



ОБЩИ ПРИНЦИПИ ЗА ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ НА УСТОЙЧИВОСТ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩА ВЪВ FLAC

Цветан Дилов
„Елаците-Мед“ АД, с. Мирково, Софийска област
tz.dilov@ellatzite-med.com

ABSTRACT

Numerical modelling of stability of facilities, as soil masses, is a powerful and cheap approach for evaluation of states of instability. Such modeling does not bring the facilities to real failure states. The input parameters for building a numerical model of tailings dams by using the FLAC software are presented in this study. General principles for such modelling are also presented. Such modeling is not trivial and it requires deep knowledge in soil mechanics and behavior of particulate matter. Understanding how to build a working code is necessary, for modelling of a realistic behavior of the model.

ВЪВЕДЕНИЕ

Изграждането на числен модел на устойчивостта в софтуера на Itasca Inc. FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua – Бърз Лагранжов Анализ на Непрекъснатата среда) предполага внимателен подбор на материалните свойства, геометрията, граничните условия, конститутивните уравнения, състоянията на натоварване и началните условия, които ще бъдат заложени в модела. Точното дефиниране на тези входни параметри позволява разработването и провеждането на ясно, надеждно и недвусмислено числено моделиране за оценка на устойчивостта на конструкции в земната механика. Процедурата на моделиране е сложна и налага следване на определен алгоритъм за постигане на крайните резултати.

МОТИВАЦИЯ ЗА ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА УСТОЙЧИВОСТ

Развитието на световната икономика налага все по-големи обеми от минна дейност, което от своя страна води до строежа на все по-големи конструкции, като открити минни изработки и хвостохранилища. Съоръженията за съхранение на минни отпадъци в наши дни трябва да отговарят на стриктни изисквания по отношение на гарантиране на тяхната цялост за продължителни периоди от време. Те трябва да притежават устойчивост както при статични условия, т.е. да могат да понасят собствения си товар по време на покой, така и при динамични условия – различни типове натоварвания – например използването на тежка механизация върху тях и понасяне на сеизмично въздействие (от взривни дейности, импактови събития или естествено породена сеизмичност). Най-икономичният и надежден подход за гарантиране на целостта на подобни съоръжения е провеждането на числено моделиране. Този подход изисква задълбочени познания в земната механика и поведението на зърнести материали при различни натоварвания. Подборът на входните параметри трябва да е базиран на възприетите в момента научни представи. Неправилният избор на параметри може да доведе до катастрофални последици, вследствие на неточната оценка на конструктивната устойчивост.

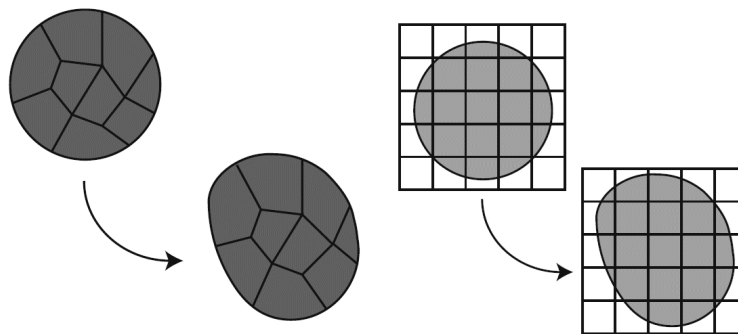
ИЗБОР НА СОФТУЕР ЗА ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ

Възможният избор на софтуер е измежду две основни групи софтуери – имплицитни и експлицитни. Първата група предоставя решения без да може да се изследва пътя на развитие на дадено поведение. Резултатите са крайни, след като са въведени началните условия. Такива изследвания могат да ни дадат сигурност за крайното състояние на дадена конструкция, като е възможно да се пропуснат състояния на неустойчивост по време на изграждане на съоръжението. Експлицитните софтуери могат да предоставят еволюцията на изграждане и експлоатация на съоръжението, което

дава по-голяма сигурност, че няма да се пропуснат евентуални нестабилности по време на живота на съоръженията.

Софтуерният пакет FLAC се разработва от Itasca Inc., САЩ (Itasca, 2024). Съществуват двумерен и тримерен варианти – FLAC2D и FLAC3D. Софтуерът е от тип “finite difference” (крайни разлики). При този подход пространството се дискретизира в мрежа от малки, дискретни клетки, по които решението се търси в центровете на клетките, чрез апроксимация на крайните разлики от производните (LeVeque, 2007). Пакетът е експлицитен, т.е. може да се изследва еволюцията на поведението на дадена конструкция от началото на изграждане до последните етапи от извеждането ѝ от експлоатация, както и след това, като непроменлив обект. FLAC е подходящ за моделиране на поведението на хвостов материал, защото софтуерът е създаден за моделиране на особено големи деформации в непрекъснатата среда, каквато на практика е материалът от намит хвост.

Лагранжовият анализ при деформации е фундаментален подход в механиката на твърдото деформируемо тяло. Той е фокусиран върху поведението на материалите по време, когато те търпят промени в тяхната форма и позиция (Qiu et al., 2011). С други думи, координатната система на този формализъм се движи с изследвания обект и следователно поведението на елементите на обекта зависи само от времето. За сравнение, при ойлеровия формализъм, обектът се изследва във външна за него, фиксирана координатна система, откъдето следва, че поведението на елементите на обекта зависи както от времето, така и от трите координати на елементите в пространството (Фигура 1).



Фигура 1. Деформация на непрекъснатата среда при лагранжов (ляво) и ойлеров (дясно) анализ (по Qiu et al., 2011, Fig.1)

Софтуерът FLAC се предлага на относително ниска цена, спрямо знанието което може да се извлече при моделиране в него на големи деформации, протичащи в сложни съоръжения. Негов недостатък е, че процесът на обучение на умел и надежден анализатор отнема дълго време (години) и е наложителен фокус и постоянство до достигане на дълбоко разбиране как софтуерът работи.

ИЗЧИСЛИТЕЛЕН ЦИКЪЛ

Численият анализ включва систематична поредица от операции, при които итеративно се изчисляват сили, премествания, напрежения и потенциални разрушения. Първо се изчисляват преместванията на материалните точки породени от силите действащи в тях, като се използват уравнения за движение на материалните точки. След това се решават конститутивните уравнения и се определят новите напрежения. После се извършва проверка за удовлетворяване на условия за разрушение, заложили предварително. Ако е налично разрушаване на материала в дадена изчислителна клетка, моделът се пренастройва за да се отчете влиянието на разрушението в бъдещето поведение на модела. Изчислява се тензора на напрежението за да може моделът да се актуализира за новия цикъл с новата конфигурация от сили, следствие от изчислените в цикъла премествания, разрушения и нови напрежения. Накрая на цикъла се провежда проверка за това дали са достигнати предварително заложили прагови граници. Ако не са достигнати такива, изчислителният процес преминава към следващия цикъл. Този подход позволява симулацията на сложни поведения в геотехнически и конструктивни инженерни съоръжения (Beuabanaki, 2020).

ВХОДНИ ДАННИ

Материални свойства

Материалните свойства могат да бъдат изведени от няколко източника: стандартни пенетрационни тестове, конични пенетрационни тестове, динамични пенетрационни тестове, лабораторни тестове, хидрогеоложки измервания и геофизични измервания за скоростите на сеизмичните вълни. Различните методи трябва да бъдат анализирани за степен на достоверност. За входни данни трябва да се използват най-достоверните. Например динамичните пенетрационни тестове са трудни за анализ. Световната практика не е извела надеждни корелативни зависимости и резултатите от тях трябва да се използват с повишено внимание и предимно за потвърждаване на данни от другите методи. За най-надеждни се считат коничните пенетрационни тестове с възможност за измерване на поровото налягане в средата. Техен недостатък е, че не могат да се провеждат на големи дълбочини. В такива случаи се предпочитат стандартните пенетрационни тестове. Лабораторните тестове също се разглеждат като най-надеждни, но при тях трябва да се борави внимателно с първичното взимане на пробата и транспорта до лабораторията. Като цяло, е необходимо провеждане на системен статистически анализ на данните, за да се прецени кои пакети информация са най-надеждни за използване. По-долу са разгледани основните параметри описващи материалните свойства на хвостов материал (Ghazal, 2024).

Плътност (ρ): Масата в единица обем от даден материал. В дририрано състояние се използва плътност на скелета (ρ_{dry}), като тя се определя въз основа на лабораторни измервания.

Относителна плътност (D_r): безразмерен параметър отразяващ степента на консолидация на зърнести материали. Тя влияе върху якостта на срязване, компресионните свойства и пропускливостта на материала.

Модул на еластична деформация (E): Мярка за коравината на даден материал или каква линейна деформация търпи той при определени нива на напрежения.

Модул на срязване при малки деформации (G_{max}): Мярка за реакцията на материала на срязващо напрежение при много ниски нива на деформация, обикновено под 10^{-6} % до 10^{-3} %. Извежда се от скоростта на разпространение на срязващите сеизмични вълни за материала.

Статичен модул на срязване (G): Възприема се да е $1/3$ от G_{max} :

$$G_{static} = \frac{G_{max}}{3} \quad (1)$$

Модул на обемна деформация (K): Определя се от статичния модул на срязване и коефициентът на Поасон:

$$K = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G \quad (2)$$

Коефициент на Поасон (ν): Отношението на странична деформация към осова деформация. За всички материали (циклониран пясък, намит хвост и зърнести материали за изграждане на диги) коефициентът на Поасон се приема за 0.3.

Кохезия (c): Компонентът от якостта на срязване, който е независим от свиващото напрежение.

Ъгъл на вътрешно триене (ϕ): Ъгъла при които в даден материал настъпва разрушение по време на срязваща деформация. Определя се въз основа на относителната плътност на материала. За скалната основа няма нужда да бъде определян, тъй като тя се разглежда да е с еластично поведение.

Дилатационен ъгъл (ψ): Ъгълът на обемно разширение по време на срязваща деформация

Якост на опън (σ_t): Максималното напрежение, което даден материал може да издържи при опън. Якостта на опън е значително по-ниска от якостта на натиск.

Водопрпускливост (k): способността на даден материал да пропуска движение на вода през него.

Геометрия на модела

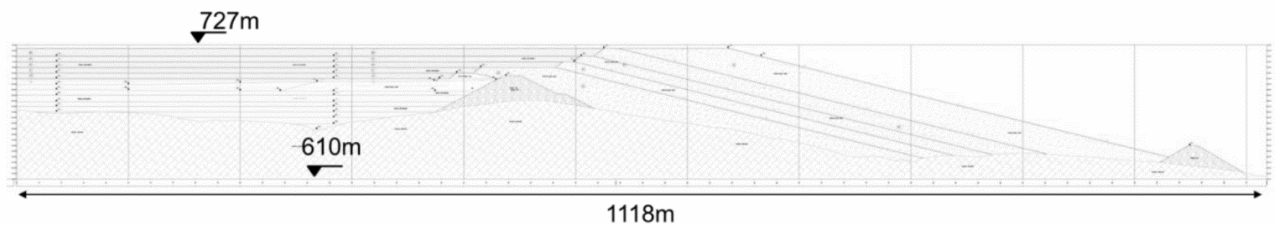
Размер на числения модел: Големината на модела в хоризонтална и вертикална посока. В хоризонтална посока, моделът трябва да е достатъчно дълъг, за да може да се изключи евентуалното влияние на сили породени в далечина от модела. Обикновено се приема, че дължината трябва да е 1.5

по-голяма от вертикалната дължина на откоса. Във вертикална посока, моделът трябва да достига до скалната основа и да е поне колкото е вертикалната дължина на откоса (Du and Tao, 2024) (Фигура 2).

Геометрия на откоса: Включва височина на откоса, ъгъл на откоса, геометрична характеристика на бермите и всякакви други особености в откоса.

Геометрия на отделните тела изграждащи модела: формата и взаимното положение между телата.

Дискретизация: В моделните тела се изгражда мрежа от изчислителни клетки. Размерът на клетките може да е променлив и да намалява за зоните с бърза промяна на параметрите. За динамичния анализ, дискретизацията на клетките за всеки материал е въз основа на еластичните свойства и честотното съдържание на сигналите отразяващи сеизмичното въздействие. Това е нужно за да се постигне точно представяне на вълновото енергийно разпространение в модела.



Фигура 2. Пример за геометрия на конкретен изчислителен профил, хвостохранилище „Бенковски II” (по Ghazal, 2024, Фигура 2-7). Долните по-бледи нива представят изградени етапи, а горните, леко по-тъмно сиви нива – проектните етапи на изграждане, всички на годишна база.

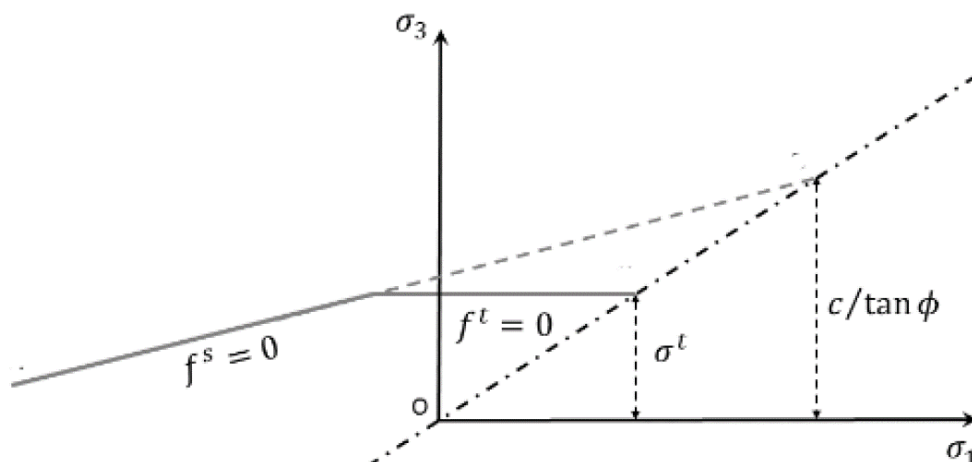
Гранични условия

Механични граници: Ограничителните граници в модела – те могат да са фиксирани (предават силите като твърда връзка) или хлъзгащи се (предават силите в една посока като твърда връзка а перпендикулярно на тази посока няма пренос на сили). Обикновено границата в основата на модела е фиксирана, а страничната граница е хлъзгаща се.

Хидравлични граници: Дефинират хидрогеоложките условия – нивото на подземните води, разпределението на поровото налягане, наличие на водоупори и локации на свободен водоизлив.

Конститутивни модели

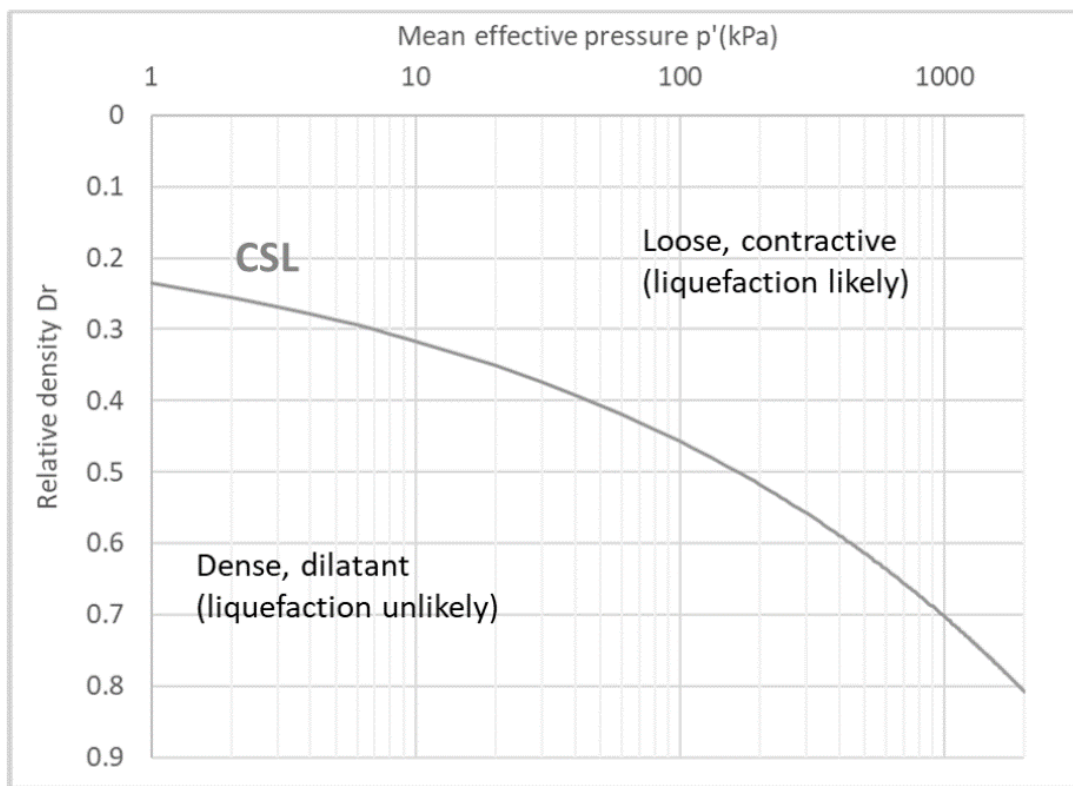
Конститутивен еласто-пластичен модел Мор-Кулон е добре да се използва **за статичния анализ**. При него модулът на срязване зависи от средното ефективно напрежение. Еластичното поведение се моделира чрез Закона на Хук с обобщено нарастване на напрежението. Модулът на срязване не е константен с увеличаване на дълбочината – той нараства в съответствие със средното ефективно напрежение. Моделът изрязва якостта на опън и кохезията, което води до това, че моровата обвивка става линейна и преминава през началото на координатната система (Ghazal, 2024) (Фигура 3).



Фигура 3. Критерии за разрушаване с еласто-пластичен модел Мор-Кулон (по Ghazal, 2024, Figure 3-1)

За динамичния анализ е подходящо да се избере конститутивен модел P2Psand. Моделът е разработен от специалистите на Itasca (Cheng and Detournay, 2021) въз основа на пластичност на пясъци с включена дилатация в структурата на материала – обемно разширение по време на срязваща деформация (Dafalias and Manzari, 2004), в рамките на Теорията за линията на критично състояние (Sadrekarimi and Olson, 2009). Моделът е приложим при динамично поведение на почви, податливи на втечняване.

P2PSand, използвайки формализма на Теорията за линията на критично състояние, описва физично състояние при което почвите достигат до стабилизирано състояние на срязваща деформация при константни обеми и напрежения. Дефинира се критична относителна плътност (D_{rc}), над която почвата е „плътна“ (т.е. дилатационна), а под нея – „рохка“ (т.е. свиваема). Тази критична относителна плътност зависи от типа на материала и от свиващото напрежение (Ghazal, 2024) (Фигура 4). Свиваемата почва е повече податлива на втечняване спрямо дилатационната почва.



Фигура 4. Линия на критичното състояние (CSL) за свиваема и дилатационна почви (по Ghazal, 2024, Figure 3-2)

Състояния на натоварване

Собствен товар: Гравитационният товар породен от теглото на отгоре-лежащия материал.

Външно натоварване: Товари приложени към повърхността на откоса (сгради, други конструкции, трафик от механизация).

Сеизмично въздействие: При динамичния анализ, входни параметри за сеизмично въздействие, като например максимални ускорения на земната повърхност и честотен спектър на реагиране.

Начални условия

Първоначално напрегнато състояние: Условието на предварителното поле с напрежения в почвения масив. Често това са напреженията в масива породени от литостатичното налягане по време на покой.

Първоначално порово налягане: Първоначалното разпределение на порово налягане в почвения масив. Моделирането трябва да включва оценка за нивата на подземните води, която да е калибрирана с данни от мониторингова система.



Параметри на анализа

Времева стъпка: Стъпковото време за един цикъл в числения анализ, при което се актуализира моделното състояние.

Критерии за конвергентност: Критерии за числена конвергенция на решението, в т.ч. толерантни нива за сили и премествания, извън които моделът няма да е реалистичен.

Продължителност на симулацията: Продължителността зависи от много фактори, като основна цел е да се постигне относителна кратко изчислително време (часове до десетки часове) за един изчислителен случай. Броят на изчислителните случаи зависи от сложността на изследвания модел и желанието да се представят различни елементи от еволюцията на модела.

ПРОВЕЖДАНЕ НА МОДЕЛИРАНЕ

Статичен анализ

Първоначално се провежда симулация за постигане на стабилизирано състояние на движението на подземните води. Водопропускливостта се постига с въвеждане на контраст за различните материали, което се калибрира с данни от мониторингова система. Съоръжението прогресивно се надгражда, съгласно проекта. На всеки етап се инициализира напрегнато състояние, което отразява отношението на хоризонталното към вертикалното напрежение. Следва активиране на полето с поровото налягане, като се използват резултатите от симулацията за постигане на стабилизирано състояние на движението на подземните води.

Динамичен анализ

Използват се синтетични акселерограми, подбрани така, че да са реалистични за типа на съоръжението, да е съобразен възможния диапазон от очаквани магнитуди, който съоръжението ще понесе за времето на неговия живот, и отчитането на базово земетресение със запис на акселерограма на разстояние по-малко от 30 km между епицентъра и сходно с моделираното съоръжение. Провежда се обработка на сигнала за да се намали изчислителното време за моделиране, като се отрязват долния и горния 1% от пълния интензитет на A_{rig} (интеграла на времевата история на ускоренията, използван като индикатор за потенциала на разрушаване) (Naeini M. and Akhtarpour, A., 2018).

Тъй като времевият мащаб за едно сеизмично събитие е в порядъци по-малък от мащаба за движение на подземните води, анализът се провежда в недренирано състояние. Хоризонталните компоненти на ускоренията се прилагат към основата на модела.

Следене на конвергенцията на модела

Необходимо е моделът да е със сходящо поведение. В противен случай няма да може да се достигне до реалистичен резултат. Например ако моделът произвежда последователни състояния с разходящи стойности на коефициента на сигурност, той не е реалистичен и трябва да бъде преразгледан за грешки в изграждането му.

ПОСЛЕДВАЩ АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Оценка на резултатите се осъществява чрез наблюдение на премествания, скорости на движение на материални тела в модела, разпределение на напреженията, коефициент на сигурност.

Използват се контурни плътностни диаграми по даден параметър, векторни диаграми на премествания и скорости на движение, таблично представяне на коефициенти на сигурност за различните изчислителни случаи. За ясно представяне на данните се избират най-характерни случаи отразяващи особени състояния в модела, като интерес представлява локализирането и определяне механизма на възможни разрушавания в модела.

Коефициентът на сигурност се изчислява посредством техниката за намаляване на якостта на сръзване (Itasca, 2024). Тази якост прогресивно се намалява до момента когато моделът достигне до гранично равновесие. В този момент в модела се формира зона на разрушаване. На практика ако съответният коефициент е над 1.0, зоната на разрушаване не отразява реално разрушаване, а най-слабата зона в модела. Техниката води до конвергенция до това най-слабо състояние, което отразява



устойчивост на модела. При коефициент на сигурност под 1.0 моделът е неустойчив, като най-слабата зона ще претърпи разрушение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численото моделиране на устойчивост на откоси и съоръжения се налага като евтин и бърз метода за оценка. Процесът на моделиране изисква прецизен подбор на входните параметри, които да отразяват достатъчно надеждно физичната реалност в моделирания обем от почвен масив. Възможностите на представяне на резултатите на практика са неограничени. Затова се подбират примерни състояния от различни етапи на моделирането, които най-добре отразяват еволюцията на моделирания деформационен процес. Необходимо е специалистът по числено моделиране да е детайлно запознат с входните параметри и фината настройка на софтуерния код. Това е начална предпоставка за надеждно проведено числено моделиране.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. **Beyabanaki, A.R.** (2020). A comparison between using finite difference and limit equilibrium methods for landslide analysis of slopes containing a weak layer, *American Journal of Engineering Research*, **9**, 12, pp. 68-79.
2. **Cheng, Z., Detournay C.** (2021). Formulation, validation and application of a practice-oriented two-surface plasticity sand model, *Computers and Geotechnics*, **132**, 103984.
3. **Dafalias, Y. F., Manzari, M. T.** (2004). Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **130**, 6, 622-634.
4. **Du, C., Tao, H.** (2024). Seepage stability analysis of geogrid reinforced tailings dam, *Scientific Reports*, **14**, Article No 1814.
5. **Ghazal, R.**, (2024), Benkovski II tailings dam dynamic analysis (Report 23R-022C), Itasca, France.
6. **Itasca Software 9.0 documentation.** (2024). *FLAC (FLAC2D/FLAC3D) FLAC Theory and Background*, Itasca Inc., Minneapolis.
7. **LeVeque, R. J.** (2007), Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations – Steady-State and Time-Dependent Problems, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia.
8. **Naeini M., Akhtarpour, A.** (2018). Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **107**, pp. 179-194.
9. **Qiu, G., Henke, S., Grabe, J.** (2011), Application of a coupled Eulerian–Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations, *Computers and Geotechnics*, **38**, pp. 30-39.
10. **Sadrekarimi, A., Olson, S.M.** (2009). Defining the critical state line from triaxial compression and ring shear tests, in *Hamza M. et al. (Eds.) Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, IOS Press. Amsterdam, doi: 10.3233/978-1-60750-031-5-36.