреби од 1979 године. У протеклом периоду у Тополницу је депонована јаловина у количини већој од 130 Mm^3 и акумулирано је око $9,0 \text{ Mm}^3$ воде. Ову јаловишну брану карактерише фазна изградња и комбиновани метод, са низводним напредовањем у првој фази и узводним напредовањем током надоградње у другој фази, реализована у две етапе (Petkovski L., Mitovski S.,

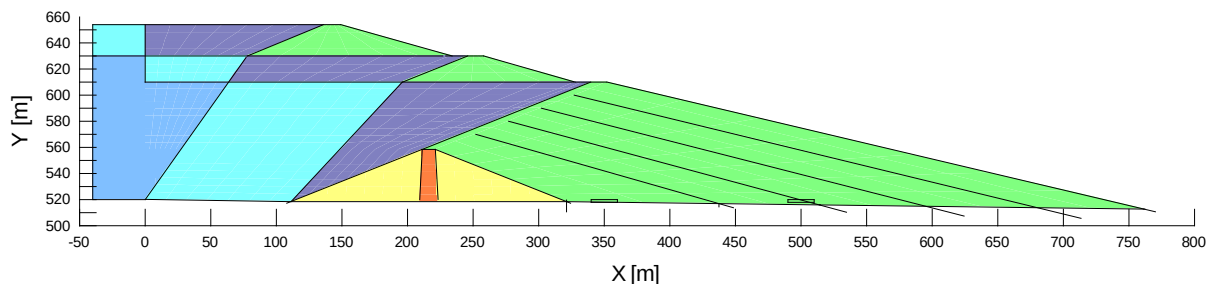
2018.04). Изградња пешчане бране у почетној фази, до коте 610 м.н.в. (I фаза), изведена је у косим слојевима, напредујући низводно од почетне бране (слика 2.1), са котом у основи од 518,5 и котом круне на 558,5 м.н.в. Затим, изградња пешчане бране до коте 630 м.н.в. (II фаза, етапа 1), због близине с. Тополница до низводне ножице бране, изведена је насипом у узводном правцу (слика 2.2). У завршној фази усвојена је круна пешчане бране до висине од 654 м.н.в. (II фаза, етапа 2), са напредовањем у узводном правцу, слика 2.3, (Грађевински факултет – Скопје, 2018.09). Јаловишна брана Тополница, са висином бране 2-2 изнад основе код почетне бране $H_0 = 654,0 - 518,5 = 135,5 \text{ m}$, једна је од највиших јаловишта у Европи. Коначна висина јаловишне бране 2-2, од круне до низводне ножице, износи $H_2 = 654,0 - 512,8 = 141,2 \text{ m}$, што брану Тополница чини највишом браном у Р. С. Македонији (Petkovski L., Mitovski S., 2019.09).



Слика 2.1. Изградња хидројаловишта до коте 610 м.н.в. (I фаза)



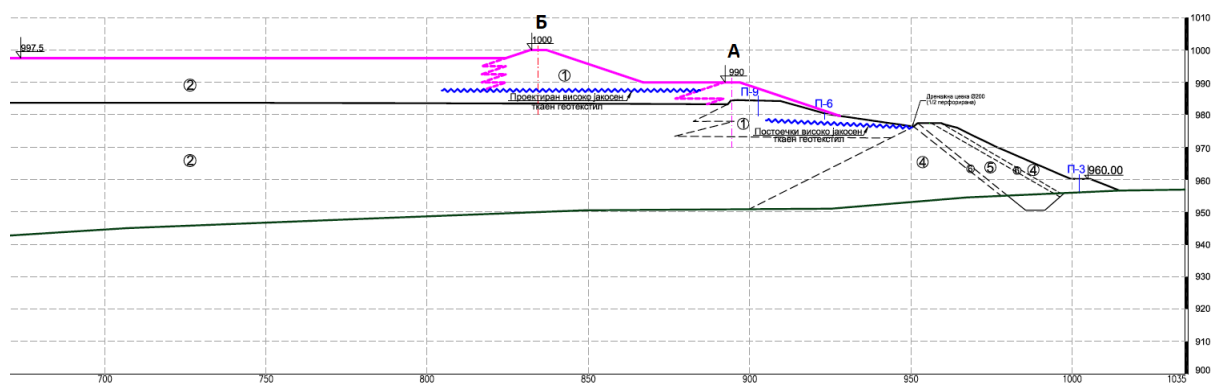
Слика 2.2. Изградња хидројаловишта до коте 630 м.н.в. (II фаза, етапа 1)



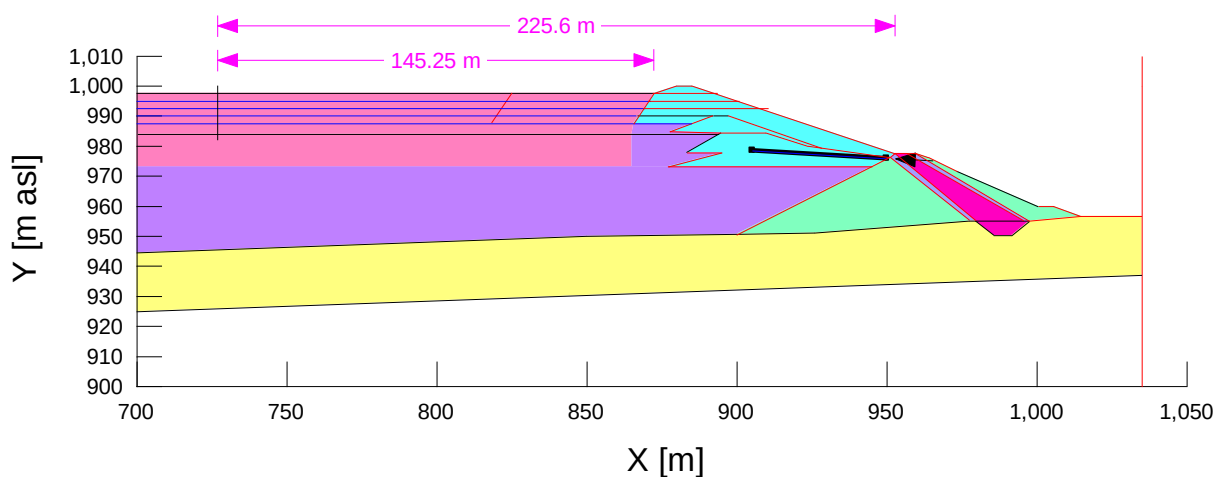
Слика 2.3. Изградња хидројаловишта до коте 654 м.н.в. (II фаза, етапа 2)

Рудник „Тораница“, Крива Паланка (Булмак) тренутно послује са производњом руде од око 320.000 t/год, а за потребе те производње у функцији је постојеће хидројаловиште Тораница. Таложно језеро хидројаловишта је формирано узводном и низводном браном. Узводна (или ретензиона) брана је конвенционална брана (камено земљана са глиненим екраном) са круном на коти 977,5 m.n.v. Низводна брана је јаловишна брана са низводном изградњом од циклонираног јаловинског песка. Постојеће јаловиште Тораница је два пута надвишено. Прво надвишење је било до висине круне коте 900,0 m.n.v. Ретензиона брана је надвишена јаловишном браном са централним начином изградње, али са круном помереном са

конвенционалне бране, односно темељене на таложном језеру, на позицији „А“ (слика 2.4). Друго надвишење, које је у фази изградње, пројектовано је до коте 1.000 m.n.v., у складу са најновијом техничком документацијом за хидројаловиште рудника „Тораница“ (Геинг – Скопје, 12.09.2018.). Овим пројектом је било предвиђено да се ретензиона брана надвиси јаловишном браном са круном на коти 1.000 m.n.v. од циклоналног песка са централним начином градње, темељене на таложном језеру, на позицији „Б“. У току је израда алтернативног решења за надградњу узводне бране до коте од 1.000 m.n.v. (ДИПКО – Скопје, 30.08.2022), слика 2.5, са локацијом код „А“.



Слика 2.4. Скица надвишења узводне (ретензионе) бране хидројаловишта Тораница, према прилогу 3 Основног пројекта од 12.09.2018.

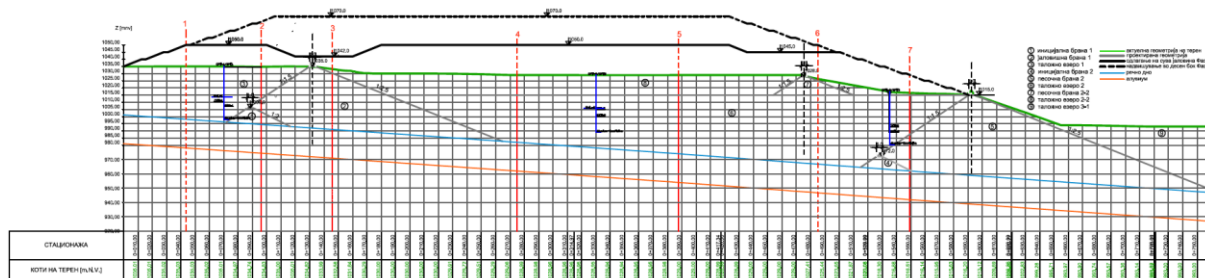


Слика 2.5. Скица надвишења узводне (ретензионе) бране хидројаловишта Тораница, према Анексу 1 Основног пројекта од 30.08.2022.

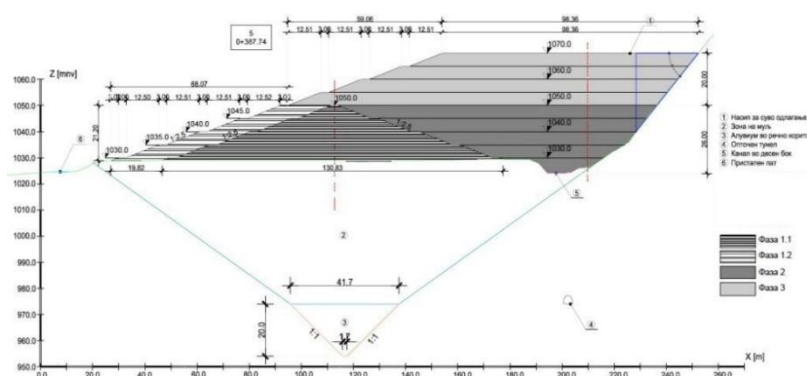
У досадашњем периоду коришћења хидројаловишта рудника „Саса“ у М. Каменици, они били су намењени за одлагање флотационе јаловине добијене технолошким поступком флотације минерала олова и цинка. Хидротранспортом, пулпа је спровођена до круна јаловишних брана у каскадном систему дуж реке Каменице, за хидројаловишта: 1, 2, 3-1, 3-2 и 4 (у периоду када су били активни), одакле је циклонима издвојена у две фракције. Низводне бране су грађене од крупније суве фракције (песка), а финална течна фракција је депонована у таложна језера. Према тренутном стању хидројаловишта, активно је јаловиште бр. 4 које ће се формирати изградњом комбиноване јаловишне бране 4, са коначном котом круне бране на 952 м.н.в. и таложно језеро са максималним радним нивоом од 950 м.н.в.

Потребу обезбеђивања додатне запремине за депоновање јаловинског материјала, неопходног за

редован рад рудника „Саса“ у будућности, више пута је анализирао стручни тим рудника „Саса“. У јулу 2019. године уочена је прва могућност за одлагање јаловине на постојећа таложна језера (*Грађевински факултет – Скопје, 2019.07.23.*). У јулу 2020. године актиелизирана је могућност сувог одлагања јаловине, запремине од најмање 2,25 Мм³, на површини таложног језера 2 и дела изнад лагуне 1. Јаловиште 2 је формирано јаловишном браном 2, изграђене низводним начином градње и са круном на 1.015 м.н.в. Узводно од бране 2, пре око 3-4 деценије, изграђена је јаловишна брана 2-2 висине 13,0 м, која је повисила коту таложног језера 2, на 1.028 м.н.в., узводно од бране 2-2. Репрезентативни уздужни и попречни пресеци геосредине су према Идејном решењу (*Грађевински факултет – Скопје, 2020.06.26.*), где је усвојен насип сувог одлагања у хоризонталним слојевима од 5,0 м, са бермама од 3,0 м, нагиб 1:2,5 и коначна кота на круни насипа на 1.070 м.н.в. (слике 2.6 и 2.7).



Слика 2.6. Репрезентативни уздужни пресек, скица насипа за суво одлагање Саса 2, према Идејном решењу 26.06.2020.



Слика 2.7. Репрезентативни пресек, профил бр.5, (са скицом насипа од сувог одлагања према Идејном решењу 26.06.2020..

У даљем тексту овог чланка дат је приказ кључних поставки и закључака из конструктивне анализе насипа сувог одлагања изнад таложног језера Саса 2,

односно статичке и филтрационе анализе (*ДИПКО - Скопје, 2021.09.27.*) и динамичке анализе (*ДИПКО - Скопје, 2021.09.28.*).

3. КОНСТРУКТИВНА (СТАТИЧКА И ДИНАМИЧКА) АНАЛИЗА НАСИПА ОД СУВОГ ОДЛАГАЊА ИЗНАД ЈАЛОВИШНОГ ЈЕЗЕРА САСА 2

3.1 Основни улазни подаци за конструктивну анализу

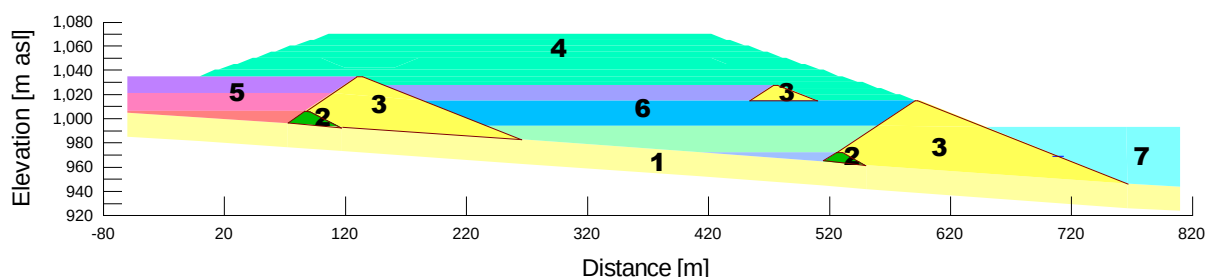
Конструктивна (статичка и динамичка) анализа насипа сувог одлагања преко јаловишног језера Саса 2 (слика 3.1) урађена је према најновијим препорукама ICOLD-a, односно са једним математичким моделом за различите фазе оптерећења, при чему свака наредна фаза има почетно стање напона утврђено претходном етапом.

Материјал у таложном језеру 1 у статичкој анализи је моделован са три зоне:

- 1-1 од терена на 1.035 м.н.в. (круна пешчане бране 1) до 1.021 м.н.в.,
- 1-2 од 1.021 м.н.в. до 1.006 м.н.в. (круна почетне бране 1),
- 1-3 од 1.006 м.н.в. до контакта са алувијумом (узводна ножица почетне бране 1 на коти од 995,9 м.н.в.).

Материјал у таложном језеру 2, у статичкој анализи, моделован је са четири зоне:

- 2-1 са терена на 1.028 м.н.в. (круна пешчане бране 2-2) до 1.015 м.н.в. (круна пешчане бране 2-1),
- 2-2 од 1.015 м.н.в. до 994 м.н.в.,
- 2-3 од 994 м.н.в. до 972 м.н.в. (круна почетне бране 2),
- 2-4 од 972 м.н.в. до контакта са алувијумом (узводна ножица почетне бране 2 на 964,5 м.н.в.).



Слика 3.1. Репрезентативни уздужни пресек, према Идејном решењу од 26.06.2020. (1) песак и шљунак (алувијум), (2) шкриљци (почетна брана), (3) песак - циклонирани (броне 1, 2-1, 2-2), (4) суво одлагање - насип, (5) муљ 1 - циклонирани (језеро 1), (6) муљ 2 - циклонирани (језеро 2), (7) муљ 3 - циклонирани (језеро 3-1).

Према најновијим геотехничким истраживањима за хидројаловишта 1, 2 и 3-1, као и за материјал из сувог одлагања, систематизован у (Геинг Кук - Скопје, 2020.09.29), (ДИПКО, Скопје, 2020-11-25), (Knight Piésold, London, 2021-05-12), са већим бројем SPT и CPT тестова, на одабраним локацијама, добијени су следећи кључни подаци:

1. Притисак пора у таложним језерима 1 и 2 износи око 50% хидростатског притиска.
2. Вредности коефицијента консолидоване недрениране чврстоће смицања $Cu(yield)/\sigma'v0$ добијене помоћу CPT су:
 - о За таложно језеро 2 на површини износи 0,21, на дубини од 30 m је 0,24 и на дубини од 45 m је 0,26.
 - о За таложно језеро 1 износи 0,21 на површини и 0,23 на дубини од 30 m.
3. У условима ликвидације, вредности коефицијента $Cu(лик)/\sigma'v0$, добијене помоћу CPT-а су:
 - о За таложно језеро 2 на површини износи 0,04, на дубини од 30 m износи 0,12.
 - о За таложно језеро 1, на површини је 0,10, на дубини од 20 m је 0,05.
4. У условима ликвидације, параметри за одређивање коефицијената заостале (резидуелне) чврстоће на смицање $Cp/\sigma'v0$, упоређени су и потврђени са SPT.
5. За максималну компактност (највећу чврстоћу) насипа од сувог одлагања, према подацима из лабораторије Грађевинског факултета у Скопју, систематизованим на дан 27.4.2021, оптимална влажност износи 10,9%, што даје максималну суву запреминску тежину од 21,5 kN/m³.

3.2 Мере за побољшање стабилности и усвојени облик гео-средине

Критеријум за оптимизацију форме насипа сувог одлагања је максимизација запремине насипа, задовољавањем критеријума привремене и трајне статичке стабилности и прихватљиве сеизмичке отпорности хетерогене геосредине. У моделирању, како би се испунио критеријум оптимизације, поступно су примењиване и верификоване мере побољшања стабилности.

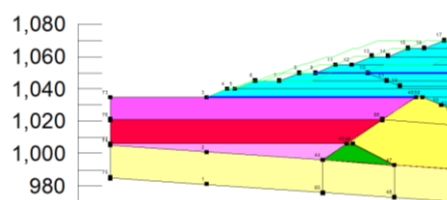
Прва мера за побољшање стабилности геосредине је постављање дренажних тепиха на контакту насипа са сувим одлагањем са постојећим таложним језерима 1 и 2 (на коти од 1.035 m.n.v. узводно од бране 1, на коти 1,028 m.n.v. узводно од бране 2-2 и на коти од 1.015 m надморске висине узводно од бране 2-1) и унутар новог насипа од суве јаловине - на коти од 1,050 m надморске висине. Овом мером се практично елиминише порни надпритисак у насипу од сувод одлагања током изградње и смањује се у таложним језерима. Ова мера има најзначајнији утицај на побољшање стабилности и задржана је у свим даљим варијантама.

Друга мера за побољшање стабилности геосредине која је разматрана је извођење бетонских шипова у критичним зонама подножијног клизања, са следећим параметрима: међуосовинско растојање $L = 1,0$ m, пречник $d = 0,6$ m, дубина $H = 25$ m, модул еластичности $E = 20,0$ GPa, пресек $F = 0,471$ m², момент инерције $I = 0,0064$ m⁴. Као што се и очекивало, када шипови нису усидрени у крутом окружењу, не постиже се побољшање стабилности. Моделом је потврђено да таква мера за предметну геосредину има занемарљив утицај и стога није разматрана у даљим варијантама.

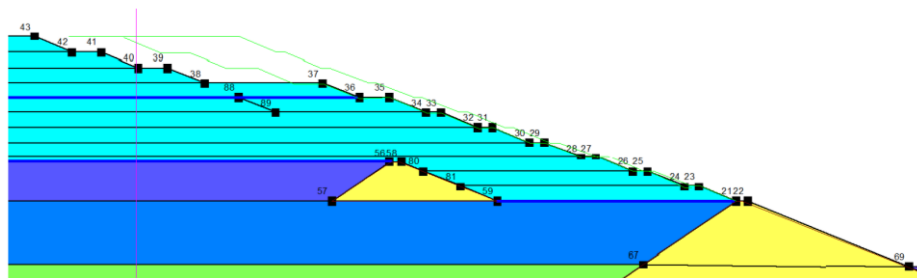
Трећа мера за побољшање стабилности геосредине која је разматрана је узимање у обзир затезне

чврстоће геотекстила који треба да покрије дренажне теписе. Применом спојних елемената моделован је геокмпозит (геотекстил повезан са геомрежом) са следећим параметрима: дебелина $d = 4$ mm, модул еластичности $E = 1,0$ GPa, пресек $F = 0,008$ m² (за два слоја геокмпозита). Као што се и очекивало, геокмпозит може да обезбеди уједначенија слегања (ирелевантно за насип суве јаловине), али не може побољшати укупну сигурност од подножијног клизања. Модел је потврдио да таква мера за предметну геосредину има занемарљив утицај на стабилност и стога није разматрана у даљим варијантама.

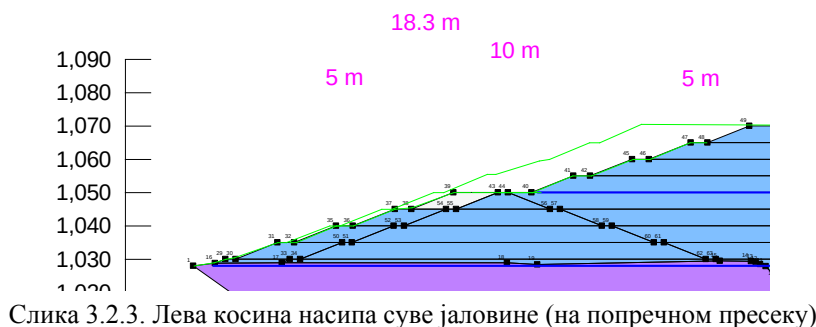
Четврта мера за побољшање стабилности геосредине која је разматрана је смањење оптерећења у активној зони критичних површина клизања. Ово се може постићи само повећањем берми у појединим етапама током изградње насипа од суве јаловине, што ће неминовно изазвати смањење запремине сувог одлагања. Ова мера је разматрана у већем броју варијанти, са постепеним повећањем ширина берма, али и уз истовремену проверу статичке стабилности и сеизмичке отпорности (подужног и попречног модела), како би се утврдила максимална запремина насипа суве јаловине која испуњава критеријуме стабилности конструкције. На овај начин обликована је форма насипа са сувом јаловином (слике 3.2.1, 3.2.2. и 3.2.3), за који су резултати анализе стабилности конструкције приказани у наредним поглављима.



Слика 3.2.1. Узводна косина насипа суве јаловине (на уздужном пресеку)



Слика 3.2.2. Низводна косина насипа суве јаловине (на уздужном пресеку)

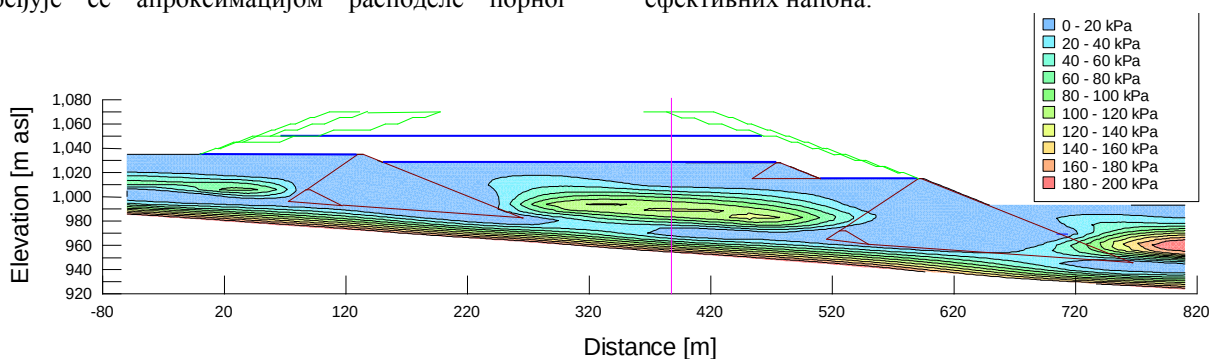


Слика 3.2.3. Лева косина насипа суве јаловине (на попречном пресеку)

3.3. Резултати статичке анализе

Почетно стање напона пре почетка сувог одлагања одређује се апроксимацијом расподеле порног

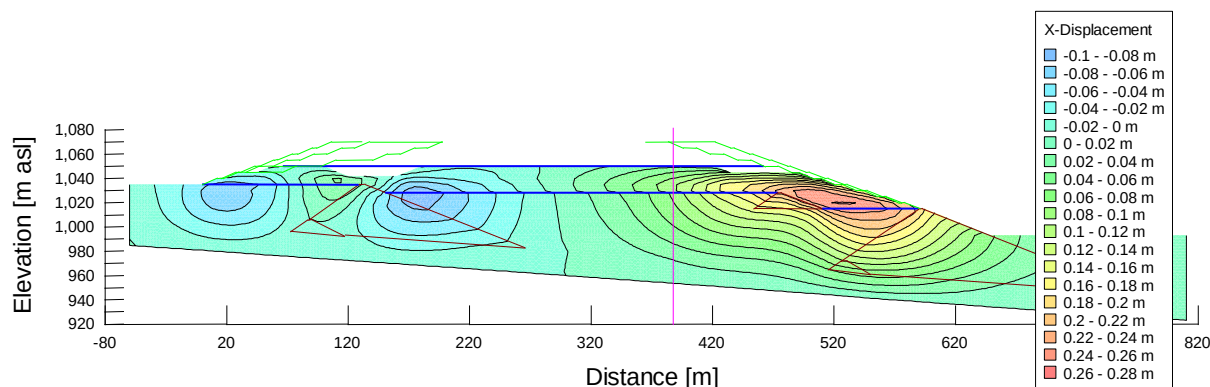
притиска (слика 3.3.1), анализом типа 'In situ', чиме се симулира почетно стање укупних напона (почетно стање за следећу фазу оптерећења) и ефективних напона.



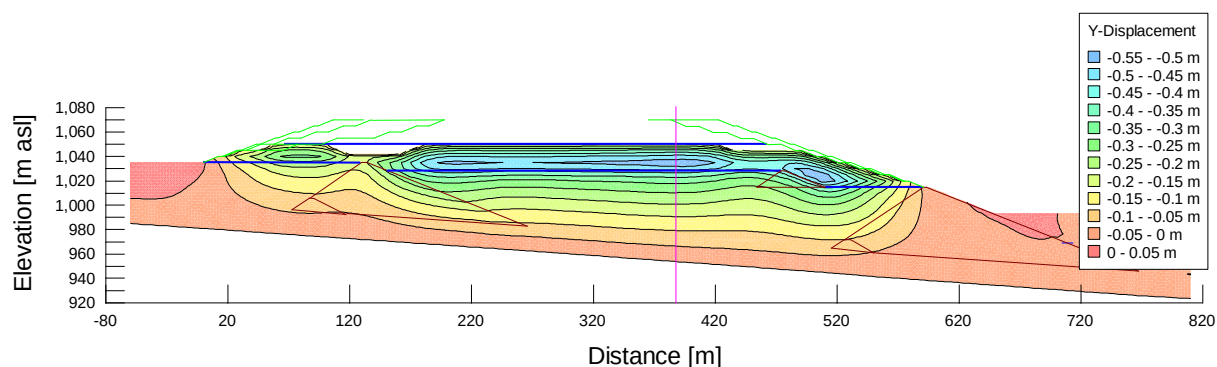
Слика 3.3.1. Приближно почетно стање за порног притиска у хидројаловиштима 1, 2 и 3-1

Изградња насипа суве јаловине у фази 1-1 у трајању од 2,05 године моделује се у 7 фаза (или прираста оптерећења) у трајању од 9.226.341 s, симулираних са 10 прорачунских корака са експоненцијалним временским прирастом. Ова анализа је урађена применом консолидационе анализе спрегнутог

механичког и филтрационог одговора у временском домену, односно типа анализе 'Coupled Stress/PWP'. На крају ове фазе одређене су кумулативне вредности хоризонталних и вертикалних померања (слике 3.3.2 и 3.3.3), порног притиска и ефективних нормалних вертикалних напона.



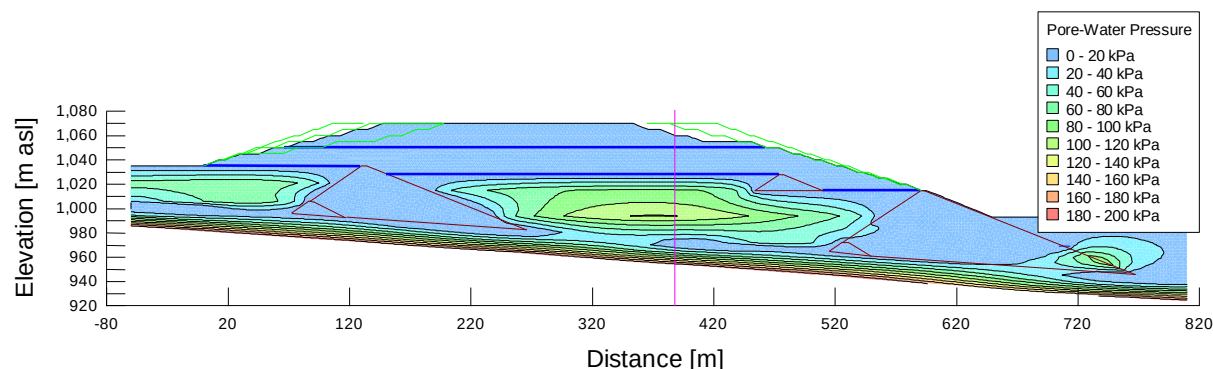
Слика 3.3.2. Хоризонтална кумулативна померања на крају фазе 1-1, у јаловиштима 1, 2 и 3-1



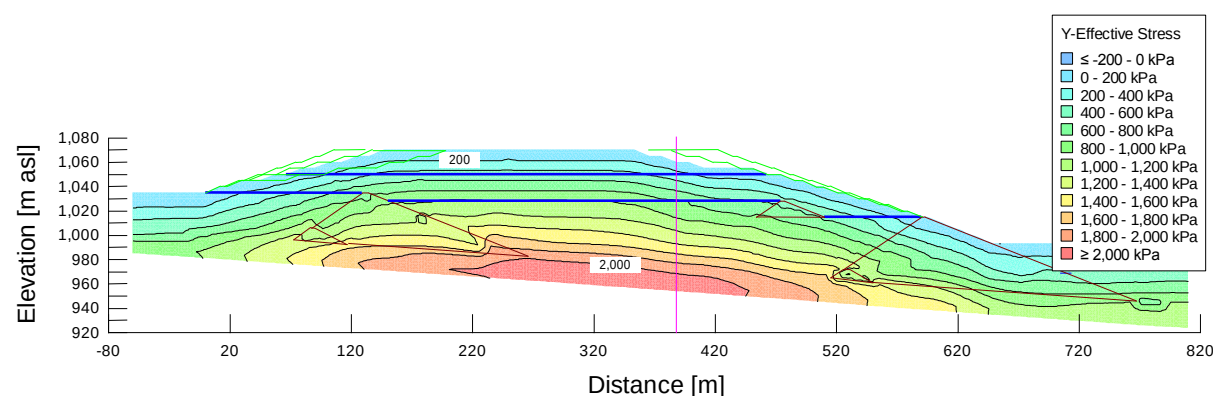
Слика 3.3.3. Вертикална кумулативна померања на крају фазе 1-1, у јаловиштима 1, 2 и 3-1

Коначно, за фазу 1-1 проверена је стабилност узводне и низводне косине насипа са сувом јаловином, методом коначних елемената (МКЕ), односно са оствареним напонима из анализе стања

напона и деформација. Повећање стабилности са дисипацијом порног притиска у завршној фази фазе 1-1 је следеће: за низводну косину од 1,429 до 1,437, а за узводну од 1,341 до 1,414.



Слика 3.3.4. Порни притисак на крају фазе 3, у хидројаловиштима 1, 2 и 3-1



Слика 3.3.5. Ефективни нормални вертикални напони на крају фазе 3, у јаловиштима 1, 2 и 3-1

3.4. Резултати динамичке анализе

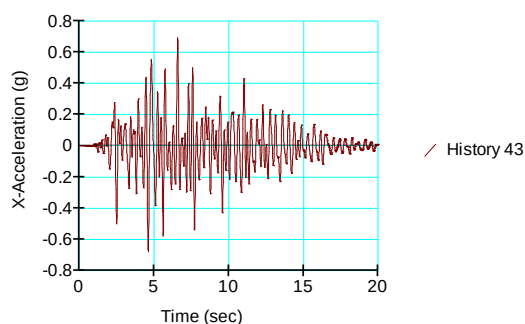
Избор параметара за пројектне земљотресе и усвајање динамичких параметара су узети од

сеизмолошке подлоге (ИЗИИС - Скопје, 2020.10). Уобичајена процедура за анализу динамичког одговора насипних брана за водне акумулације је да се спроведе са најмање три различита

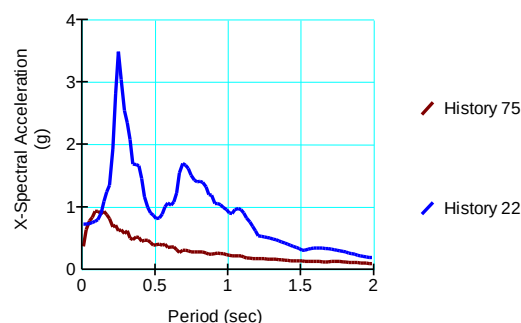
акцелерограма, за два нивоа сеизмичке побуде: (1) основни оперативни земљотрес - OBE (Operating Basis Earthquake) и (2) земљотрес за процену сигурности – SEE (Safety Evaluation Earthquake). У предметној анализи насипа сувог одлагања, где уз евентуална оштећења у круни истог, не постоји опасност од наглог и неконтролисаног испуштања језера, усвојен је поједностављени поступак, са по једним синтетичким акцелерограмом за три нивоа побуде, где је, заправо, анализама додат и основни пројектни земљотрес – DBE (Design Basis Earthquake), са периодом понављања од $T = 475$ година, који се користи за важне грађевине које не изазивају потенцијалну опасност по околину.

Динамички одговор геосредине, током SEE са $PGA_x = 0,36 \text{ g}$ и $PGA_y = 0,25 \text{ g}$, трајањем $t = 20 \text{ s}$, са синтетичким акцелерограмом T=10,000_1, дат је на сликама 3.4.(1,2,3,4). Визуелна провера да ли је динамички одговор исправан је дијаграм релативних хоризонталних померања. Трајно вертикално померање, изазвано инерцијским силама током земљотреса, релевантно за процену сеизмичке отпорности јаловишне бране 2-1 са круном на коти 1.015 м.н.в. је слегање у круни и износи 22 cm.

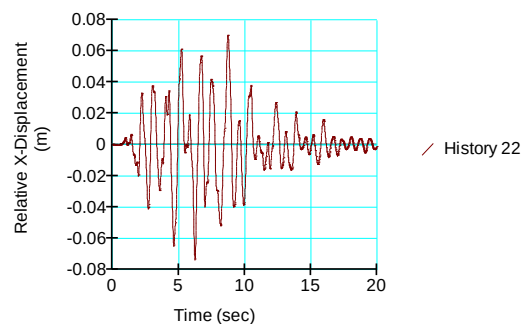
У току земљотреса долази до повећања порног притиска, што ствара ликвидациону зону након земљотреса (слика 3.4.5). Појава ликвидације ће проузроковати прераспodelу ефективних напона, што ће резултирати постпотресним померањима у геосредини. У наставку је дата и критична површина клизања за низводну косину у фази после земљотреса (слика 3.4.6).



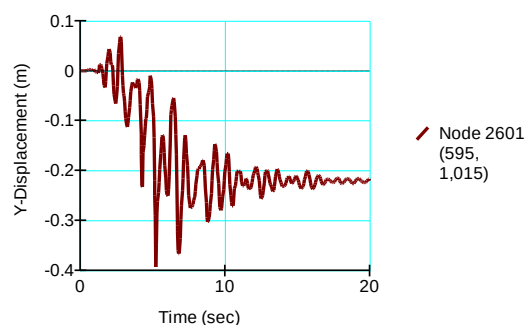
Слика 3.4.1. Апсолутна убрзања $a[g] \div t[s]$ у хоризонталном правцу, низводна круна насипа суве јаловине



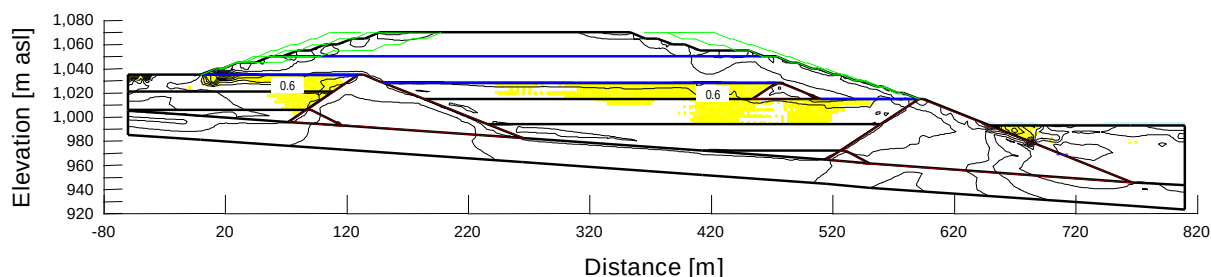
Слика 3.4.2. Спектар одговора убрзања $Sa [g] \div T [s]$ за $DR = 0,05$, у стени (побуда) и у круни бране 2-1 (одговор)



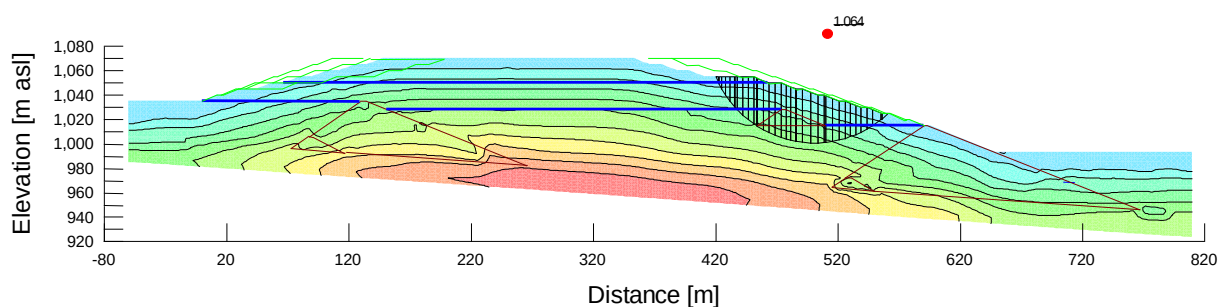
Слика 3.4.3. Релативна померања, хоризонтални $x[m] \div t[s]$, у круни бране 2-1



Слика 3.4.4. Трајна вертикална померања, методом динамичке деформације, $Y[m] \div t[s]$, у круни бране 2-1



Слика 3.4.5. Дистрибуција коефицијента q/p' [-] са ликвидацираном зоном, за стање напона на крају дејства земљотреса



Слика 3.4.6. Критична клизна површина за низводну косину, у фази после земљотреса

4. ЗАКЉУЧАК

Из прегледа резултата оцењујемо да су статичка и динамичка стабилност насипа за суво одлагање са дефинисаним обликом (величине берме на одговарајућим котама) задовољене и издвајамо следеће закључке:

1. Извођење две подфазе 1-1 и 1-2 мора се реализовати у једној фази 1, са насипом у хоризонталним слојевима, јер одвојено извођење фазе 1-1 нема задовољавајућу привремену стабилност леве косине.
2. Ако се у току изградње спојених фаза 1-1 и 1-2 (односно фаза 1) уочи привремена нестабилност према десној косини, тада фазе 1 и 2 треба испунити истовремено.
3. Псеудостатичка стабилност под дејством јаког земљотреса није задовољена ни за једну косину (низводна, узводна и лева) насипа са сувом јаловином. Због тога се сеизмичка отпорност геосредине мора истражити и верификовати динамичком анализом у временском домену, узимајући у обзир феномен ликвидације.
4. Максимално убрзање у круни на 1.015 м.н.в. бране 2-1 (одређено анализом уздужног пресека)

износи 0,23 g (за OBE), 0,41 g (за DBE) и 0,70 g (за SEE).

5. Максимално убрзање у круни на 1.070 м.н.в. насипа сувог одлагања (одређено анализом попречног пресека) износи 0,22 g (за OBE), 0,40 g (за DBE) и 0,45 g (за SEE).

6. Стално вертикално померање, изазвано инерцијским силама током побуде, које је релевантано за процену сеизмичке отпорности бране 2-1 са круном на 1.015 м.н.в. (одређено анализом уздужног пресека) је слегање у круну, и износи 0 cm (за OBE), 0 cm (за DBE) и 22 cm (за SEE).

7. Са динамичким одзивом репрезентативних пресека (уздужних и попречних), за ниво сеизмичке побуде OBE са $PGA = 0,07$ g са периодом понављања $T = 145$ година, долази до ликвидације у таложним језерима Саса 1 и Саса 2.

8. Минималне вредности коефицијента сигурности у фази после земљотреса (утврђене анализом уздужног пресека) су $F_s = 1.064 \leq F = 1.1$ (за низводну косину) и $F_s = 1.237 > F = 1.1$ (за узводну косину) за OBE, DBE и SEE.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] DIPKO, Skopje, 2020-11-25, The Geotechnical Investigation Report from SPT and CPTu performed at Sasa tailings dams, Jovan B. Papic (responsible researcher)
- [2] Knight Piésold, London, 2021-05-12, File No.: LO501-00057/05-03, CPT ground investigation on TSF 1 and TSF 2 at the Sasa Lead and Zinc Mine in North Macedonia, Joel Slater (responsible researcher)
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Petkovski L., Mitovski S., 2019.09 "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,
- [7] Геинг - Скопје, 2018-09-12, Основен проект за надвишување на ретензиона и песочна брана од 986.5 мнв до 1,000.0 мнв на хидројаловиште Тораница - К. Паланка, одговорен проектант Наталија Алтановска Божиновска
- [8] Геинг КуК - Скопје, 2020.09.29. Елаборат од дополнителни геотехнички истражни работи и лабораториски испитувања на Хидројаловиште 2 – Рудник САСА, С.Георгиевски (одговорен истражувач)
- [9] Градежен факултет – Скопје, 2018.09, Иновирана анализа на сеизмичката отпорност на јаловиштето Тополница, за променлива кота на нормално ниво во езерото од 649.0 до 652.0 мнв, со проценка за складирање на максимална количина јаловина во езерото, (Анекс бр. 4 на Изведбениот проект на јаловиштето Тополница, Бучим, со круна 654.0 мнв), Љ.Петковски, (Одговорен проектант), и други
- [10] Градежен факултет – Скопје, 2019.07.23, Техничко решение за суво одлагање на јаловина над таложните езера, со прелиминарна проценка на стабилноста на јаловишните брани на рудникот Саса, М. Каменица, Љ.Петковски, (Одговорен проектант), и други
- [11] Градежен факултет – Скопје, 2020.06.26, Идејно решение за дополнителен волумен за суво одлагање на јаловина кај хидројаловиштата 2 и 3-2 на рудникот Саса, М. Каменица, Љ.Петковски, (Одговорен проектант), и други
- [12] ДИПКО – Скопје, 2021.09.27, Основен проект за суво одлагање над јаловиште 2 и дел над јаловиште 1 на рудникот Саса, М. Каменица, Книга 2. Статичка анализа на суво одлагање над јаловиште 2, Љ.Петковски (одговорен проектант) и други
- [13] ДИПКО – Скопје, 2021.09.28, Основен проект за суво одлагање над јаловиште 2 и дел над јаловиште 1 на рудникот Саса, М. Каменица, Книга 3. Динамичка анализа на суво одлагање над јаловиште 2, Љ.Петковски (одговорен проектант) и други
- [14] ДИПКО – Скопје, 2022.08.30, Проект за надвишување на ретензионата брана од кота 993.5 до кота 1,000.0 мнв на хидројаловиштето на рудникот Тораница, К. Паланка (Анекс бр.1 на Основен проект за надвишување на ретензиона и песочна брана од 986.5 до 1,000 мнв на хидројаловиште Тораница), Љ.Петковски (одговорен проектант) и други
- [15] ИЗИИС - Скопје, 2020.10, Студија за сеизмички hazard за профилот САСА-2, Извештај 2020-59, Д.Дојчиновски (Одговорен проектант) и други

EMBANKMENTS ABOVE EXISTING WASTE LAGOONS – GEO ENVIRONMENTS WITH THE HIGHEST POTENTIAL HAZARD

by

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

Summary

The embankments over the waste lagoons or the upgrade on tailings ponds at the existing tailings storage facilities, from stability aspects of a heterogenic geo environment, have many similarities with the tailings dams with upstream construction method. The tailings dam above the tailings pond, i.e. tailings dam with the upstream construction method, is susceptible to liquefaction during static and dynamic (cyclic) loading and therefore it is a civil engineering structure with highest stability risk. The need to provide an additional volume for depositing tailings material, necessary for

the regular operation of mines in conditions of spatial limitation, actualizes the upgrade of the existing sedimentation lakes. This upgrade is characterized by detailed geotechnical investigations and sophisticated structural analyses, which are illustrated by the results of the stability investigation of a dry stacking embankment above the tailings pond Sasa 2, Makedonska Kamenica.

Key words: tailings dams, waste lagoons, upgrade, dry stacking, structural analysis, liquefaction