

8. RECENTNA ISKUSTVA U PROCJENI HAZARDA I RIZIKA OD ODRONA U STIJENSKOJ MASI

8. RECENT EXPERIENCES IN ROCKFALL HAZARD AND RISK ASSESSMENT

Željko Arbanas¹

Dalibor Udovič²

Marin Sečanj³

Petra Đomlija¹

Snježana Mihalić Arbanas³

¹Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka, Hrvatska

²Monterra d.o.o, Vukovarska 76, 51000 Rijeka, Hrvatska

³Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Korespondencija:

Željko Arbanas, zeljko.arbanas@gradri.uniri.hr

Sažetak: Odroni stijenske mase, po definiciji tip klizišta koji uključuje odvajanje pojedinačnog ili nekoliko blokova stijene s uglavnom vertikalnih stijenskih kosina nakon čega slijedi brzi pokret niz kosinu u fazama slobodnog pada, odskakanja, kotrljanja i klizanja [1], predstavljaju najznačajniji hazard u područjima koje karakteriziraju strme kosine izgrađene u stijenskoj masi. Više od 40% površine Hrvatske predstavlja krško područje izloženo odronima koji su u prošlosti izazvali značajne štete na infrastrukturnim građevinama i naseljima, kao i ozljede i smrtne slučajeve. Tijekom posljednjih dekada u svijetu su razvijene brojne metodologije za identifikaciju područja podložnih odronima i utvrđivanja hazarda i rizika od odrona. Unatoč izloženosti hazardu i riziku od odrona stijenske mase, ne postoji razvijena metodologija procjene hazarda i rizika u Hrvatskoj. Cilj ovog rada je prezentacija pregleda recentnih iskustava i metodologija u procjeni hazarda i rizika od odrona stijenske mase koje bi se mogle koristiti za primjenu u područjima Hrvatske ugroženim odronima.

Ključne riječi: *odron, stijenska masa, hazard, metodologija, procjena rizika, umanjeње rizika*

Abstract: Rockfall, by definition a type of landslides that include detachment of the rock or several rock blocks, from mostly sub-vertical rock slope followed by rapid down-slope motion as free-falling, bouncing, rolling and sliding phases [1], represent a major hazard in areas characterized by steep slopes built in different rock masses. More than 40% of territory of Croatia is represented by karst area exposed to the rockfall phenomena that caused severe damages to the infrastructure facilities and settlements as well as serious injuries and fatalities in the past. Over last decades several methodologies have been developed over the world to identify landslide prone areas and assess rockfall hazard and risk. Despite of rockfall hazard and risk exposure, there are no developed methodologies for rockfall hazard and risk assessment in Croatia. The aim of this manuscript is to present an overview of recent experiences and methodologies for rockfall hazard and risk assessment that would be appropriate for application areas prone to rockfalls in Croatia.

Key words: *rockfall, rock mass, hazard, methodology, risk assessment, risk reduction*

1 Uvod

Odron u stijenskoj masi je tip klizišta čiji se mehanizam sastoji od odvajanja pojedinog bloka (ili više blokova) od vertikalne ili subvertikalne litice koje slijedi brzo gibanje niz padinu kroz faze slobodnog pada, odskakivanja, kotrljanja i klizanja [1]. Pri tome su odroni ekstremno brze pojave s velikim dosegom pokrenute mase, a zbog velike brzine, osobe se uglavnom ne stignu evakuirati [2]. Zbog toga su odroni tip klizišta koji uzrokuju najveći broj žrtava, čak i pri niskim stupnjevima izloženosti elemenata pod rizikom, kao što su prometnice [3]. Osim toga, odroni mogu izazvati i značajna oštećenja na građevinama i infrastrukturi te poremećaje u životnim procesima.

Jednostavan i učinkovit način za smanjenje potencijalnih šteta od prirodnih nepogoda uključujući odrone je poboljšanje gospodarenja zemljištem kroz planiranje korištenja zemljišta na osnovi zoniranja vjerojatnosti njihova nastanka, podložnosti ili hazarda [4]. U već izgrađenim područjima karte hazarda važne su zbog određivanja prioriteta i odabira odgovarajućih mjera ublažavanja posljedica [5,6]. Ovisno o veličini područja istraživanja, zoniranje hazarda od klizišta

provodi se u različitim mjerilima koja uključuju nacionalna ($<1:250\,000$), regionalna ($1:25\,000$ - $1:250\,000$), lokalna ($1:5\,000$ - $1:25\,000$) i mjerila primjerena području istraživanja (eng. *site-specific*). Svako od mjerila zahtijeva različit stupanj detaljnosti i točnosti ulaznih podataka, a dobivene karte zoniranja imaju različite namjene. Lokalne karte i karte ograničenih područja izrađuju se za manja područja, i ukazuju na detalje kao što su tipovi klizišta (npr. odroni), a često uključuju procjenu stabilnosti i analize dosega pokrenutog materijala [7]. Mjerilo zoniranja i oblik raspoloživih podataka utječu na odabir odgovarajuće metode zoniranja hazarda, pri čemu je metode zoniranja hazarda moguće svrstati u tri glavne kategorije zoniranja hazarda: osnovne, srednje složene i sofisticirane metode. Ove metode koriste heurističke ili empirijske procedure, odnosno statističke i determinističke metode analiza, a mogu se provoditi na preliminarnoj, srednje složenoj i naprednoj razini [8].

Za raspodjelu hazarda u različite klase koriste se kvalitativne ili kvantitativne procedure. Kvalitativne procedure zahtijevaju manje podataka, a procjene su subjektivne i koriste deskriptivne opise ili brojčanu procjenu unutar subjektivno određene ljestvice vrijednosti. Kvantitativne procedure se zasnivaju na brojčanim vrijednostima vjerojatnosti pojave klizišta u promatranoj zoni [9]. Odabir jedne od procedura ovisan je o prirodi problema i zahtijevanoj točnosti u odnosu na kvalitetu i kvantitetu raspoloživih podataka [10]. Kvantitativna procedura je svakako poželjnija za zoniranje podložnosti i hazarda [8], ukoliko postoje uvjeti za njezino provođenje. To je posebno izraženo kod procjene hazarda, ali i analize rizika od odrona u stijenskoj masi gdje se posljednjih godina općenito više primjenjuju kvantitativne od kvalitativnih procedura [5,11].

Tijekom posljednjih 40 godina razvijen je cijeli niz metoda za kvalitativnu procjenu hazarda od odrona u stijenskoj masi [12], pri čemu je većina razvijena za primjenu na ograničenim zonama uz prometnice ili naselja ugrožena odronima. Prvu procjenu podložnosti odronima u stijenskoj masi razvio je Romana [13] pod nazivom *Slope Mass Rating* (SMR) koja je predstavljala daljnji razvoj geomehničke klasifikacije *Rock Mass Rating* (RMR) [14], a koja nije bila primjenjiva na kosine. Iako je ovo bila kvantitativna procjena [15], imala je presudan utjecaj na razvoj i kvalitativnih i kvantitativnih metoda procjene podložnosti i hazarda, kao i analiza rizika od odrona u stijenskoj masi.

U Republici Hrvatskoj ne postoji ustaljena praksa procjene podložnosti i hazarda, kao ni analize rizika od odrona u stijenskoj masi, iako su pojave odrona česte, te izazivaju značajne štete na prometnicama i drugoj infrastrukturi [16], stambenim i drugim građevinama, a ljudskih žrtava bilo je i u nedavnoj povijesti. Također, do sada nije usvojena ili razvijena neka od metoda procjene podložnosti, hazarda ili rizika od odrona primjenjiva u Republici Hrvatskoj. Praktični problemi koji nastaju uslijed ugroženosti infrastrukture ili naselja odronima, rješavaju se deterministički, pri čemu se analize podložnosti i rizika od odrona provode samo djelomično [17], kao sastavni dio inženjerskih rješenja i mjera za smanjenje rizika od odrona. S obzirom na potrebu da se i u Republici Hrvatskoj, u dijelovima u kojima postoje brojne registrirane pojave odrona, provede procjena podložnosti i hazarda od odrona te provedu analize rizika, nužno je razviti i usvojiti odgovarajuću metodu. Ta metoda mora biti primjenjiva za uvjete koji utječu na nastanak odrona u Republici Hrvatskoj. Ovim radom daje se pregled najznačajnijih metoda u procjeni hazarda od odrona u stijenskoj masi kao osnova za razvoj metode procjene hazarda i rizika od stijenskih odrona u Republici Hrvatskoj.

2 Terminologija

Terminologija koja se koristi u smislu definicija kod procjene podložnosti i hazarda te analizu rizika od klizišta predložena je od strane Zajedničkog tehničkog komiteta za klizišta i inženjerske kosine (JTC-1, Joint Technical Committee on Landslides and Engineering Slopes, osnovanog u svibnju 2002. godine kao zajedničkog komiteta International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), International Association of Engineering Geology (IAEG) i International Society of Rock Mechanics (ISRM)) [8]. Navedena terminologija nije opće prihvaćena u znanstvenoj literaturi i često se koristi neprikladno i zamjenjujući druge termine. U nastavku teksta daje se opća terminologija i primjena iste u okviru procjene hazarda i analize rizika od odrona u stijenskoj masi.

Vjerojatnost je mjera stupnja pouzdanosti i može poprimiti vrijednosti od 0 (za nemoguć događaj) do 1 (za potpuno izvjestan događaj).

Frekvencija je srednja vrijednost broja događaja (klizišta) koji se pojave u određenom vremenskom periodu.

Podložnost (osjetljivost) je kvantitativna ili kvalitativna procjena klasifikacije, magnitude i prostorne raspodjele potencijalnih ili uočenih klizišta na zadanom prostoru ili površini.

Hazard je vjerojatnost pojave klizišta zadane magnitude koje ima potencijal za izazivanje nepoželjnih posljedica. Pri tome hazard klizišta mora uključiti lokaciju klizišta i njegov tip (klizanje, prevrtanje, odron, tok ili razmicanje), procjenu volumena klizišta, brzinu i doseg klizišta, i vjerojatnost pojave za određeni vremenski period.

Elementi pod rizikom su objekti koji mogu biti zahvaćeni ili oštećeni pojavom određenog hazardnog događaja (klizišta), kao, na primjer, populacija, građevine, radovi, ekonomija, javni servisi, infrastruktura i okoliš koji su smješteni u području zahvaćenom hazardnim događajem (klizištem).

Ranjivost je mjera gubitka (štete) elemenata pod rizikom u području zahvaćenom klizištem i može poprimiti vrijednosti od 0 (nema štete) do 1 (totalna šteta).

Rizik je mjera vjerojatnosti i jačine štetnog događaja na zdravlje, imovinu ili okoliš, definiran je kao posljedica (potencijalne) pojave klizišta i izražen je kvalitativno ili kvantitativno u obliku gubitka, nedostatka ili dobitka, oštećenja, ozljeda ili gubitaka života.

3 Hazard i rizik od odrona u stijenskoj masi

Generalna terminologija koja se koristi u smislu definicija kod procjene podložnosti, hazarda i rizika od klizišta primjenjuje se na odronu u stijenskoj masi uz određene specifičnosti vezane na prirodu pojava odrona u stijenskoj masi, mehanizma gibanja niz kosinu i propagaciju odronjene mase niz kosinu.

3.1 Hazard od odrona u stijenskoj masi

Hazard od odrona određuje vjerojatnost pojave odrona određene magnitude (volumena) ili intenziteta (definiranog energijom odrona) u određenom vremenskom periodu i na određenom području (površini) [9,18]. Brojni autori [19,20,21] ukazali su da hazard od odrona ovisi o tri faktora:

- ▶ Vjerojatnost odvajanja bloka određene magnitude (definirane preko veličine bloka) od stijenske litice na određenoj lokaciji u određenom periodu vremena, što uključuje prostornu (spacijalnu) komponentu vjerojatnosti pojave odrona (podložnost) i vremensku (temporalnu) komponentu vjerojatnosti pojave odrona (frekvenciju),
- ▶ Propagacija gibanja bloka niz kosinu što uključuje trajektoriju gibanja i maksimalni doseg pokrenutog bloka, i
- ▶ Intenzitet odrona izražen kinetičkom energijom pokrenutog bloka duž trajektorije gibanja.

Prostorna (spacijalna) komponenta vjerojatnosti pojave odrona ili podložnost predstavlja najvažniju komponentu u određivanju hazarda od odrona i ukazuje na predispoziciju određenog područja da bude zahvaćeno odronima i ukazuje na pozicije na kojima bi se odroni mogli dogoditi [21,22]. Podložnost od odrona može se odrediti [12]: geomorfološkim kartiranjem [23]; empirijskim ili poluempirijskim sustavima bodovanja [24,25,26,27]; determinističkim metodama [28,29]; i statističkim metodama [30]. Rezultat predstavlja karta podložnosti koja ukazuje na predispoziciju analiziranog područjima pojavama odrona stijenske mase [18].

Frekvencija (učestalost) predstavlja vremensku (temporalnu) komponentu vjerojatnosti pojave odrona i izražava se kao učestalost pojave odrona određenog volumena u određenom vremenu ili preko povratnog perioda, te se određuje statističkom analizom povijesnih događaja na određenom prostoru. Najčešći pristup za određivanje frekvencije je analizom inventara odrona za određena područja koji treba sadržavati podatke o magnitudi i vremenu pojave povijesnih događanja odrona. Ukoliko ne postoje podaci o povijesnim događajima, frekvencija se ne može dovoljno točno odrediti i u tom slučaju neće biti moguće odrediti hazard, već jedino podložnost odronima stijenske mase.

Propagacija gibanja bloka ukazuje na trajektoriju pokrenutog bloka niz kosinu, a ovisi o značajkama bloka i kosine niz koju se blok giba: lokacija pokretanja i masa bloka koji ukazuju na potencijalnu energiju, oblik bloka, topografija i hrapavost kosine, prisutnost izdanaka i vegetacija na kosini, te prigušenje energije bloka u kontaktu s kosinom [31,32]. Metode određivanja propagacije pokrenutih blokova mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije [32]: empirijske metode i fizički zasnovane metode (eng. *physically-based*). Dok su empirijske metode relativno jednostavne metode koje omogućuju preliminarnu i brzu procjenu propagaciju bloka na relativno jednostavnim odnosima topografskih faktora kosine i dužine zone dosega bloka, fizički zasnovane metode su složene metode koje koriste numeričke (kinematičke) simulacije gibanja i propagacije bloka opisanog kao materijalna točka, objekt određenog oblika ili hibridni model [19,33].

Intenzitet odrona određene magnitude (volumena, mase bloka) predstavlja nužan faktor u procjeni hazarda i izražava se kinetičkom energijom pokrenutog bloka tijekom gibanja niz kosinu. Predstavlja složenu funkciju zavisnu o masi i brzini, a određuje se u ovisnosti o usvojenom fizičkom modelu propagacije bloka [19].

3.2 Rizik od odrona u stijenskoj masi

Rizik je opisan s tri temeljne komponente [7]: hazardom, izloženosti elemenata pod rizikom i njihovom ranjivosti, a mogu biti karakterizirani prostornim ili ne-prostornim atributima. Izloženost je određena prostornom i vremenskom vjerojatnosti da je element pod rizikom prisutan u području zahvaćenom opasnosti od odrona u trenutku pojave odrona. Uobičajeni redoslijed određivanja u analizi rizika od stijenskog odrona je slijedeći [11]:

- ▶ Analiza hazarda koja uključuje analizu intenziteta, vjerojatnosti pojave odrona i doseg potencijalnog odrona,

- Identifikacija elemenata pod rizikom koja uključuje njihov broj, vrijednost i stupanj izloženosti,
- Analiza ranjivosti, i
- Procjena rizika.

Rizik je moguće ublažiti tek nakon što je određen, a ublažavanje rizika podrazumijeva odgovarajuće mjere i tehnike upravljanja rizikom, kako bi se umanjio ili ograničio štetan utjecaj hazarda.

4 Metode procjene hazarda i rizika od odrona u stijenskoj masi

Metode procjene hazarda i rizika od odrona stijenske mase mogu biti kvalitativne i kvantitativne ovisno o ulaznim podacima, usvojenim procedurama procjene i konačnim rezultatima [5].

Kvalitativne metode koriste kvalitativne opise za hazard, elemente pod rizikom i njihovu ranjivost koristeći rangirane atribute, težinske indekse, sustave i matrice bodovanja, bodovne sheme i klasifikacije [34], a mogu biti zasnovane na objektivnim procjenama (statističke), subjektivnim procjenama (iskustvena procjena) ili kombinacijama istih. Rezultati kvalitativnih metoda uobičajeno se izražavaju u relativnim pojmovima: hazard ili rizik može biti nizak, srednji ili visok [5].

Za razliku od kvalitativnih metoda, kvantitativne metode koriste brojčane vrijednosti ili rangirane vrijednosti umjesto kvalitativnih opisnih pojmova [9]. Kvantitativna analiza hazarda procjenjuje hazard u obliku brojčane vjerojatnosti koja procjenjuje frekvenciju mogućih pojava odrona uključujući njihovu propagaciju i intenzitet. Kvantitativna analiza rizika (QRA) kvantificira vjerojatnost potencijalnih gubitaka koji slijede iz hazardnog događaja (odrona) razmatrajući broj uništenih i oštećenih građevine (u monetarnoj vrijednosti) i ozlijeđenih i smrtno stradalih (u brojkama), a zahtijevaju brojne geotehničke i statističke podatke kako bi se mogle primjenjivati. Kvantitativne procjene ne moraju biti nužno točnije od kvalitativnih; točnost ne ovisi o korištenju brojaka već o ulaznim podacima (raspoloživosti i kvaliteti) na temelju kojih je procjena provedena.

S obzirom na uobičajeno stanje nedostatka dokumentacije o aktivnosti odrona u prošlosti, ne samo u Republici Hrvatskoj nego i u svijetu, potpuni inventari o odronima su u pravilu rijetki i vrlo često se odnose samo na velike događaje [35], kvalitativne metode su danas najčešće korištene metode za analizu hazarda i rizika od odrona stijenske mase u svijetu. U svijetu su razvijene brojne metode za analizu hazarda i rizika od odrona stijenske mase, od čega je oko 20 metoda u intenzivnoj inženjerskoj praksi. Pri tome se većina tih metoda može podijeliti u dvije grupe: metode procjene hazarda od odrona u stijenskoj masi proizašle iz izvornog *Rockfall Hazard Rating System* (RHRS) [24] namijenjene za korištenje na prometnicama te metode proizašle iz *Rock Engineering System* (RES) [36,37], ali postoje i metode zasnovane na drugim pristupima [12].

U Republici Hrvatskoj do danas nije usvojena ili razvijena neka od metoda procjene podložnosti, hazarda ili rizika od odrona. S obzirom na potrebu da se i u Republici Hrvatskoj, u dijelovima kojima postoje brojne registrirane pojave odrona, provede procjena podložnosti i hazarda od odrona te provedu analize rizika, nužno je razviti i usvojiti metodu primjenjivu za lokalne uvjete, pri čemu nije nužno razvijati potpuno novu metodu. Većina postojećih metoda posjeduje dovoljno iskustvo u primjeni koje ukazuje na prednosti i nedostatke metode, pa bi usvajanje jedne od metoda, koja se zasniva na sličnim uvjetima koji uvjetuju pojavu odrona u stijenskoj masi u Republici Hrvatskoj, uz odgovarajuću prilagodbu lokalnim uvjetima i uvođenjem novih metoda i tehnologija u istraživanju odrona, omogućila usvajanje zadovoljavajuće metode za procjene podložnosti, hazarda ili rizika od odrona u stijenskoj masi.

4.1 Rockfall Hazard Rating System (RHRS) i modifikacije

Originalni *Rockfall Hazard Rating System* (RHRS) razvijen je kasnih 1980-tih za potrebe procjene hazarda od odrona uz prometnice u Oregonu (USA). To je kvalitativna metoda koja koristi preliminarnu procjenu za identifikaciju kosina uz prometnicu koje zahtijevaju detaljnu analizu. Preliminarna procjena provodi se na dionicama prometnice jednolikih značajki u pogledu mogućeg odrona, a razmatraju se dva osnovna kriterija: procijenjeni potencijal odrona na prometnicu i povijesna aktivnost odrona [38]. Procijenjeni potencijal odrona na prometnicu razmatra količinu odronjene stijenske mase po pojedinom odronu, količinu moguće stijenske mase po odronu i efikasnost jarka za prihvrat odronjene mase. Povijesna aktivnost uključuje učestalost odrona i volumen odronjenog materijala na prometnicu, veličinu odrona i učestalost čišćenja odronjenog materijala iz jaraka uz prometnicu. Detaljna procjena dijeli kosine od najniže do najviše izloženih hazardu koristeći devet parametara koji se eksponencijalno boduju od 3 do 81 bod, dok ukupna suma svih bodova predstavlja sveukupnu vrijednost hazarda, pri čemu više vrijednosti predstavljaju viši hazard. Devet bodovanih parametara uključuju: i) visinu kosine s koje prijeti odron; ii) djelotvornost jarka za prikupljanje odronjenog materijala; iii) prosječan rizik vozila (eng. *average vehicle risk*, AVR) koji predstavlja vjerojatnost da vozilo bude prisutno u zoni odrona u trenutku odrona izraženo u postotku vremena; iv) postotak duljine preglednosti za donošenje odluke (eng. *percent of decision sight distance*, PDSD) koji predstavlja postotak udaljenosti koja je vozaču potrebna da reagira na pojavu odrona; v) širina prometnice predstavlja ukupnu širinu prometnice uključujući bankine, a koja predstavlja prostor ras-

položiv za zaobilaženje prepreke; vi) geološke značajke koje uključuju dva međusobno isključiva slučaja: postojanje višestrukih setova diskontinuiteta u stijenskoj masi i stijenska masa je podložna eroziji (trošenju); vii) veličina bloka ili volumen odrona po pojedinom događaju; viii) klimatski uvjeti i prisutnost vode na kosini izraženi preko intenziteta kiše, ciklusi smrzavanja i otapanja te cirkulacija vode u kosini; i ix) povijest odrona predstavlja informaciju o prošloj aktivnosti odrona na kosini iz postojeće baze podataka ili od osoblja koje održava prometnicu. Ukupna vrijednost hazarda slijedi iz sume svih bodova (između 9 i 900), a koristi se za određivanje prioriteta pri odabiru mjera ublažavanja hazarda od odrona na prometnicu. RHRS je jedna od najstarijih metoda za procjenu hazarda od odrona, ali sadrži gotovo sve elemente (osim energije bloka koji se giba niz kosinu) koji se koriste u određivanju hazarda od odrona.

U nastavku su opisane brojne modifikacije RHRS koje su prilagođavane lokalnim uvjetima za koje su namijenjene, pri čemu neke uvažavaju veći dio RHRS, dok druge mijenjaju osnovni pristup, ali zadržavaju većinu parametra iz RHRS. Metode su prikazane samo u osnovnim razlikama u odnosu na RHRS kronološkim redom njihovog nastajanja.

Colorado Rockfall Hazard Rating System (CRHRS) je u odnosu na RHRS sofisticiraniji sustav koji odvaja komponente hazarda i rizika, i poboljšavan je tijekom vremena od 1992. godine [39] do njegove posljednje treće verzije [40,41]. CRHRS uzima u obzir više geoloških i klimatskih faktora koji utječu na odron i posjeduje objektivnije kriterije od originalnog RHRS. Hazard i rizik su odijeljeni u dva odvojena bodovanja, koji se izračunavaju kao sume od 18 i 3 parametra. Hazard se određuje na osnovi sume 5 parametara koji se odnose na oblik kosine, 4 parametra povezana s klimatskim uvjetima, 6 parametara povezanih sa stanjem diskontinuiteta i 3 parametra povezana s geološkim značajkama. Rizik se određuje na osnovi 3 parametra: duljine preglednosti, rizika za vozila i broja nesreća uzrokovanih odronima u proteklom periodu. Rizik je izražen u broju nesreća i broju ozlijeđenih uslijed odrona.

Rock Slope Rating Procedure (RSRP) razvio je New York Department of Transportation s ciljem da poboljša RHRS razdvajanjem parametara hazarda i rizika [42]. Ukupni relativni rizik (eng. *total relative risk*, *TRR*) određuje se množenjem tri glavna faktora: i) geološkog faktora koji uključuje većinu faktora koji se odnose na odron i kosinu kao u RHRS; ii) faktora dionice prometnice koji uključuje dimenzije jarka za prihvrat odronjenog materijala; i iii) faktora izloženosti populacije koji predstavlja vjerojatnost da će se dogoditi prometna nesreća uzrokovana odronom. Iako to nije realan rizik, jer ne usvaja sve elemente pod rizikom (samo vozila), a potencijalna šteta nije izražena u ekonomskoj vrijednosti, uvođenje rizika ipak predstavlja značajan doprinos RSRP.

Rockfall Hazard Rating for Ontario (RHRON) je razvijen za procjenu hazarda uz prometnice u Ontariju, Canada, i razvijen je kao poboljšanje RHRS uz prilagodbu lokalnim uvjetima u Ontariju [43,44]. Dodano je 5 novih parametara uz parametre prema RHRS, dok neki od osnovnih parametara su predefinirani, tako da RHRON posjeduje ukupno 19 parametara na osnovi kojih se procjenjuje hazard od odrona. Ukupna vrijednost RHRON omogućuje *cost-benefit* analizu mogućih mjera sanacije kosine s procjenom vrijednosti sanacijskih mjera, ali i identifikaciju lokacija koje imaju prioritet u sanaciji. RHRON je puno rigoroznija metoda u odabiru parametara u odnosu na RHRS, a većina parametara je kvantitativno, a ne kvalitativno izražena, pa je je metoda manje subjektivna, ali ne dijeli jasno faktore hazarda od faktora posljedica (rizika).

Tennessee rockfall hazard rating system (TRHRS) je razvijen 2003. godine kako bi se mogle usvojiti geološka raznolikost u Tennesseeju i umanjila subjektivnost RHRS [45,46]. Kao i većina sustava proizašla iz RHRS, tako se TRHRS sastoji od preliminarne i detaljne procjene hazarda, a u detaljnoj procjeni hazarda analizira se osam parametara bodovanih od 3 do 81 boda (kao i RHRS): visina kosine; djelotvornost jarka za prikupljanje odronjenog materijala; prosječan rizik vozila; postotak duljine preglednosti za donošenje odluke; širina prometnice; geološke značajke (značajno izmijenjene u odnosu na RHRS uključujući i različite tipove nastanka odrona); prisutnost vode na kosini; i povijest odrona, pri čemu je većina parametara identična ili vrlo slična RHRS. TRHRS uključuje faktore hazarda (oblik kosine, povijesni odroni i geološke značajke) i faktore rizika (razina prometa, geometrija prometnice i djelotvornost jarka), ali se isti pribrajaju u završnom bodovanju pa hazard i rizik nisu iskazani odvojeno.

Vrlo jednostavnu modifikaciju RHRS izradio je Budetta [47], koja se često naziva talijanskom modificiranom RHRS (mRHRS), s ciljem smanjenja subjektivnosti u bodovanju. Osnovna struktura i bodovanje iz RHRS su u cijelosti preuzeti, a 7 parametara je modificirano na način da su isti bodovani kvantitativno: djelotvornost jarka za prikupljanje odronjenog materijala; postotak duljine preglednosti za donošenje odluke; širina prometnice; geološke značajke; volumen bloka; i povijest odrona.

Missouri Rock Fall Hazard Rating System (MORFH RS) je razvijen kako bi se mogle usvojiti geološke specifičnosti u Missouriju gdje prevladavaju meke stijene i stijene podložne trošenju, a kosine su relativno niske. Novina modifikacije je u prvoj primjeni daljinskih metoda (digitalni snimci), a detaljna procjena zasniva se na integraciji parametara iz video snimki, mjerenja na fotografijama, *in situ* opservacijama i historijskim podacima [48]. Parametri su podijeljeni u dvije kategorije [49]: parametri rizika od sloma (odrona) (9 parametara koji u stvari određuju hazard) i parametri posljedica sloma (odrona) (10 parametara koji u stvari određuju rizik).

Ohio Rockfall Hazard Rating Matrix (ORHRM) je razvijen na osnovi topografskih, geoloških i hidrogeoloških značajki koje prevladavaju u Ohiju s velikim prisustvom heterogenih naslaga u kojima se izmjenjuju kompetentni i nekompetentni slojevi stijena, a što nije razmatrano u ostalim modifikacijama RHRS [50]. ORHRM je zasnovan na 4 glavna faktora i to: geološki uvjeti (određuju potencijal odrona i očekivanu magnitudu); geometrijski uvjeti (određuju mogućnost pada bloka na prometnicu); uvjeti prometa (određuju hazard po vozila) i povijest odrona (određuje frekvenciju odrona). Hazard se definira kao zbroj vrijednosti sva 4 faktora. ORHRM koristi terenske opservacije, laboratorijske pokuse, povijesne zapise i analizu prometa, pa predstavlja zahtjevniju metodu procjene koja koristi kvantitativne procjene i objektivnija je od izvorne RHRS.

Rockfall Risk Rating for Settlements (R3S2) metoda razvijena je za procjenu hazarda od odrona za naseljena područja u Austriji [51]. Metoda je zasnovana na preliminarnoj fazi, tj. identifikacije lokacija na kojima odroni mogu dosegnuti naseljena područja, i detaljnoj fazi u kojoj se provodi procjena hazarda bodovanjem 3 parametara kojom se karakterizira izvorišno područje odrona i 6 parametara kojima se ocjenjuje gibanje i doseg pokrenute stijenske mase: i) razlabavljenost stijenske mase; ii) čvrstoća diskontinuiteta; iii) postojanost i orijentacija diskontinuiteta; iv) visina kosine; v) klimatski uvjeti i utjecaj vode; vi) veličina bloka; vii) neravnost i karakteristike prigušenja kosine; viii) tragovi povijesnih odrona; ix) kvaliteta korištenja zemljišta. Rezultat procjene je svrstavanje određenog područja u jednu od zona rizika: zone prihvatljivog rizika; zone s utvrđenim rizikom; i zone neprihvatljivog rizika. Metoda je korisna za odluke u prostornom planiranju, zoniranju hazarda i planiranju mjera ublažavanja hazarda.

Falling Rock Hazard Index (FRHI) razvijen je za procjenu hazarda uz odrona uz umjetne kosine u stijenskoj masi [52] i zasnovan na 10 parametara: i) visina zasjeka; ii) nagib lica zasjeka; iii) nepravilnost lica zasjeka; iv) uvjeti stijenske mase; v) razmak diskontinuiteta; vi) veličina bloka; vii) volumen odrona; viii) metoda iskopa; ix) trajnost (stabilnost) bez sanacije; i x) učestalost odrona (frekvencija). Ukupni zbroj bodova svih 10 parametara predstavlja „rizik“ podijeljen u 4 klase od minimalnog, preko niskog i srednjeg do visokog, ali kako u metodu nisu uvedeni elementi pod rizikom, metoda procjenjuje hazard, a ne rizik.

Rockfall Risk Rating System (RRRS) je metoda namijenjena procjeni rizika od odrona na prirodnim kosinama [53], ali kao i prethodna FRHI metoda rezultira klasama hazarda, jer ne uključuje elemente pod rizikom. Metoda uključuje bodovanje 20 parametara podijeljenih u 4 glavne kategorije, pri čemu 3 kategorije (A, B, C) analiziraju elemente hazarda (značajke kosine, značajke stijenske mase, utjecaj dreniranja i seizmičnosti) a četvrta kategorija (D) potencijalne posljedice (povijest odrona, utjecaj na građevine, prisustvo ljudi i djelatnosti, utjecaj mjera ublažavanja). Klase dobivene procjenom su kvalitativno opisane, a procjena je subjektivna.

4.2 Metode proizašle iz Rock Engineering System (RES)

Rock Engineering System (RES) predstavlja inženjerski koncept u rješavanju kompleksnih inženjerskih problema u stijenskoj masi velikih razmjera [37], da bi tek naknadno dobio i primjenu u procjeni hazarda i rizika od odrona u stijenskoj masi [25]. Za inženjerski problem procjenjuju se glavni parametri utjecaja, a zatim se analizira njihova interakcija u asimetričnoj matrici bodovanjem od 0 (nema interakcije) do 4 (značajan utjecaj). Sume interakcija predstavljaju uzrok i utjecaj za svaki pojedini parametar utjecaja.

Rockfall Intensity Indeks (RII) [25] zasnovan je na RES i analizira međusobnu interakciju 15 parametara: i) veličina bloka; ii) geometrija i topografija kosine; iii) gibanje bloka; iv) trajektorija bloka; v) maksimalni doseg bloka; vi) brzina; vii) udar pri srazu; viii) normalni i tangencijalni koeficijent restitucije; ix) materijal u kosini; x) čvrstoća stijenske mase; xi) neravnost površine; xii) vegetacija; xiii) visina slobodnog pada; xiv) koeficijent otpora; i xv) simulacija odrona. Vrijednost RII predstavlja sumu umnožaka vrijednosti parametara i njegove težinske vrijednosti, pri čemu RII predstavlja vrijednost intenziteta s maksimalnom vrijednosti 100 (najveći intenzitet). Metoda je subjektivna i ne daje vjerojatnost pojave odrona. Ne posjeduje vremensku komponentu te rezultat predstavlja podložnost pojavi odrona. Metoda je korisna samo u prostornom planiranju.

Zhang i dr. [54] unaprijedili su RII uvođenjem u proračun učestalosti pojave odrona, te na taj način uveli vremensku komponentu u procjenu. *Rockfall Hazard Indeks* (RHI) [54] analizira interakciju u dvije odvojene matrice za intenzitet odrona (na osnovi interakcije 10 parametara preuzetih iz RII) i za frekvenciju odrona (na osnovi interakcije 4 parametara). Te dvije analize nazvane su modificirani RII za matricu intenziteta (RIIm) i *Rockfall Frequency Index* (RFI). Ukupni RHI predstavlja umnožak vrijednosti RIIm i RFI izražen u postocima, a na temelju dobivenog rezultata dijeli kosine u 5 klasa od klase bez hazarda od odrona do ekstremno hazardne kosine. Metoda je ispravno uvela hazard uključujući intenzitet i učestalost pojave odrona, ali i dalje ostaje subjektivna, bez procjena rizika i korisna je samo u prostornom planiranju.

5 Diskusija i zaključak

U prethodnom tekstu opisane su metode procjene hazarda i rizika od odrona stijenske mase razvijane u prošlih 40 godina za kvalitativnu procjenu hazarda, pri čemu je većina razvijena za primjenu na ograničenim zonama uz prometnice [38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50] ili naselja ugrožena odronima [51], i uglavnom orijentirana na specifične probleme (prometnice, infrastruktura) ili ograničena područja.

Kako je već naznačeno, u Republici Hrvatskoj ne postoji ustaljena praksa procjene podložnosti i hazarda kao ni analize rizika od odrona u stijenskoj masi, iako su pojave odrona česte te izazivaju značajne štete na prometnicama i drugoj infrastrukturi [16], stambenim i drugim građevinama, a ljudskih žrtava bilo je i u nedavnoj povijesti. Više od 40% površine Hrvatske predstavlja krško područje izloženo odronima. Također, do sada nije usvojena ili razvijena neka od metoda procjene podložnosti, hazarda ili rizika od odrona primjenjiva u Republici Hrvatskoj, a uslijed posljedica klimatskih promjena mogu se očekivati sve učestalije pojave odrona u stijenskoj masi. Naime, dugotrajniji periodi oborina i suše, kao i duži i učestali periodi s negativnim vrijednostima temperature, značajno negativno utječu na ponašanje stijenske mase rezultirajući pojavom sve većeg broja odrona u stijenskoj masi u Republici Hrvatskoj posljednjih godina. Sve to navodi na potrebu izrade karte hazarda i rizika od pojava odrona u stijenskoj masi, a s tim i potrebe odabira odgovarajuće metode za procjenu hazarda i rizika od odrona stijenske mase, čemu bi trebala pripomoći iskustva iz svjetske literature. Pri tome svakako neće biti nužno izraditi potpuno novu metodu procjene hazarda i rizika od odrona, ali neće biti moguće prihvatiti neku od poznatih i provjerenih metoda bez odgovarajuće prilagodbe lokalnim topografskim, geološkim i klimatskim uvjetima u Republici Hrvatskoj.

Razmatrajući metode procjene hazarda i rizika koje se koriste u svijetu, a koje bi bile prihvatljive za uvjete u Republici Hrvatskoj, svakako treba uvažiti veličinu područja primjene, odnosno mjerilo. Treba napomenuti da je većina prethodno opisanih metoda namijenjena velikim mjerilima, odnosno ograničenim područjima istraživanja. Zoniranje hazarda odrona u stijenskoj masi u nacionalnim, regionalnim i lokalnim mjerilima provode se korištenjem vrlo jednostavnih, tj. osnovnih metoda koje koriste heurističke ili empirijske procedure [8] i usvajaju samo nekoliko parametara za procjenu, dok je vremenska komponenta u pravilu zanemarena. S obzirom na veličinu područja zoniranja hazarda od odrona u Republici Hrvatskoj, i mogućnosti podjele terena u zone sa sličnim topografskim, geološkim i klimatskim uvjetima, za procjenu hazarda u nacionalnim, regionalnim i lokalnim mjerilima bilo bi moguće i poželjno provesti procjenu hazarda od odrona u stijenskoj masi usvajajući modificirajući jednu od sofisticiranijih metoda kao što su *Rockfall Intensity Indeks* (RII) [25] ili *Rockfall Hazard Indeks* (RHI) [54] smanjenjem broja parametara, što bi omogućilo visoki stupanj točnosti u procjeni hazarda.

Za procjene hazarda u velikom mjerilu (eng. *site-specific*), postoji na raspolaganju cijeli niz prethodno opisanih metoda i nameće se modifikacija (prema lokalnim uvjetima) i usvajanje jedne od metoda preferirajući kvantitativnu metodu nad kvalitativnom i koja razdvaja procjenu hazarda i rizika. U tom smislu, razvoj metode za procjenu hazarda i rizika u Republici Hrvatskoj trebao bi se zasnivati na slijedećim metodama: *Colorado Rockfall Hazard Rating System* (CRHRS) [41] koji razdvaja komponente hazarda i rizika, a koristi veliki broj parametara u procjeni; talijanskom modificiranom RHRS (mRHRS) [47] i *Rockfall Risk Rating System* (RRRS) [53] zasnovanom na sličnim geološkim i klimatskim uvjetima u Italiji i Grčkoj te *Rockfall Risk Rating for Settlements* (R3S2) za procjenu hazarda od odrona za naseljena područja [51]. Pri tome je procjena rizika u navedenim metodama neodgovarajuća današnjim uvjetima razvoja tehnologija. Trodimenzionalne snimke terena visoke rezolucije, kao što su zračne i terestričke snimke korištenjem LiDAR (*Light Detection and Ranging*) [55] tehnologije ili fotogrametrijske snimke korištenjem SfM (*Structure from Motion*) tehnologije [56], omogućuju provođenje visoko sofisticiranih determinističkih prostornih simulacija pokretanja i propagacije odrona kao podloga za utvrđivanje rizika. Stoga razvoj odgovarajuće metode procjene hazarda i rizika od stijenskih odrona svakako treba usvojiti uvođenje modernih metoda procjene posljedica odrona na osnovi determinističkih metoda, dok heurističke metode mogu predstavljati jedino pomoćni alat u neizostavnim terenskim potvrdama rezultata.

Literatura

- [1] Varnes, D.J.: Slope movement types and processes. *Landslide analysis and control. Transportation Research Board, Special report 176*. (ur. Schuster, R.L., Krizek R.J.), National Academy Sciences, Washington, DC, pp. 11–33, 1978.
- [2] Cruden, D.M., Varnes, D.J.: (1996) Landslide types and processes. *Landslides: investigation and mitigation, transportation research board special report 247*. (ur. Turner, A.K., Schuster, R.L.), National Research Council, USA, pp. 36–75, 1996.
- [3] Bunce, C.M., Cruden, D.M., Morgenstern, N.: Assessment of the hazard from rock fall on a highway. *CAN GEOTECH J* **34** (1997), pp. 344–356.

- [4] Cascini, L.: Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *ENG GEOL* **102** (2008), pp.164–177.
- [5] Fell, R., Ho, K., Lacasse, S., Leroi, E.: A framework for landslide risk assessment and management. *Landslide risk management*. (ur. Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E.), Taylor and Francis Group, London, 2005.
- [6] Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E.: *Landslide risk management*. Taylor and Francis Group, London, 2005.
- [7] Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., Smith, J.T.: Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *BULL ENG GEOL ENVIRON* **73** (2014), pp. 209–263.
- [8] Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z.: Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *ENG GEOL* **102** (2008) 3, pp. 99–111.
- [9] Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P.: Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy. *GEOMORPHOLOGY* **31** (1999), pp.181–216.
- [10] Dai, F.C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y.: Landslide risk assessment and management: an overview. *ENG GEOL* **64** 2002, pp. 65–87.
- [11] Mavrouli, O.C. *Quantitative evaluation of the rockfall risk. Application to the Sola` d'Andorra. PhD Thesis*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [12] Ferrari, F., Giacomini, A., Thoeni, K. Qualitative rockfall hazard assesment: a comprehensive review of current Parctices. *ROCK MECH ROCK ENG* **49** (2016) 7, pp. 2865-2922
- [13] Romana M., 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works*. International Society of Rock Mechanics, Zacatecas, pp. 49-53, 1985.
- [14] Bieniawski, Z.T.: *Engineering rock mass classifications*. Wiley, New York, 1989.
- [15] Romana, M., Tomás, R., Serón, J.B.: Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. *ISRM International Symposium on Rock Mechanics 2015*, Quebec, Canada, 10 pp, 2015.
- [16] Arbanas, Ž., Grošić, M., Udovič, D. Mihalić, S.: Rockfall Hazard Analyses and Rockfall Protection along the Adriatic Coast of Croatia. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE* **6** (2012) 3, pp. 344-355.
- [17] Sečanj, M., Mihalić Arbanas, S., Kordić, B., Krkač, M., Bernat Gazibara, S.,: Identification of rock prone areas on the steep slopes above the Town of Omiš, Croatia. *Proceedings: of World Landslide Forum 4 Ljubljana 2017, Advancing Culture of Living vith Landslidees, Vol. 5 Landslides in different Environments* (ur. Mikoš, M., Vilimek, V., Yi, Y., Sassa, K.), pp. 481-488, Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [18] Varnes DJ, IAEG—International Association Engineering Geology, Commission on Landslides and other Mass-Movements Landslide: *Hazard zonation: a review of principles and practice*, UNESCO Press, Paris, 1984.
- [19] Crosta, G.B., Agliardi, F.: A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *NAT HAZARDS EARTH SYST SCI* **3** (2003), pp. 407–422.
- [20] Jaboyedoff, M., Dudt, J.P., Labiouse, V.: An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. *NAT HAZARDS EARTH SYST SCI* **5** (2005), pp. 621–632.
- [21] Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L.K.A., Gerber, W., Jaboyedoff, M.: Rockfall characterisation and structural protection—a review. *NAT HAZARDS EARTH SYS SCI* **11** (2011), pp. 2617–2651.
- [22] Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A.C., Peruccacci, S.: (2010) Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. *GEOMORPHOLOGY* **114** (2010), pp. 129–142.
- [23] Reichenbach P, Galli M, Cardinali M, Guzzetti F, Ardizzone F (2005) Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of central Italy. *Landslide risk assessment* (ur. Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.G.) Wiley, Chichester, 2005.

- [24] Pierson, L.A., Davis, S.A., Van Vickle, R.: *Rockfall hazard rating system implementation manual, federal highway administration (FHWA)*, report FHWA-OR-EG-90-01, FHWA. US Department of Transportation, Oregon, 1990.
- [25] Cancelli, A., Crosta, G.B.: Hazard and risk assessment in rockfall prone areas. *Risk and reliability in ground engineering*, pp 177–190, Thomas Telford, 1993.
- [26] Budetta, P.: Assessment of rockfall risk along roads. *NAT HAZARDS EARTH SYST SCI* **4** (2004), pp.71–81.
- [27] Fernandez-Hernandez, M., Paredes, C., Castedo, R., Llorente, M., de la Vega-Panizo, R.: Rockfall detachment susceptibility map in El Hierro Island, Canary Islands, Spain. *NAT HAZARDS* **64** (2012), pp. 1247–1271.
- [28] Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Philipposian, F., Rouiller, J.D.: Assessing fracture occurrence using “weighted fracturing density”: a step towards estimating rock instability hazard. *NAT HAZARDS EARTH SYST SCI* **4** (2004), pp. 83–93.
- [29] Derron, M.H., Jaboyedoff, M., Blikra, L.H.: Preliminary assessment of rockslide and rockfall hazards using a DEM (Oppstadhornet, Norway). *NAT HAZARDS EARTH SYST SCI* **5** (2005), pp.285–292.
- [30] Frattini, P., Crosta, G.B., Carrara, A., Agliardi, F.: Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physicallybased approaches. *GEOMORPHOLOGY* **94** (2008), pp. 419–437.
- [31] Dorren, L., Domaas, U., Kronholm, K., Labiouse, V.: Methods for Predicting Rockfall Trajectories and Run-out Zones. *Rockfall Engineering* (ur. Lambert, S., Nicot, F.), Wiley, Hoboken, 2011.
- [32] Wyllie, D.C.: *Rock Fall Engineering*. CRC Press Taylor and Francis Inc., Boca Raton, 2015.
- [33] Crosta, G.B., Agliardi, F.: Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *NAT HAZARDS EARTH SYST SCI* **4** (2004) 4, pp. 583–598.
- [34] Cruden, D.M., Fell, R.: *Landslide risk assessment*. Balkema, Rotterdam, 1997.
- [35] Budetta, P., Nappi, M.: Comparison between qualitative rockfall risk rating systems for a road affected by high traffic intensity. *NAT HAZARDS EARTH SYST SCI* **13** (2013) 6, pp.1643–1653.
- [36] Hudson, J.A., Harrison, J.P.: A new approach to studying complete rock engineering problems. *Q J ENG GEOL* **25** (1992), pp. 93–105.
- [37] Hudson J.A.: A review of rock engineering systemss (RES) applications over the last 20 years. *Rock characterisation, modelling and engineering design methods* (ur. Feng, X.T., Hudson, J.A., Tan, F.). pp 419–424, Taylor and Francis Group, London, 2013.
- [38] Pierson, L.A.: The rockfall hazard rating system. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD: ROCKFALL PREDICTION AND CONTROL AND LANDSLIDE CASE HISTORIES*, No 1343, (1992), pp. 6–13.
- [39] Stover, B.K.: Highway rockfall research report. Colorado Geological Survey, Department of Natural Resources, 1992.
- [40] Andrew, R.D.: *The Colorado rockfall hazard rating system*. Colorado Department of Transportation, Report CTI-CDOT-2-94, 1994.
- [41] Santi, P.M., Russell, C.P., Higgins, J.D., Spriet, J.I.: Modification and statistical analysis of the Colorado rockfall hazard rating system. *ENG GEOL* **104** (2009) 1, pp. 55–65.
- [42] New York State DOT: *Rock slope rating procedure. Geotechnical engineering manual*, 15, Geotechnical Engineering Bureau, Albany, 1996.
- [43] Franklin, J.A., Senior, S.A.: The Ontario rockfall hazard rating system. *Proceedings of the conference on engineering geology and environment*, Athens, pp. 647–658, 1997.
- [44] Franklin, J.A., Wood, D.F., Senior, S.A., Blair, J.A., Wright, J.: *RHRON: Ontario rockfall hazard rating system—field procedures manual*, Ontario Ministry of Transportation Materials Engineering and Research Office Report, MERO-043, 2013.
- [45] Vandewater, C., Dunne, W.M., Mauldon, M., Drumm, E.C., Bateman, V.: Classifying and assessing the geologic contribution to rockfall hazard. *ENVIRON ENG GEOSCI* **11** (2005) 2, pp. 141–154.
- [46] Rose, B.T.: *Tennessee rockfall management system. PhD. thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.

- [47] Budetta, P.: Assessment of rockfall risk along roads. *NAT HAZARDS EARTH SYST SCI* **4** (2004), pp. 71–81.
- [48] Youssef, A.M., Maerz, N.H.: Development, justification, and verification of a rock fall hazard rating system. *BULL ENG GEOL ENVIRON* **71** (2012), pp. 171–186.
- [49] Maerz, N.H., Youssef, A., Fennessey, T.W.: New risk—consequence rockfall hazard rating system for Missouri highways using digital image analysis. *ENVIRON ENG GEOSCI* **11** (2005) 3, pp. 229–249.
- [50] Shakoor, A., Woodard, M.J.: *Development of a rockfall hazard rating matrix for the state of Ohio*. Kent State University, FHWA/OH-2005/005, Kent, Ohio, 2005.
- [51] Molk, M., Poisel, R., Weibold, J., Angerer, H.: Rockfall rating systems: is there a comprehensive method for hazard zoning in populated areas? 2 *Proceedings of the 11th Interpraevent Congress, Vol. 2*, pp. 207–218, Dornbirn, Austria. 2008.
- [52] Koleini, M., Van Rooy, J.L.: Falling rock hazard index: a case study from the Marun Dam and power plant, south-western Iran. *BULL ENG GEOL ENVIRON* **70** (2011) 2, pp. 279–290.
- [53] Saroglou, H., Marinos, V., Marinos, P., Tsiambaos, G.: Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *NATURAL HAZARDS EARTH SYST SCI* **12** (2012), pp. 1823–1836.
- [54] Zhang, L.Q., Yang, Z.F., Liao, Q.L., Chen, J. An application of the rock engineering systems (RES) methodology in rockfall hazard assessment on the Chengdu-Lhasa Highway, China. *INT J ROCK MECH MIN SCI* **41** (2004), pp. 833–838.
- [55] Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N.J., Lim M., Lato, M.J.: Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS*, **39** (2014) 1, pp. 80–97.
- [56] Stock, G.M., Guerin, A., Matasci, B., Jaboyedoff, M., Derron, M.-H., and Collins, B.D.: *Quantifying 40 years of rockfall activity in Yosemite Valley with Structure-from-Motion and terrestrial lidar analyses*. Geological Society of America, 2017.