

ОСВРТ НА ДВОДИМЕНЗИОНАЛНЕ И ТРОДИМЕНЗИОНАЛНЕ МЕТОДЕ АНАЛИЗЕ ОДРОНА INSIGHT INTO 2D AND 3D METHODS FOR ROCKFALL ASSESSMENT

Милош Марјановић
Биљана Аболмасов

Прегледни рад
10.5937/IASPN25063M

Апстракт: У овом раду је приказан преглед теоријских приступа моделовању одрона са освртом на ниво детаљности и апроксимације који се у сваја за једноставна и сложена решења. На конкретном примеру приказана је компарација различитих приступа и дат осврт на практичност њихове примене. Пример се односи на одрон који се 1974. догодио на каменолому кречњака на улазу у Ђердапску клисуру. Симулација различитих величина блокова дала је сличне и реалне трајекторије, али су моделоване брзине, енергије и висине одскока варијабилни и под утицајем локалне топографије и карактеристика подлоге, који у једноставним моделима не може да се компензује.

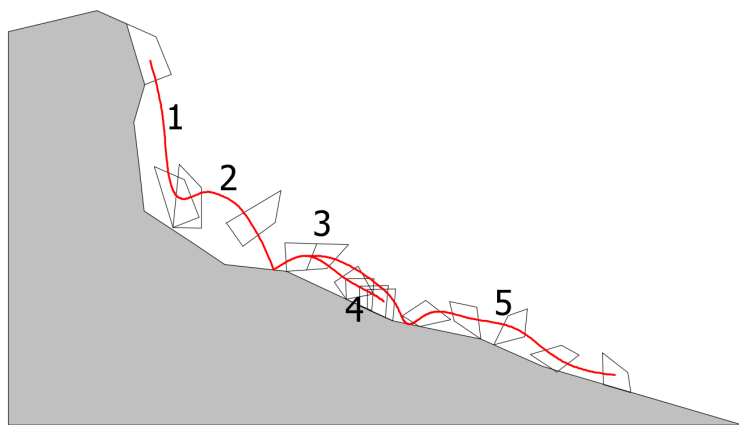
Кључне речи: одрони, моделовање, симулација, трајекторије.

Abstract: This paper reviews theoretical approaches to rockfall modelling, focusing on the level of detail and degree of approximation adopted in simplified and advanced models. A case study of a 1974 rockfall at a limestone quarry near the entrance to the Đerdap Gorge illustrates a comparison of different modelling approaches and their practical applicability. Simulations with varying block sizes produced realistic trajectories, while modelled velocities, energies, and rebound heights showed variability, affected by local topography and substrate properties, which in simplified models cannot be fully represented.

Key Words: rockfall, modelling, simulation, trajectories.

УВОД

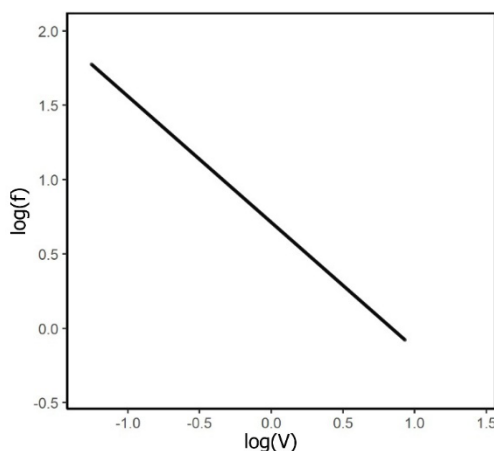
Одрони представљају појаве различитог обима, динамике, врло разноврсног начина манифестовања, с различитим последицама по урбане и инфраструктурне објекте. Донекле, та је разноликост последица и нејасног разграничења у нашој и интернационалној пракси услед непотпуне класификације појава, али и сложености самих одрона. Примера ради, неки одрони, нарочито на високим и дугим падинама и косинама, могу имати елементе и слободног пада блокова (што по дефиницији обухвата одроне), али и одскакања, котрљања или клизања у различитим фазама самог процеса, па је блок који је најпре дестабилизован механизмом нпр. претурања, могао даље слободно падати, па потом одскакати, да би се потом котрљао и коначно клизао, па га је тешко једнозначно одредити као последицу одроњавања, клизања блока или осипања (Слика 1).



Слика 1: Шемајски приказ механизма сложених одрона: 1. слободан пад; 2. одскок; 3. фразиментација; 4. клизање; 5. котрљање

Нарочито је значајна њихова улога на саобраћајној (путној и железничкој) инфраструктури у изведеним косинама или природним литицама, у условима уског топографског профила, обично дуж долињских страна река и потока (кисура, кањона...) у брдско-планинском рељефу. Њихов интензитет и учесталост обрнуто су пропорционални (Слика 2), па се одрони катастрофалних размера дешавају ретко, али изазивају огромне последице, док се мали (микро) одрони могу дешавати свакодневно без значајних последица. У том контексту, детаљност анализе одрона је пропорционална очекиваним последицама, па се у инжењерској пракси намеће проблем оптималног баланса између детаљности и прагматичности приступа анализи одрона. Превише сложен приступ одузима (некад

сасвим непотребно и неоправдано) превише ресурса, времена и економских средстава, док превише једноставан приступ (још више неоправдано) може имати врло опасне консеквенце (погрешне прорачуне и процене). На једној страни, с развојем технологија (и у погледу прикупљања и обраде података, снимања косина, технологија осматрања померања, доступног хардвера и софтвера) намеће се све чешћа тежња ка сложе- нијем приступу, док с друге стране инжењерска прагматичност налаже да се користи што једноставнији приступ који даје довољно тачне податке за даље пројектовање. Оптимизација приступа, стога, и није тако једноставна и захтева доста знања и искуства. У овом раду, дат је управо један осврт на постојеће стање у струци са аспекта моделовања одрона, са упоредном анализом сложености приступа на практичном примеру.



Слика 2: Дијаграм учесталости и зајремине одрона (према Moos et al., 2022)

КОНВЕНЦИОНАЛНИ И САВРЕМЕНИ ПРИСТУПИ АНАЛИЗИ ОДРОНА

Одрони се по правилу морају сагледати тројако (Марјановић, 2022), односно кроз три фазе:

- од анализе стене као материјала од којег су изграђени блокови који се крећу али и као подлоге која интерагује с кретаним материјалом,
- преко селекције нестабилних блокова (кинематски услови, положај, геометрија, величина и сл.),
- до анализе трајекторија и крајњег домета одроњених блокова.

Ту се може додати и анализа интензитета и учесталости одрона и својстава њима угрожених објеката (хазард и ризик).

У сваком овом кораку се реално стање у одређеној мери поједностављује, па сложеност модела варира од крајње поједностављених до крајње сложених. По правилу се конвенционалне анализе ослањају на једноставније моделе и концепте, а савремени приступи на сложене.

У нашој конвенционалној инжењерској пракси, устаљено је да се анализа испуцале стенске масе, након сагледавања глобалне стабилности косине, сведе на анализу стабилности појединачних блокова (по механизму планарног клизања или клизања клина, ређе претурања), које треба стабилизovati или откавати, без даље анализе могућности њиховог кретања и домета, као ни кретања и домета мањих блокова, нити њихове вероватноће и учесталости појављивања, брзине, енергије и сл. Ако се и примене додатне анализе, обично се сведе на најједноставније моделе за равно стање по одговарајућим пресецима предметног терена.

Савремени приступи, с друге стране, показују тенденцију примене превише сложених и превише захтевних модела, с великим бројем улазних података који за собом повлаче додатне геодетске, лабораторијске или in-situ анализе и осматрања за које често нема времена или средстава.

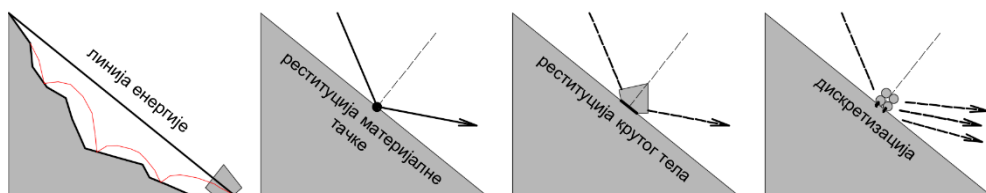
Заједничка је међутим полазна основа, односно прва фаза у којој се у току инжењерско-геолошког картирања прикупљају подаци релевантни за карактеризацију стенске масе, њених блокова, дисконтинуитета, као и општих услова предметне локације. У ту сврху се примењују различити системи класификације стенске масе, првенствено RMR i Q систем (односно њихове варијације за косине, попут SMR и QSLOPE), на основу којих се стенској маси (и као подлози и као кретаном материјалу) могу приписати одговарајућа механичка понашања, пре свега еластична својства.

МЕТОДЕ 2D И 3D АНАЛИЗЕ ОДРОНА

Дводимензионална анализа одрона, тј. трајекторије одроњеног блока, своди се на физику слободног пада и косог хица по топографској контури терена у одређеној равни пресека (Ashayer, 2007). Кретани материјал се анализира као индивидуалан блок одређених димензија, или као материјална тачка, што је мање реалистично, док се подлози задају одговарајућа механичка својства (Слика 3). Постоји и хибридни приступ који инкорпорира обе крајности. Најпогоднији начин за карактеризацију материјала у равном стању је коефицијент реституције, као корективни фактор између упадног и излазног угла трајекторије блока, који је директно пропорционалан еластичности подлоге. Идеално еластична подлога

имаће исте упадне и излазне углове, док се у реалности део енергије губи на пластичне ефекте, деформације и блока и подлоге (растресит материјал, вегетација и сл.), па и на комадање самог блока (фрагментација), као и отпор ваздуха. Принцип одржања инерције и енергије, и примена једноставних прорачуна брзине и енергије за задату масу и положај блока омогућава да се дуж трајекторије сазнају величине одскока, брзина и кинетичка енергија, што су кључне информације за пројектовање одговарајућих санационих и превентивних мера, попут одговарајућих баријера, зидова, ровова и сл.

Још једноставнији је модел линије енергије (Слика 3), који може имати и 2D и 3D примену. Проблем се своди на решавање троугла односно конуса домета блока, конструисаног на основу емпиријског угла сенке (најбоље на основу повратне анализе реалног одрона, а постоје и теоретске стандардне вредности). Унутар троугла/конуса врши се расподела енергије према једноставним формулама за кинетичку енергију и брзину за задату масу блока. Једноставно се решава у ГИС окружењу, као једноставан просторни проблем разлике (интеграла) масе између теоретског угла сенке и линије топографије (Jaboyedoff и Labiouse, 2011).



Слика 3: Шематски приказ различитих приступа моделирању одрона

Тродимензионална анализа подразумева најчешће решавање неколико компоненти одвојено. Најпре решавање трајекторије се своди на решавање механике материјалне тачке са задатом масом и то тако што се наизменично решавају једначине кретања слободним падом и косим хицем с једначинама контактне интеракције блока и подлоге. Комплекснија решења придодају анализу са блоком различитих облика и димензија, али као кругог непроменљивог тела, помоћу Методе Дискретних Елемента (обично се блок дискретизује сферно-полиедарским СП системом састављеним од елементарних троуглова и сфера у теменима тих троуглова). Својства блока, обично само запреминска тежина (монолитна), равномерно су распоређена унутар блока, док му се тежиште одређује Монте-Карло интеграцијом. То омогућава да се положај тежишта увек може одредити у односу на подлогу, односно пре и после контакта. Затим

се решавају једначине кретања блока, које се раздваја на компоненте при свакој интеракцији центра масе (било да је реч о материјалној тачки или СП блоку). Паралелно се решавају једначине транслације и ротације, из чега се добијају резултантне силе и моменти. Коначно се интеграљењем транслаторног кретања по Другом Њутновом закону и интеграљењем ротација по Ојлеровим једначинама. При томе се и подлога своди на три-ангулирани полиедар (дефинисаних нормала, односно познатог положаја и нагиба у сваком троуглу, тако да могу да се срачунају нормалне и тангенцијалне компоненте сила интеракције) у односу на који се посматра контакт с центром маса СП или материјалне тачке, задатих еластичних својстава. Постоји могућност и да се блок као круто тело дисконтинуира, односно издели према картираним фамилијама које ће предиспонирати могућу фрагментацију при првом или неким наредним контактом с подлогом (Richefeu и Villard, 2016).

ПОКАЗНИ ПРИМЕР

Као погодан компаративан пример узет је случај косине која представља стари мајдан камена Јоц на улазу у Ђердапску клисуру у близини Голупца у Источној Србији. Сам локалитет познат је по масивном одрону који се догодио 1974, који је потпуно затрпао регионални пут Голубац–Кладово, и који је умало преградио Дунав на том сужењу (Јевремовић и др., 2011). Као један од узрока наведене су повећане падавине у периоду непосредно пред саму појаву, односно неповољан утицај на повећање ефективних напона дуж неповољно оријентисаних планара у структурном склопу косине (Сунарић, 1976). Не треба занемарити ни могућу повезаност са динамиком тек формиране Ђердапске акумулације (Марјановић и др., 2024), која је пуњена управо у периоду 1972–1974, и пуштање у рад саме хидроцентрале која је изазивала осцилације нивоа воде у акумулацији и нивоа подземне воде, па тиме и различите ефекте у стенској маси (нагло обарање нивоа и повећање ефективних напона, индуковану сеизмичност и сл.). У сваком случају, појава је имала велике размере и у погледу масе одрона и у погледу величине блокова (Слика 4). Сама косина је формирана у масивним кредним лапоровитим кречњацима, интензивно испуцалим и скаршћеним, са степенастом геометријом односно великим етажама где је масивно минирана стенска маса. Сама косина је импозантних димензија, од око 250 m у висине и стрмим нагибима од око 70°.

Како би се указало на различитост крајњег резултата у зависности од избора моделског приступа, овде ће бити приказани резултати концептуално различитих модела (Табела 1).

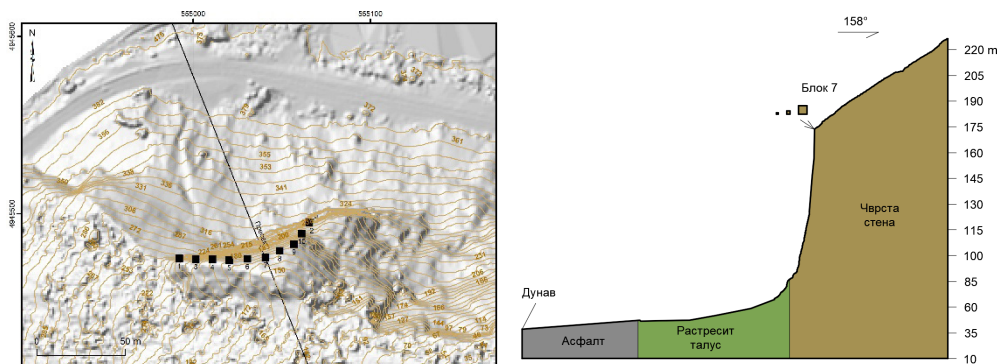


Слика 4: Документациона фототографија одрона из 1974 (фото Д. Сунарић)

Сценарији за које је развијен сваки модел обухватили су исте, фиксне тачке одламања, с варијацијом величине странице блока од 1 m, 2 m и 5 m, коцкастог облика (ради поједностављења, али су свакако могући и други сценарији, различитог положаја, облика, димензија). Одабир величине и облика блока у доброј мери одговара реалном стању затеченом непосредно након одрона.

Назив модела	Тип модела	Димензионалност	Софтвер
Линија енергије по конусу	Физичко-геометријски	2,5D	CONEFALL (Quanteria)
Метод дискретних елемената (DEM) и механика крутог тела	Нумеричко-пробабилистички	2D	RocFall (Rocscience)
Слободна и ограничена механика крутог тела/материјалне тачке	Нумеричко-пробабилистички	3D	RocFall3 (Rocscience)
Механика дисконтинуума (контакта и трења)	Нумеричко-пробабилистички	3D	RockyFor3D (ecorisQ)
Механика дисконтинуума (контакта и трења)	Нумеричко-стохастички	3D	RAMMS Rockfall (WSL)

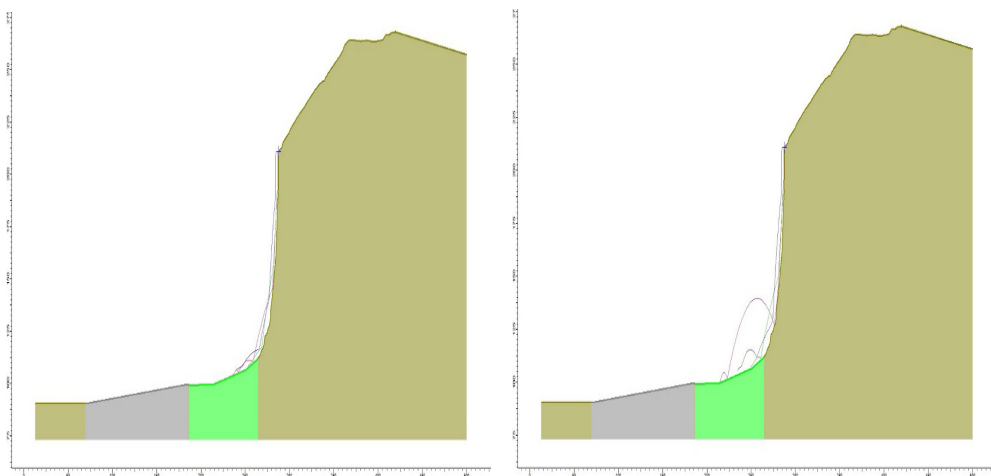
Табела 1: Листа размајраних модела одроњавања



Слика 5: Диспозиција симулираних блокова у њлану и њресеку кроз блок бр. 7

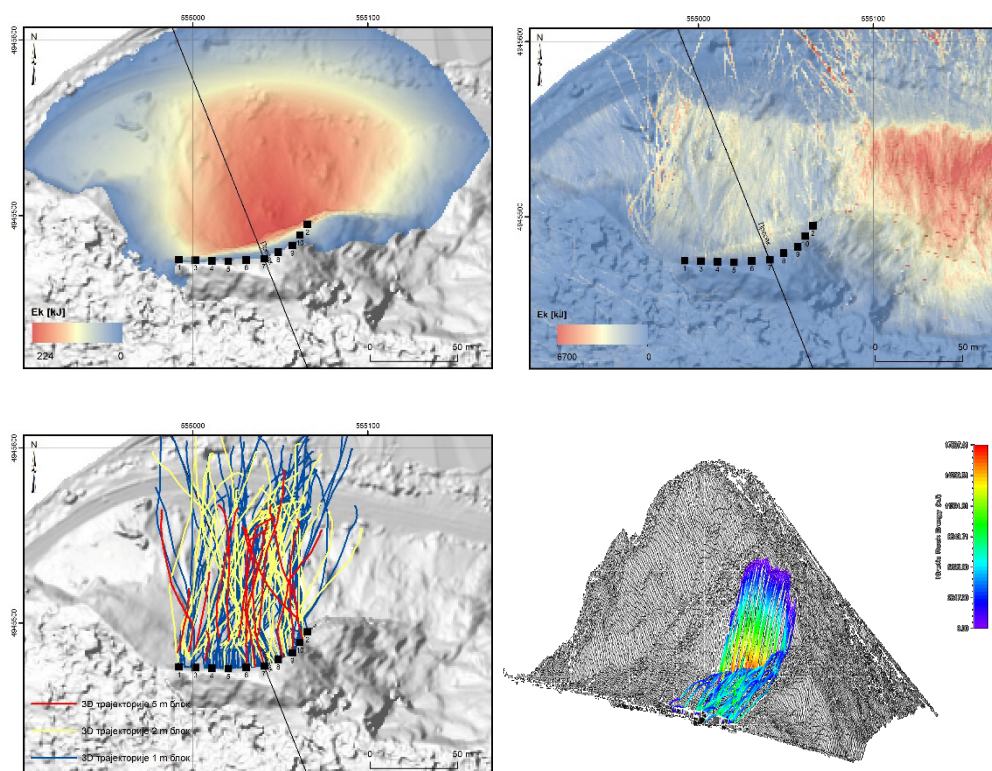
Ради директног поређења дводимензионалног и тродимензионалног случаја, коришћен је пресек по оси трајекторије средишњег блока бр. 7 (Слика 5). За равно стање (Слика 6), и за коефицијенте реституције стене аритметички осредњене за стенске косине од 0,8 за тангенцијални и 0,5 за нормални коефицијент (односно 0,85 за тангенцијални и 0,6 за нормални коефицијент за случај повећане еластичности подлоге) добијени су домети 52 m за 1 m, 34 m за 2 m и 44 m за 5 m блок (у варијанти повећане еластичности подлоге, 74 m за 1 m, 37 m за 2 m и 50 m за 5 m блок). Талусном делу косине задати су амортизовани параметри у оба случаја (односно 0,6 за тангенцијални и 0,2 за нормални коефицијент). Анализа је показала значајну осетљивост на одабир коефицијента реституције, па је једино повратна анализа, на основу историјских података и познатих домета блокова, поуздан начин за ову врсту приступа. Висина одскока и укупна кинетичка енергија су у првом сценарију логичне. Упадљиво је такође и одступање од употребе материјалне тачке према којој би (због одсуства утицаја геометрије блока) највећи блокови најдаље допрли и обратно.

У моделу линије енергије (Слика 7) домети су унапред дефинисани, у овом случају повратном анализом услед познатог домета постојећих блокова. Изабрани угао сенке од 45° одговара реалном стању и за овај угао добија се дистрибуција енергије и брзине по свим величинама блока 1–5 m од којих најдаљи достижу 139 m, што је и крајњи домет конуса. Одскоци нису предмет модела, а дистрибуција енергије је упоређива са 2D резултатима, с тим што је изразито прецењена у случају највећих блокова (5 m).



Слика 6: Приказ 2D модела (RocFall) на њресеку блока 7, с реалним (лево) и ѡренајлашеним ѡпараметрима еластичности (десно)

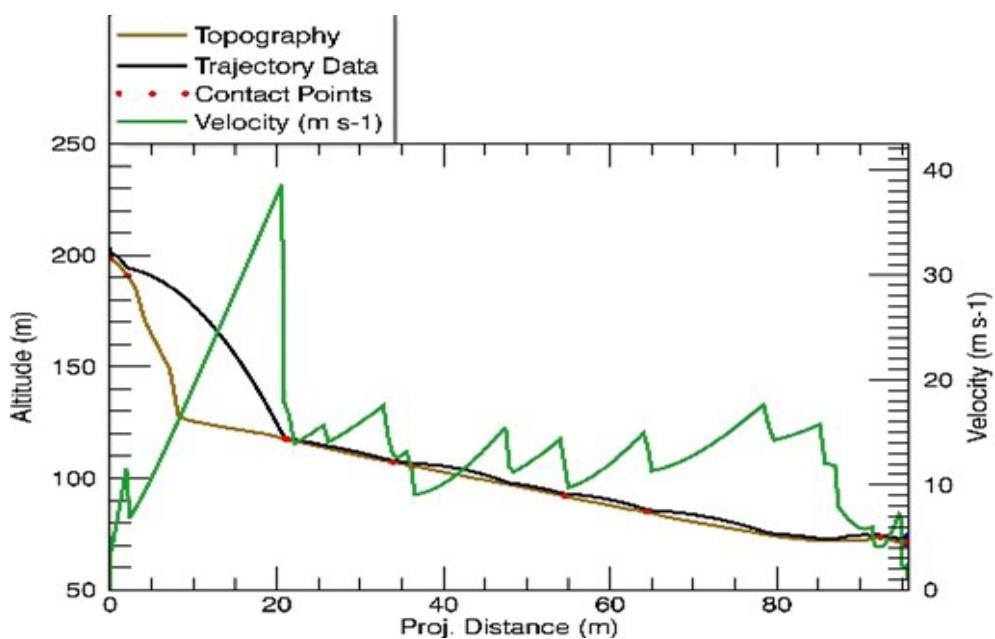
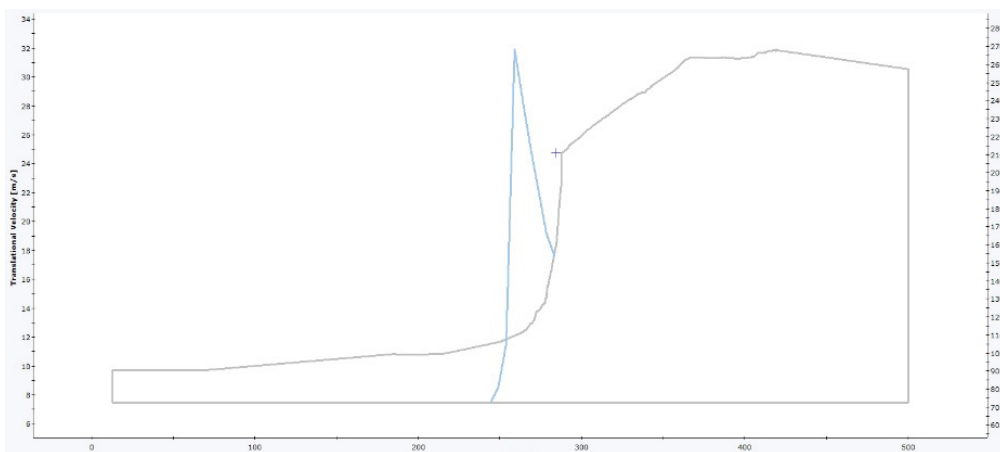
Код 3D анализе, у којој су такође помоћу повратне анализе подешена еластична својства подлоге али и самог блока, примећује се просторни утицај (Слика 7). Максимални домет имају најситнији блокови (услед пропорционално мање дисипације енергије при контактима с подлогом) и износе око 145 m, колико приближно имају и средњи блокови, док највећи нешто преко 80 m. Одскоци су просечно 5–6 m за све величине блокова односно уједначенији су него у случају 2D анализа. Енергија показује знатна одступања, сугеришући да додатни тродимензионални ефекти, као што је разуђенија топографија, повећана храпавост, као и већи број контаката с подлогом (услед којих долази до веће дисипације енергије), знатно амортизују блокове, нарочито оне највеће. Комплекснији 3D модели попут RAMMS-а то додатно наглашавају код највећих блокова (Табела 2). Очекивано се код првог контакта испољава највећа дисипација и у 2D и у 3D случају (Слика 8), али је за 2D случај типично да услед недостатака модела, нагло опада брзина и не развија се адекватно при другим, трећим и даљим одскоцима. Максимум брзине и енергије је приближно исти, али број и позиције одскока су знатно бројније у 3D случају, што додатно пролонгира трајекторију и даје јој већу укупну енергију дуж трајекторије. То се може разумети као јасна индикација да се 2D анализом прихват блока баријером или други вид амортизације морају пројектовати на првом контакту, док се у 3D случају могу поуздано користити и наредни контакти, што изискује мање ресурсе (мања је енергија при каснијим контактима).



Слика 7: Приказ 2,5D модела – CONEFALL (горе лево) и 3D модела њерсићорно – RockyFor (горе десно) и њо трајектијоријама – RAMMS (доле лево), уз њриказ трајектијорија у њерсићекѡиѡи (доле десно)

Вредност симулиране Ek [kJ]	Величина блока [m]		
Модел	1	2	5
2D RocFall low Rt/Rn	1584	13493	150462
2D RocFall high Rt/Rn	1201	10908	122746
CONEFALL	1761	14089	220140
3D RockyFor	1452	9000	99000
3D RAMMS	2278	17087	43306

Табела 2: Поређење резултића симулације кинетичке енерѡије



Слика 8: Упоредни приказ дистрибуције кинетичке енергије по трајекторији блока бр. 7 величине 5 т, из 2D модела (горе) и 3D модела (доле)

ЗАКЉУЧАК

Теоретски, а и практични елементи анализе одрона указују на разне аспекте које треба узети у разматрање пре него што се приступи пројектовању конкретних мера. Најпре, статистичка симулација може да завара, јер реалан блок може да се појави и ван коришћених перцентила (обично 95%) предвиђене дистрибуције (обично Гаусове). Последишно блок може да има већи одскок од симулираног или већу енергију за пројектовану баријеру. Симулација због поједностављења обично не узима у обзир све врсте амортизације које се јављају у току кретања блока и контакта с подлогом, па и контакта два истовремено одроњена блока, или фрагментисаних делова истог блока. Олакшавајућа је околност што овакви ефекти по правилу смањују брзине, енергије и висине одскока, па је моделовано стање на страни сигурности. Такође, сви модели третирају контакт као тренутан, иако у реалности има одређено трајање у којем се дешава расипање енергије на трење, топлотне ефекте, лом, фрагментацију, отпор ваздуха и сл., па су и моделоване брзине у одређеној мери нереалне односно на страни сигурности. Анализа појединачних блокова различитих димензија показала је да је најпоузданије обрадити и 2D и 3D варијанте, јер су прве поуздане за мање блокове и прве контакте, док су 3D модели поуздани и за велике блокове и даље контакте. Унутар самих 3D модела, различите концепције које укључују стохастичке односно случајне процесе при одређивању вероватноће трајекторије, указују да могу постојати и значајне разлике у излазним резултатима, али не тако драстичне као између 2D и 3D приступа. Поједностављења у 2D моделима ипак не могу да компензују неке ефекте, чак ни при повратним анализама постојећих одрона.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ashayer, P. (2007). Application of rigid body impact mechanics and discrete element modeling to rockfall simulation.
- [2] Jaboyedoff, M. Labiouse, V. (2011) Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 819–828.
- [3] Јањић, М. (1987) Одроњавање стенских маса. Зборник радова Рударско-геолошког факултета 20, 79–97.
- [4] Јевремовић, Д., Сунарић, Д., Костић, С. (2011). Загађивање река у Србији клижењем и одроњавањем. Техника, 66(5): 731–736.

- [5] Марјановић, М. (2022) Анализа одрона у стенским косинама: савремени приступи. Зборник апстраката XVII Конгрес геолога Србије, Дивчибаре, 1–4. 6. 2022, 159–161.
- [6] Марјановић, М., Пејић, М., Славковић, Д., Ђорђевић, В. (2024). Reconstructing a massive rockfall event in the Đerdap Gorge, Serbia. *Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering*, CRC Press, 1071–1077.
- [7] Moos, C., Bontognali, Z., Dorren, L., Jaboyedoff, M., & Hantz, D. (2022). Estimating rockfall and block volume scenarios based on a straightforward rockfall frequency model. *Engineering Geology*, 309, 106828.
- [8] Richefeu B., Villard P. (2016) *Modeling Gravity Hazards from Rockfalls to Landslides*, ISTE Press Ltd, Elsevier Ltd.
- [9] Сунарић, Д. (1976). Анализа узрока настанка одрона Јоц код Голупца на Дунаву. Зборник радова IV Југословенског Симпозијума о хидрогеологији и инжењерској геологији, Скопје 207–213.

Рад број 5, категорија Прегледни рад

Милош Марјановић,
 Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет,
 Београд, Ђушина 7,
milos.marjanovic@rgf.bg.ac.rs,
 ORCID 0000-0002-9675-1401, стр. 63

Биљана Аболмасов,
 Универзитет у Београду. Рударско-геолошки факултет,
 Београд, Ђушина 7,
biljana.abolmasov@rgf.bg.ac.rs,
 ORCID 0000-0002-5439-2893, стр. 63