

Primljen / Received: 10.10.2023.

Ispravljen / Corrected: 25.3.2024.

Prihvaćen / Accepted: 3.4.2024.

Dostupno online / Available online: 10.6.2024.

Učinak veličine stupa i kuta nagiba pukotina na stabilnost podzemnih prostorija u poroznim vapnencima

Autori:

**Jalal Zenah**, dipl.ing.građ.Sveučilište tehnologije i ekonomije u Budimpešti
Građevinski fakultetZavod za inženjersku geologiju i geotehniku
jalal.zenah@edu.bme.hu

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Péter Görög**, dipl.ing.građ.Sveučilište tehnologije i ekonomije u Budimpešti
Građevinski fakultetZavod za inženjersku geologiju i geotehniku
gorog.peter@emk.bme.hu

Stručni rad

Jalal Zenah, Péter Görög

Učinak veličine stupa i kuta nagiba pukotina na stabilnost podzemnih prostorija u poroznim vapnencima

Stupovi imaju ključnu ulogu u stabilnosti podzemnih prostorija. Njihovi najvažniji parametri uključuju dimenzije, parametre materijala, stanje i geometriju pukotina. U ovom se radu ispituje utjecaj geometrijskog horizontalnog presjeka i kuta nagiba pukotina na stabilnost stupa, što utječe na stabilnost prostorija. Odabrano mjesto ispitivanja nalazi se u podrumskim sustavima u Budimpešti u Mađarskoj. Prema laboratorijskim istraživanjima i istraživanjima na terenu, matična stijena prostorija je porozni vapnenac male čvrstoće, ali predstavlja masivnu stijensku masu s malo diskontinuiteta. U nekima od prethodno istraženih podrumskih sustava, rub stupova je odrezan zbog prostornih potreba. Stoga je cilj ovog rada utvrditi učinak takvih geometrijskih promjena na stabilnost prostorija. Za modeliranje stabilnosti upotrijebljena je prostorija veličine 25 m² s jednim kvadratnim stupom. Parametri materijala određeni su različitim laboratorijskim ispitivanjima kao što su UCS, troosna ispitivanja, ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta te klasifikacijom stijenske mase. Ovaj rad pruža dragocjen uvid u čimbenike koji utječu na stabilnost stupova u podzemnim prostorijama te naglašava važnost pažljivog razmatranja tih čimbenika pri projektiranju, provjeri i izgradnji potpornih sustava za podzemne građevine.

Ključne riječi:

3D, stup, stabilnost, pukotine, numeričko modeliranje, RS3, kut nagiba, odnos širine i visine

Professional paper

Jalal Zenah, Péter Görög

Effect of pillar size and joint dip on stability of porous limestone cellars

Pillars play an essential role in the stability of an underground cavity. Their most important parameters are the dimensions, material parameters, condition, and joint geometry. This research investigates the impact of geometrical horizontal cross section and joint's dip angle on the stability of the pillar, which affects the stability of cavities. The chosen study site is in a cellar system in Budapest, Hungary. According to the laboratory and on-site investigations, the cellar's host rock is porous limestone with a low strength but a massive rock mass with few discontinuities. In some of the previously investigated cellar systems the edge of the pillars was cut because of space requirements. Therefore, this study aims to determine the effect of such geometrical changes on the stability of the cellar. A 25 m² room with a single square-based pillar was used to model the stability. Material parameters were determined through various laboratory tests such as UCS, triaxial, and discontinuity shear strength tests, as well as rock mass classification. Three-dimensional finite element software (RS3) was used to evaluate the stability of the studied pillar. Overall, this study provides valuable insights into the factors that influence stability of pillars in underground cavities and highlights the importance of carefully considering these factors when designing, verifying, and constructing support systems for underground structures.

Key words:

3D, pillar, stability, joints, numerical modelling, RS3, dip angle, width and height ratio

1. Uvod

Stabilnost podzemnih prostorija od iznimne je važnosti jer nestabilne prostorije mogu dovesti do urušavanja, vrtača i drugih opasnih stanja. Stupovi imaju ključnu ulogu u podupiranju težine nadsloja koji čine stijene i tlo koji prekrivaju prostoriju. Bez stabilnog sustava stupova, tlo i zgrada iznad njega su u opasnosti [1]. Bez stabilnih stupova, nemoguće je kontrolirati tlo i nadsloj [2].

Stupovi se mogu definirati kao *in situ* stijenska masa između dvaju ili više podzemnih otvora koji nastaju zbog izgradnje podzemnog rudnika u promjenjivim geometrijama [3]. Geometrija stupa utječe na sigurnost podzemnih prostorija [4]. Omjer širine i visine (\dot{S}/V) definira se kao utjecajni parametar na čvrstoću stupa i njegovog potencijalnog načina sloma [5].

Cilj je istraživanja odrediti kritičnu širinu stupa u prisutnosti pukotina pod različitim kutovima nagiba kako bi se osigurala stabilnost prostorije. Zbog potrebe za većim prostorom unutar podruma, širina stupa se promijenila, što bi moglo uzrokovati nestabilnost prostorije i slijeganje površine tla iznad nje. Model će se izraditi na temelju stvarnog podruma ispod građevinskog područja promjenom širine stupa kako bi se postigao odnos između stabilnosti prostorije i širine stupa. U ovom je radu analiza stabilnosti izrađena programskim paketom Rocscience pomoću računalnog programa RS3 temeljenog na metodi konačnih elemenata.

Ispitani podrumski sustav nalazi se u poroznom vapnencu, koji je, u skladu s nazivom, vrlo porozan i lak za obradu [6]. Postoje prijašnja istraživanja koja su ispitivala fizikalna i mehanička svojstva navedene stijene i uspoređivala rezultate različitih laboratorijskih ispitivanja [6-8]. Primjena alata za klasifikaciju stijenske mase važna je za određivanje parametara čvrstoće i krutosti napuknutih, istrošenih, ponekad zdrobljenih poroznih vapnenačkih slojeva iznad krova prostorija. Za to je primijenjen geološki indeks čvrstoće (GSI) na osnovi prethodnih iskustava. Hoek i sur. [9] uvode primjenu za vrste stijenskih masa, a usporedbu različitih metoda izračuna GSI-ja izvršili su Somodi i sur. [10].

Stabilnost raznih vrsta stupova u različitim materijalima proučavana je i ranije. To uključuje stupove od ugljena [2, 11, 12], stupove od pješčenjaka u SAD-u [13, 14], stup u rudniku hematita [15], rudnik ugljena u zapadnoj Pennsylvaniji u SAD-u [16], rudnik ugljena u Grčkoj [17], stup u rudniku vapnenca u Južnoj Koreji [18], stup u rudniku zlata u Kolumbiji [19], krunski stup (engl. *crown pillar*) u Kanadi [20], Južnoj Africi [21] i u Indiji [22] te vitki stup od vapnenca [23]. Numeričko modeliranje pomaže u ocjeni prostorija; nakon terenskih istraživanja, procjene numeričkog modeliranja smatraju se korisnim alatom za karakterizaciju stijenske mase [24].

Jessu i Spearing [25] primijenili su trodimenzionalno numeričko modeliranje metodom konačnih razlika (FLAC3D) za simulaciju okomitih i nagnutih stupova i analizu smanjenja čvrstoće stupa u prisutnosti diskontinuiteta. Četiri različita omjera širine i visine (\dot{S}/V) (0,5, 1,0, 1,5 i 2,0) ispitana su promjenom kuta nagiba diskontinuiteta.

Le Quang i sur. [26] proučavali su pomake podzemnih prostorija pod opterećenjem ceste, koji su nastali zbog promjene širine stupova.

Podrumi u ispitanoj području imaju stupove i zidne stupove. Problem nastaje kada se horizontalni presjek stupova smanji kako bi se stvorio veći prostor unutar podruma, kao što je prikazano na slici 1. Navedeno smanjenje poprečnog presjeka može dovesti do problema u stabilnosti prostorija i prostora iznad njega na kojem se planira graditi. Time se stupovi dodatno opterećuju. Svako smanjenje njihovog poprečnog presjeka može ugroziti sposobnost stupa da izdrži opterećenje iznad sebe, što može uzrokovati probleme sa stabilnošću. To može dovesti do sloma konstrukcije, što može biti opasno i potencijalno ugroziti život.



Slika 1. Usječeni segmenti stupova na ispitanoj području

U izračunima se uzimaju u obzir različite veličine stupova i različite orijentacije pukotina kako bi se ispitao učinak geometrijskih promjena na slici 1 i orijentacije pukotina na stabilnost stupa. Tijekom rudarskih aktivnosti, kada je rudnik ili dio rudnika napušten, dimenzije stupova se smanjuju kako bi se izvadio dio materijala iz stupa. Taj proces može izazvati isti učinak na stabilnost, ali dugoročna stabilnost u rudarskim projektima nije potrebna.

2. Geološki opis

Ispitani podrumi nalazili su se u Budafoku, južno od Budimpešte, gdje je mnogo podruma izgrađeno ispod ovog područja u miocenskom poroznom vapnencu.

Ispitani mađarski vapnenac je porozan [27] i nastao je tijekom miocenskog razdoblja. Vapnenac se smatra plitkomorskim suptropskim karbonatom taloženim na Panonskoj nizini. Pokriva veća područja u Budimpešti i njejoj okolici [8]. Stoljećima se upotrebljavao kao građevni materijal, a od su ovog kamena izgrađene su poznate građevine Budimpešte poput zgrade Parlamenta, tvrđave Citadella i Matijaševe crkve [27].

Poznato je da je ispitani porozni miocenski vapnenac meka stijena s visokom i promjenjivom poroznošću (14 – 52 %), pa

je stoga uočena velika varijacija u petrofizičkim svojstvima [8, 28]. O njegovoj raznolikosti teksture također se raspravljalo u prethodnim istraživanjima [6, 27].

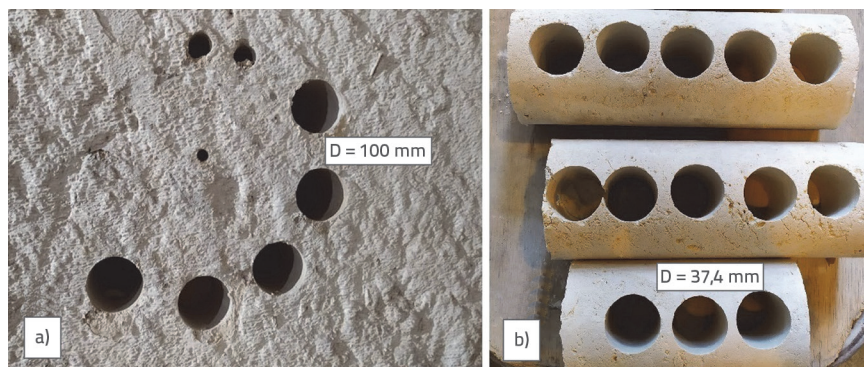
3. Materijali i metode

Ispitivanje stabilnosti stupa uključuje nekoliko procesa, od terenskog rada i modeliranja do laboratorijskog rada. Terenski je rad izveden u području Budafoka (južna Budimpešta), koje je poznato po svojim podrumskim sustavima. Mjesto uzorkovanja samo je dio velikog podrumskog sustava površine oko 50.000 m², a oko ispitnog mjesta postoji još takvih podrumskih sustava. Na slici 2. prikazan je jedan dio podrumskog sustava s ispitnom prostorijom i stupom koji su označeni crvenim krugom. Iscrtkano područje na slici 2. su porozni vapnenački stupovi, a bijela područja su podrumski prostori.



Slika 2. Nacrt podrumskog sustava s ispitanim stupom; iscrtkano se područje odnosi na potporni sustav

Uzorci su bušenjem uzeti iz zida prostorije (horizontalne jezgre). Izbušene jezgre bile su promjera 10 cm, kao na slici 3.a. Potom su u laboratoriju jezgre od 10 cm izbušene u okomitom smjeru kako bi se uzorci ispitivali prema situaciji koja je što sličnija situaciji na terenu (slika 3.b). Jezgre su izrezane u male uzorke promjera oko 38,0 mm. Za određivanje ulaznih podataka za modeliranje, osim geometrijskih mjerenja i ispitivanja fizikalnih svojstava uzoraka, provedena su ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) i troosna ispitivanja (ASTM D 7012-14). Ispitivanje posmične čvrstoće duž diskontinuiteta provedeno je



Slika 3. a) Mjesto uzimanja uzoraka u prostoriji, b) Izbušene jezgre u laboratoriju

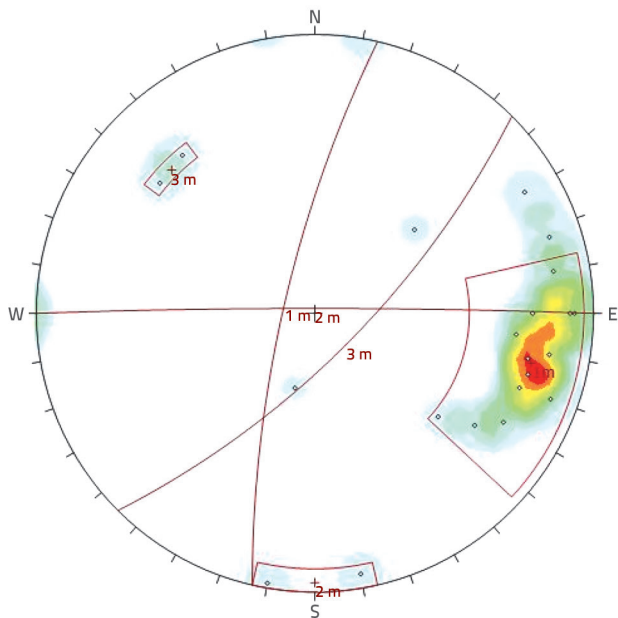
prema uputama norme ASTM D5607-16. Posmična ispitivanja provedena su pod različitim normalnim opterećenjima. Geometrija stupa dobivena je ručno u podrumu. Dimenzije horizontalnog presjeka su 3,6 m x 4,7 m, a visina stupa je 5 m. Ispitani stup prikazan je na slici 4.



Slika 4. Ispitani stup

Ispitane su postojeće pukotine kako bi se odredili parametri modeliranja pukotina koji mogu najbolje prikazati pukotine u modelu. Ispitane su pukotine u tom području, a orijentacija glavnih pukotina izmjerena je geološkim kompasom i android aplikacijom Rocklogger. Izmjereni podaci ocijenjeni su pomoću softvera Rocscience Dips. Rezultati orijentacije pukotina prikazani su na slici 5, pri čemu je prosječni smjer nagiba 283 stupnja, a prosječni kut nagiba iznosi 77 stupnjeva za glavni skup pukotina. Skupovi pukotina uglavnom sadrže vrlo strme pukotine, ali postoje i neke pojedinačne pukotine s manjim kutovima nagiba. U stupu se može prepoznati samo jedna pukotina iz glavnog skupa pukotina. Ipak, u izračunu se također uzimaju u obzir različite orijentacije pukotina za mapiranje njihovog učinka na stabilnost. 3D model ispitnog stupa izrađen u RS3 softveru prikazan je na slici 6, pri čemu pukotina ima kut nagiba od 30 stupnjeva.

Oko prostorije stanje je poroznog vapnenca dobro, a postoje i neke pukotine koje također treba uzeti u obzir. Stoga su za izračun ulaznih parametara numeričkog modeliranja primijenjeni podaci o intaktnoj stijeni i pukotinama. Za određivanje parametara posmične čvrstoće intaktna stijena provedena su troosna ispitivanja, a ispitivanja izravnim posmikom za parametre čvrstoće pukotina. Rezultati oba ispitivanja analizirani su pomoću softvera RSDData. Broj i rezultati osnovnih ispitivanja čvrstoće (UCS i brazilski test vlačne čvrstoće) i parametri gustoće koji su ispitani u laboratorijskim uvjetima



Slika 5. Pukotine ispitivanog područja s glavnim skupom pukotina

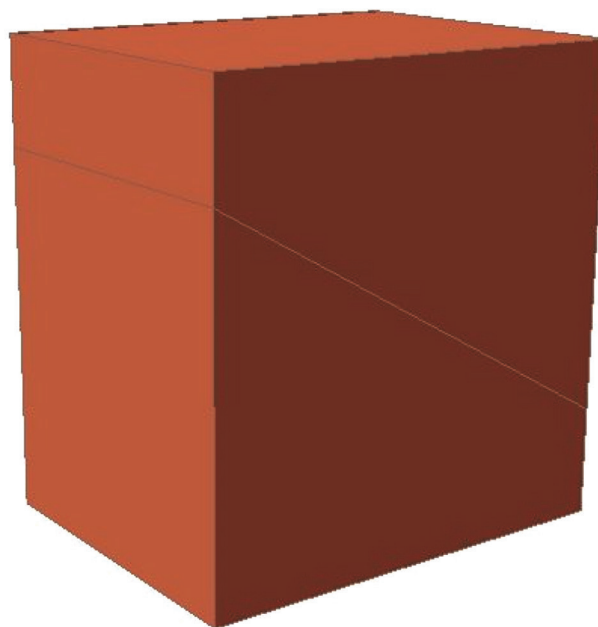
prikazani su u tablici 1. Prema rezultatima, matična stijena prostorije je meka stijena niske čvrstoće. Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM) navodi definiciju meke stijene (1981.) na temelju UCS-a, tj. stijena s UCS rasponom od 0,25-25 MPa klasificirana je kao izuzetno slaba do slaba stijena [29].

Tablica 1. Rezultati ispitivanja čvrstoće i parametra gustoće

	UCS [Mpa]	Brazilski [Mpa]	Gustoća [kN/m ³]
Broj ispitivanja	10	6	37
Min	1,90	0,34	14,0
Prosjek	4,03	0,65	16,6
Max	7,66	0,86	18,5

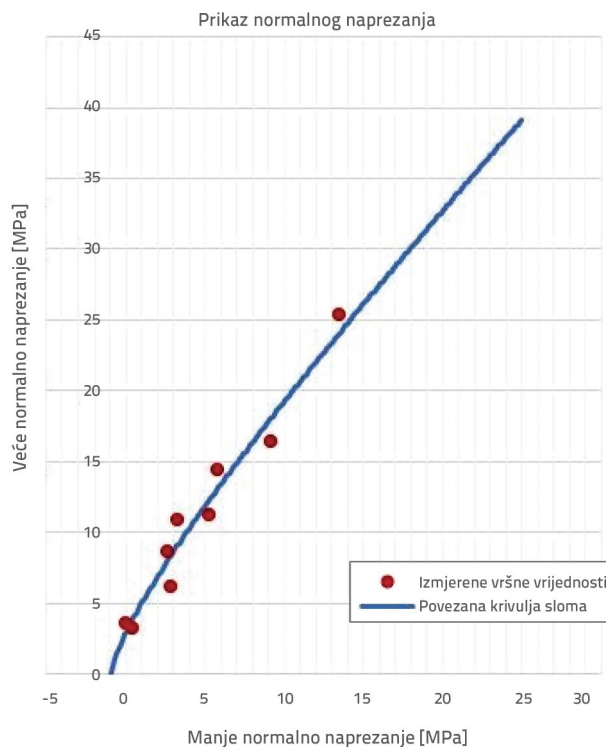
Nakon određivanja točaka sloma u troosnim i UCS ispitivanjima, svi podaci su obrađeni u softveru RSData kako bi se dobili podaci za modeliranje. Rezultati su ucrtani u dijagram manjeg i većeg normalnog naprezanja na slici 7., crvene točke odnose se na izmjerene vršne vrijednosti, a plava linija predstavlja povezanu krivulju sloma (Hoek-Brown).

Primjenjuje se generalizirani Hoek-Brownov kriterij sloma jer je općeprihvaćen za određivanje parametara čvrstoće stijenskih masa i primjenjuje se u projektima diljem svijeta [30, 31]. Parametar mi izračunan je iz troosnih podataka. Ulazni parametri za stijensku masu poroznog vapnenca navedeni su u



Slika 6. 3D model izrađen pomoću računalnog programa RS3

tablici 2. s varijabilnim podacima kao što su omjer širine i visine ispitanog stupa te kut nagiba pukotina. Youngov modul za intaktnu stijenu određen je UCS ispitivanjem s izmjerenim aksijalnim pomakom. Modul deformacije za stijensku masu izračunan je pomoću jednadžbe Hoeka i Diederichsa.

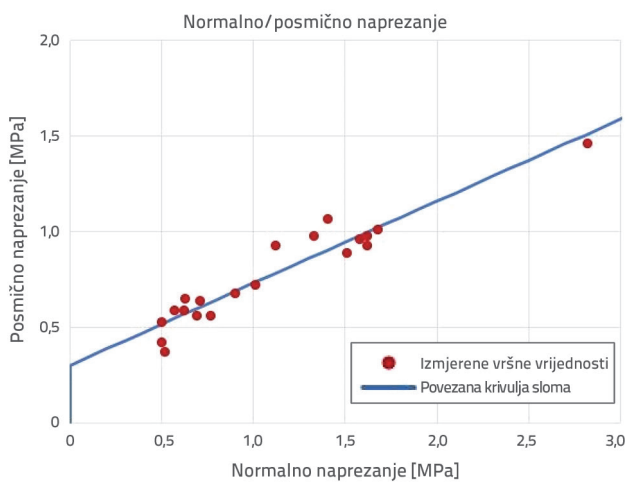


Slika 7. Rezultati troosnog laboratorijskog ispitivanja iscrtani na dijagramu manjeg i većeg normalnog naprezanja

Tablica 2. Parametri modeliranja intaktne stijene i stijenske mase, stupova i pukotina s njihovim rasponima

Parametar	Raspon
UCS	2,54 [MPa]
GSI	75
mi	3,315
Ei	0,616252 [GPa]
Gustoća	16,6 [kN/m ³]
V (visina stupa)	5 m
Š/V (širina/visina)	(0,72; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3)
Kutovi nagiba pukotina	(0, 15, 30, 45, 60, 75, 90)

Provedeno je nekoliko ispitivanja čvrstoće izravnim posmikom kako bi se odredila posmična čvrstoća duž diskontinuiteta poroznog vapnenca. Primijenjeni uređaj je *Controls shear box* za ispitivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta sa sensorima opterećenja za mjerenje normalnog opterećenja i posmičnih opterećenja do 50 kN. Primijenjeni pretvornik za mjerenje posmičnih pomaka mogao je mjeriti do 100 mm. Određeni su kut trenja i prividna kohezija, a rezultati ispitivanja ucrtani su na dijagram normalnog napreznja i posmičnog napreznja s povezanom linijom (slika 8.). Na slici se crvene točke odnose na izmjerene vršne vrijednosti, a plava linija se odnosi na Mohr-Coulombov kriterij sloma. Kut trenja bio je 23 stupnja, a prividna kohezija 0,30 MPa. Primijenjene vršne i rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće nalaze se u tablici 3. Za izračun su primijenjeni i reducirani parametri za modeliranje učinka curenja vode jer su prostorije nekoliko puta bile mokre zbog kvara na vodovodnim cijevima. To je razlog dvaju različitih parametara posmične čvrstoće pukotina u tablici 3., pukotine imaju visoku postojanost budući da su u rasponu od 10 do 20 m duljine.



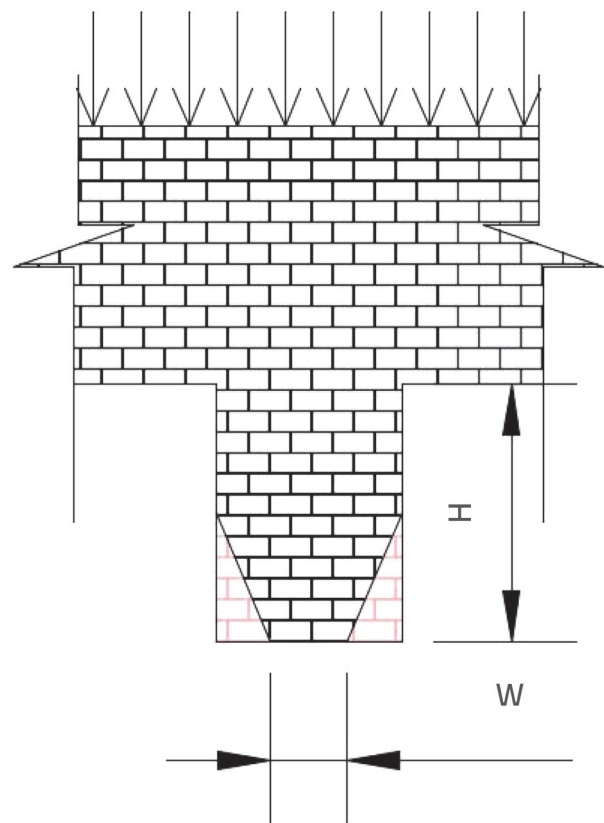
Slika 8. Ispitivanja posmične čvrstoće duž diskontinuiteta poroznog vapnenca (prikaz normalnog napreznja i posmičnog napreznja)

Tablica 3. Parametri posmične čvrstoće pukotina za model u suhim (pukotina 1) i mokrim uvjetima (pukotina 2)

Pukotine		Vršna vrijednost	Rezidualna
Pukotina 1	Kohezija [MPa]	0,3	0
	Kut trenja [°]	23	33
Pukotina 2	Kohezija [MPa]	0,15	0
	Kut trenja [°]	12	15

4. Modeliranje

3D model izrađen je uzimajući u obzir stup, a posebno je izračunana težina poroznog vapnenca koji opterećuje stup s obzirom na dimenzije prostorije. Težina poroznog vapnenca i površinsko opterećenje primijenjeni su na stup kao opterećenje. Iznad stropa prostorije do površine nalazi se 5 m pokriva. Navedeni pokrovni sloj sadrži porozni vapnenac u različitim stanjima, a samo oko 0,5 m deo sloj ispod površine može se smatrati zemljišnim pokrovom kao što je prikazano na slici 9.

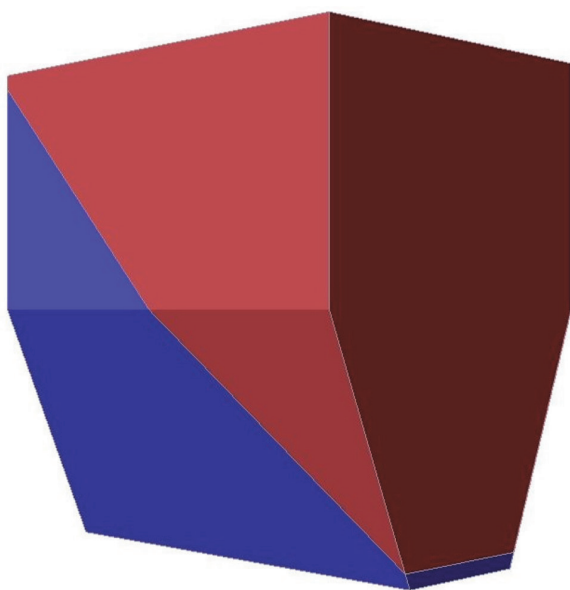


Slika 9. Presjek ispitivanog stupa sa slojem stijene iznad njega

Za ispitivanje stabilnosti i pomaka samog stupa bez ikakvog utjecaja na sloj iznad njega, pokrovni sloj od 5 m razmatra se s opterećenjem od 0,123 MPa, uz opterećenje zgrade - težinu zgrade koja se planira izgraditi - iznad prostorije koje iznosi 0,150 MPa. Težina poroznog vapnenca s tankim slojem tla

izračunana je s prosječnom težinom od $16,6 \text{ kN/m}^3$ kako bi se odredilo opterećenje koje djeluje na stup.

Modeliranjem je ispitan učinak dvaju parametara: vrijednosti kuta nagiba pukotine i širine stupa (\check{S}) kao omjera (\check{S}/V) (širina / visina). Svaka veličina stupa modelirana je s dvije različite geometrije. Prva geometrija je izvorna, a druga predstavlja izrezanu geometriju koja nalikuje stupovima na slici 1. Dakle, stup je ispitan modeliranjem u tri faze: prva kao izvorna geometrija stupa s pukotinom, druga faza nakon bočnog urezivanja, treća faza s opterećenjem. Model stupa nakon bočnog urezivanja i stvaranja pukotine prikazan je na slici 10. Pukotina je presjekla stup na dva dijela, kao na slici 10. Na toj je slici prikazana pukotina s kutom nagiba od 45 stupnjeva. Gornji dio stupa ne dopire do tla, pa je posmični otpor diskontinuiteta jedini parametar koji drži gornji dio stupa. Stoga se javlja važnost posmične čvrstoće diskontinuiteta.



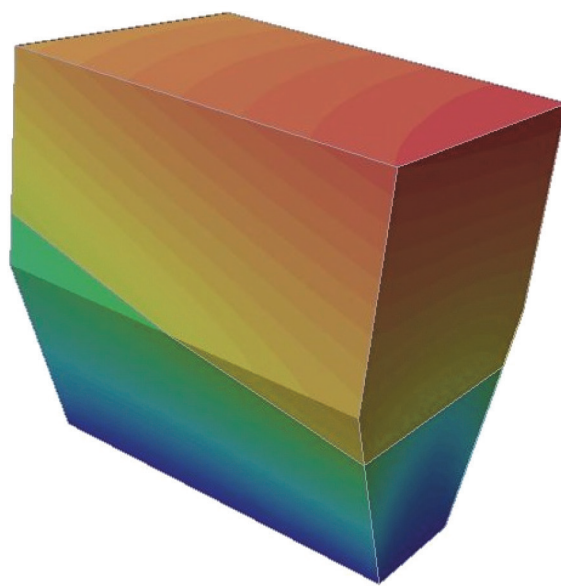
Slika 10. Model stupa, čija je donja strana urezana, s pukotinom (pukotina 2, kut nagiba = 45°)

Izrađena su 84 različita modela kako bi se odredili rezultati za svaki slučaj. Šest modela prikazuje varijaciju omjera širine i visine, a za svaki omjer širine i visine izrađeno je sedam modela za prikaz sedam različitih kutova nagiba pukotine. Svaki model je ispitan s dva različita parametra posmične čvrstoće za diskontinuitete. Za svaki model određeni su i ocijenjeni maksimalni pomaci i faktor smanjenja čvrstoće (engl. *strength reduction factor* - SRF). Faktor smanjenja čvrstoće, odnosno faktor sigurnosti, prihvatljiv je kada je veći od 1,35 [32] budući da na parametre posmične čvrstoće nije primijenjen reduksijski faktor.

5. Rezultati i rasprava

Svi su rezultati prikazani u sljedeće dvije tablice. Rezultati za suhe pukotine (pukotina 1) nalaze se u tablici 4, a za mokre pukotine (pukotina 2) u tablici 5. Prvi stupac tablice prikazuje kut nagiba,

a drugi stupac prikazuje omjer širine i visine. Radi se o izvornim dimenzijama. Kada iznosi 0,72, tada će stup biti tanji u svakom koraku. Postoje samo male promjene u pomacima za izvorni oblik i izrezane stupove kada se primjenjuje samo opterećenje stijene. Međutim, utjecaj opterećenja zgrade iznad prostorije rezultirao je gotovo dvostruko većim pomacima. Mjesto najvećih pomaka je obično u gornjem dijelu stupa (iznad pukotine) kao na slici 11; crvena boja se odnosi na najveće pomake, a plava na najmanje. Rezultati su pokazali da rezani oblik ima veći učinak kod tanjih stupova, pa su razlike između pomaka kod izvornih i rezanih stupova veće. To znači da postoji minimalna širina stupa kada rezanje nema učinka, ali kada je širina stupa manja od ove vrijednosti, iznos pomaka počinje rasti pri rezanju stupa. Navedena granica je pri omjeru širine i visine $\check{S}/V = 0,6$ s navedenim uvjetima opterećenja.



Slika 11. Primjer za pomake u stupu s pukotinom 1 (parametri suhe pukotine), kut nagiba = 15° , $\check{S}/V = 0,3$

Faktor sigurnosti određen je samo za rezani stup uzimajući u obzir opterećenje zgrade. Stup je siguran samo ispod omjera $\check{S}/V = 0,5$ kod svih kutova nagiba računajući sa suhim pukotinama (parametri pukotine 1).

Kada se uzima u obzir pukotina u mokrim uvjetima (parametar pukotine 2), većina slučajeva je rezultirala istim pomacima i faktorima sigurnosti kao u slučaju suhih pukotina budući da u ovim slučajevima pukotina ima nizak učinak na stabilnost zbog povoljnog nagiba. To se događa s kutom nagiba od 0, 15, 75 i 90 stupnjeva. U svim ostalim slučajevima došlo je do nekih promjena. U slučaju kuta nagiba od 30 i 60 stupnjeva dolazi samo do neznatnog smanjenja faktora sigurnosti u usporedbi s pukotinom u suhim uvjetima. Kut nagiba od 45 stupnjeva je najkritičniji. U tom slučaju svi faktori sigurnosti su ispod 1,35, pa prostorija prema ovim podacima nije sigurna. Kada je faktor sigurnosti ispod granice $\text{SRF} = 1,0$, pomaci su vrlo veliki zbog urušavanja prostorije.

Tablica 4. Rezultati modeliranja (pomaci i SRF) za pukotinu 1

Kut nagiba [°]	Š/V	Pukotina 1				Kut nagiba [°]	Š/V	Pukotina 1			
		Pomak [mm]			SRF			Pomak [mm]			SRF
		Izvorni	Rezanje	Zgrada				Izvorni	Rezanje	Zgrada	
0	0,72	2,6	2,6	5,2	1,61	60	0,72	2,7	2,7	5,4	1,61
	0,7	2,6	2,6	5,2	1,6		0,7	2,6	2,6	5,4	1,59
	0,6	2,6	2,7	5,3	1,52		0,6	2,6	2,7	5,6	1,51
	0,5	2,6	2,8	5,6	1,4		0,5	2,6	2,8	5,8	1,4
	0,4	2,6	3	6	1,28		0,4	2,6	3	6,1	1,28
	0,3	2,6	3,2	6,7	1,16		0,3	2,6	3,3	6,5	1,16
15	0,72	2,7	2,7	5,4	1,6	75	0,72	2	2	4	1,61
	0,7	2,7	2,8	5,5	1,59		0,7	2	2	4	1,6
	0,6	2,7	2,9	5,7	1,51		0,6	2	2,1	4,2	1,52
	0,5	2,7	3	6	1,38		0,5	2	2,2	4,4	1,41
	0,4	2,7	3,2	6,5	1,28		0,4	2	2,4	4,8	1,3
	0,3	2,7	3,5	7,5	1,16		0,3	2	2,6	5,3	1,17
30	0,72	3	3	5,9	1,6	90	0,72	1,5	1,5	3	1,58
	0,7	3	3,1	5,9	1,59		0,7	1,5	1,5	3	1,57
	0,6	3	3,2	6,3	1,51		0,6	1,5	1,5	3,1	1,49
	0,5	3	3,4	6,7	1,39		0,5	1,5	1,7	3,3	1,38
	0,4	3	3,7	7,3	1,28		0,4	1,5	1,8	3,6	1,28
	0,3	3	4,1	8,6	1,17		0,3	1,5	2	4,1	1,16
45	0,72	3,2	3,2	6,1	1,6						
	0,7	3,2	3,2	6,2	1,59						
	0,6	3,2	3,5	6,6	1,51						
	0,5	3,2	3,8	7,2	1,39						
	0,4	3,2	4,2	8,1	1,28						
	0,3	3,2	4,8	10	1,15						

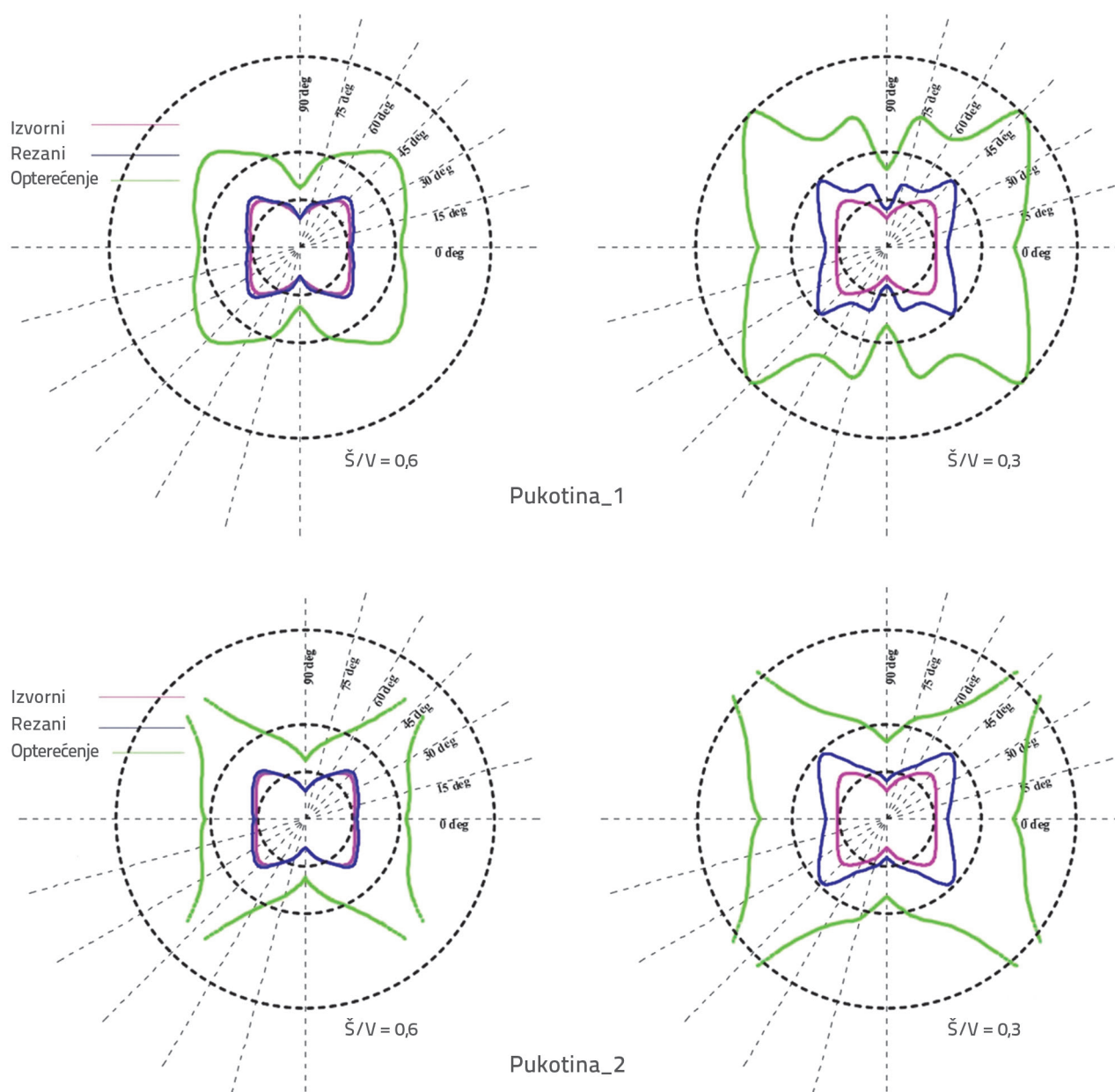
Rezultati izračuna također su prikazani u dijagramu na slici 12. Za grafikon su odabrane dvije najznačajnije dimenzije stupa. Omjer $\dot{S}/V = 0,6$ je minimalna širina stupa, a pomaci se počinju povećavati kod rezanog stupa. Drugi je omjer $\dot{S}/V = 0,3$, što predstavlja najtanji stup. Pomaci su dodani na sliku s kutom nagiba, tako da je učinak kuta nagiba vidljiv na slici. Sva tri slučaja su na dijagramu označena različitim bojama: izvorni oblik (ružičasta), rezani oblik (plava) te rezani oblik s opterećenjem zgrade (zeleno). Crne crtkano-točkaste linije predstavljaju mjerilo, najmanja je 2,5 mm, srednja je 5,0 mm, dok najveća pokazuje pomak od 10,0 mm. Slika prikazuje dijagrame i za suhe i za mokre pukotine. Najmanji pomaci su rezultat vertikalnih i horizontalnih pukotina. Maksimalni su pomaci uočeni kod pukotina od 45 stupnjeva. Mokra pukotina pokazuje slom stupa kada su pomaci povećani, a zelene linije nisu povezane.

U slučaju omjera $\dot{S}/V = 0,6$, pomaci izvornog i rezanog stupa su gotovo isti pa se ružičasta i plava linija gotovo preklapaju. Kod drugog omjera širine i visine ($\dot{S}/V = 0,3$) i u ova dva slučaja postoje razlike, pa je kod tankog stupa učinak rezanja značajniji. Sigurnost stupa je nedovoljna kada kut nagiba iznosi 45 stupnjeva ili kada je omjer širine i visine manji od 0,3 pa je $SRF < 1,35$. Pri $SRF < 1,0$, stup se ruši kada je kut nagiba 45 stupnjeva, a omjer širine i visine ispod 0,6. Slika 13. prikazuje krivulju SRF u odnosu na širinu i visinu za oba uvjeta pukotina kada je kut nagiba 45 stupnjeva. Sve SRF vrijednosti pukotine 2 su ispod 1,35, dok za pukotinu 1 dvije vrijednosti širine i visine (0,4 i 0,3) imaju SRF niži od 1,35.

Pomaci kao funkcija kuta nagiba kada je $\dot{S}/V = 0,4$ prikazani su na slici 14. Tri krivulje predstavljaju pomake svakog koraka modeliranja.

Tablica 5. Rezultati modeliranja (pomaci i SRF) za pukotinu 2

Kut nagiba [°]	Š/V	Pukotina 2				Kut nagiba [°]	Š/V	Pukotina 2			
		Pomak [mm]			SRF			Pomak [mm]			SRF
		Izvorni	Rezanje	Zgrada				Izvorni	Rezanje	Zgrada	
0	0,72	2,6	2,6	5,2	1,61	60	0,72	2,6	2,6	5,4	1,4
	0,7	2,6	2,6	5,2	1,6		0,7	2,6	2,6	5,4	1,39
	0,6	2,6	2,7	5,3	1,51		0,6	2,6	2,7	5,6	1,36
	0,5	2,6	2,8	5,6	1,4		0,5	2,6	2,8	5,8	1,32
	0,4	2,6	3	6	1,28		0,4	2,6	3	6,1	1,25
	0,3	2,6	3,2	6,7	1,16		0,3	2,6	3,3	6,5	1,15
15	0,72	2,7	2,7	5,4	1,6	75	0,72	2	2	4	1,61
	0,7	2,7	2,8	5,5	1,59		0,7	2	2	4	1,6
	0,6	2,7	2,9	5,7	1,5		0,6	2	2,1	4,2	1,52
	0,5	2,7	3	6	1,38		0,5	2	2,2	4,4	1,41
	0,4	2,7	3,2	6,5	1,28		0,4	2	2,4	4,8	1,3
	0,3	2,7	3,5	7,5	1,16		0,3	2	2,6	5,3	1,17
30	0,72	3	3	5,9	1,44	90	0,72	1,5	1,5	3	1,58
	0,7	3	3,1	5,9	1,43		0,7	1,5	1,5	3	1,57
	0,6	3	3,2	6,3	1,38		0,6	1,5	1,5	3,1	1,49
	0,5	3	3,4	6,7	1,3		0,5	1,5	1,7	3,3	1,38
	0,4	3	3,7	7,3	1,21		0,4	1,5	1,8	3,6	1,28
	0,3	3	4,1	8,6	1,13		0,3	1,5	2	4,1	1,15
45	0,72	3,2	3,2	6,1	1,06						
	0,7	3,2	3,2	6,2	1,05						
	0,6	3,2	3,5	11000	0,99						
	0,5	3,2	3,8	110000	0,92						
	0,4	3,2	4,2	97000	0,85						
	0,3	3,2	4,8	120000	0,77						



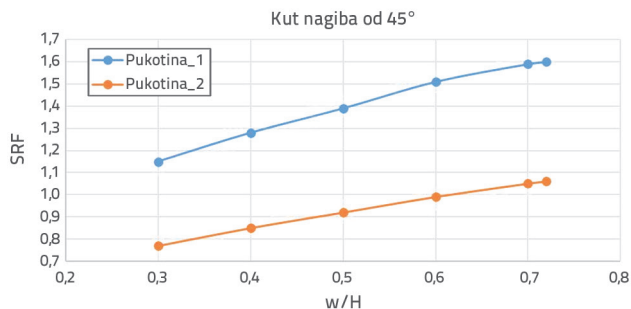
Slika 12. Pomaci s učinkom kuta nagiba pri različitim omjerima širine i visine i u različitim uvjetima pukotina (tri kruga pokazuju ljestvicu pomaka u stupovima 2,5 mm, 5,0 mm i 10,0 mm)

Smanjenje SRF-a doseže maksimum kada je pukotina 2 pod kutom nagiba od 45 stupnjeva. Navedeno smanjenje iznosi gotovo 35 %, kao što je prikazano na slici 15.

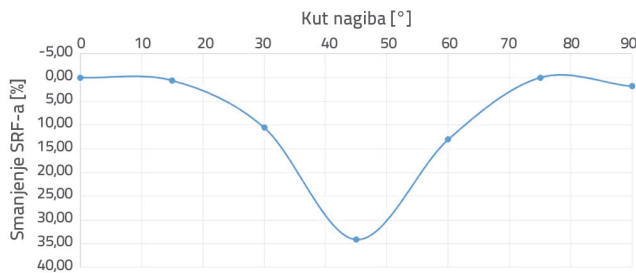
Jessu i Spearing [25] proučavali su čvrstoću stupa u odnosu na širinu i visinu te kut nagiba diskontinuiteta. Nakon kalibracije modela s teoretskom studijom promjene omjera širine i visine, rezultati su pokazali da je čvrstoća stupa opadala sa smanjenjem omjera širine i visine. Nakon ovog rada dobiveni su isti rezultati poput onih prikazanih na slici 13., dok kut nagiba pukotina ima različit učinak na čvrstoću stupa prema omjeru širine i visine (mali omjer širine i visine dovodi do manje čvrstoće), kao što prikazuju rezultati na slici 14. Le Quang i sur. [26] proučavali su utjecaj širine stupa na stabilnost i pomake podzemnog otvora

ispod ceste opterećene prometom te su otkrili da smanjenje širine stupa povećava pomake u stupu i u slojevima iznad njega, što je slično rezultatima našeg istraživanja kada se pomaci povećavaju sa smanjenjem širine za svaki kut nagiba, kao u tablicama 4. i 5.

Jedan od najvažnijih ishoda ovog rada je pronalazak kritične dimenzije stupa. Ako su dimenzije stupa veće od kritičnih, rezanje donjeg dijela nema utjecaja na pomake, a ako su manje, tada se pomaci povećavaju zbog rezanja. Navedeni rezultat pomaže odrediti je li rezanje opasno za stabilnost stupa ili nije. Međutim, to vrijedi za ispitane uvjete, a to su jednako opterećenje zgrade i prostorija s jednakim nadslojem. Kritična dimenzija stupa može varirati pod različitim uvjetima.



Slika 13. SRF i omjer širine i visine za oba uvjeta pukotina; kut nagiba je 45 stupnjeva



Slika 15. Smanjenje SRF-a za izvornu širinu stupa i pukotinu 2

6. Zaključak

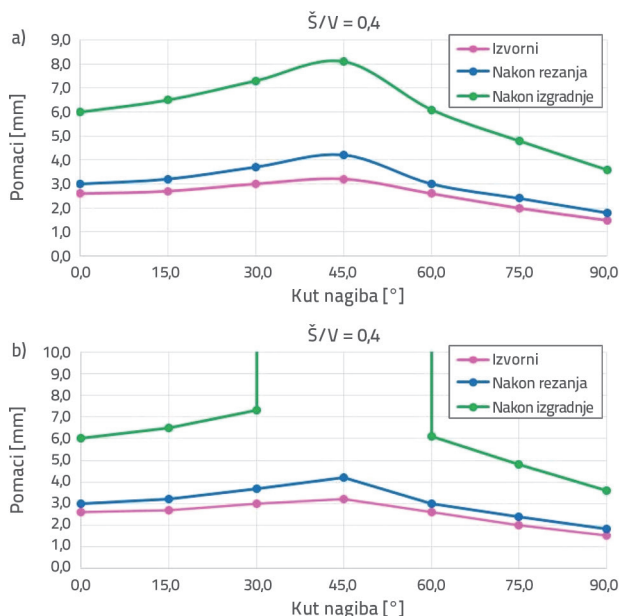
Na temelju istraživanja i 3D modeliranja predstavljeni su i raspravljeni sigurni i nesigurni uvjeti stupa, što će pomoći da se u ranoj fazi donese odluka o stabilnosti stupova koji se nalaze u istom području. Rezultati su pokazali da je za trenutnu čvrstoću pukotina stup siguran u rasponu omjera širine i visine (\check{S}/V) koji iznosi 0,72 - 0,5, pri čemu je V visina stupa, koja iznosi 5 m. Ali ako je omjer \check{S}/V ispod 0,4, dugotrajna stabilnost stupa se ne može dokazati jer faktor sigurnosti iznosi $SRF < 1,35$. Izmjereni kut nagiba pukotine u stupu je oko 75°, ali kut nagiba u ovom slučaju ne utječe na čvrstoću jer je posmična čvrstoća pukotine dovoljno visoka.

Međutim, u slučaju smanjenja posmične čvrstoće pukotine zbog curenja vode, kut nagiba utječe na sigurnost stupa. Kada je kut nagiba 45 stupnjeva, stanje stupa je upitno.

Važno je napomenuti da je sigurnost stupa ugrožena kada smanjenje širine dosegne omjer $\check{S}/V = 0,5$, s $V = 5$ m, u svim uvjetima. Stoga treba izbjegavati svako smanjenje širine stupa kako bi se osigurala njegova sigurnost i stabilnost. Zaključuje se da rezultati istraživanja i 3D modeliranja mogu pružiti korisne informacije za donošenje odlučujućih odluka o stupovima u istom području.

Zahvala

Istraživanje prikazano u ovom radu dio je projekta br. BME-NVA-02, implementiranog uz potporu Ministarstva inovacija i tehnologije Mađarske iz Nacionalnog fonda za istraživanje, razvoj i inovacije, a financirano je u okviru sheme financiranja TKP2021.



Slika 14. Pomaci u odnosu na kut nagiba pukotina s oba uvjeta pukotina u slučaju $\check{S}/V = 0,4$: a) pukotina 1; b) pukotina 2

Za procjenu stupa na slici 1., omjer širine i visine stupa je $3,4/5$ m = 0,68, kut nagiba je oko 77°, a svojstva pukotina su slična pukotini 1 (suha pukotina). Prema rezultatima predstavljenoga istraživanja, stabilnost ovog stupa je približna vrijednostima označenih redaka u tablici 4.

LITERATURA

[1] Li, Y., Liu, L., Zhang, J., Liu, C., Zhang, M., Wang, X.: Stability analysis of underground pillar supporting system under different disturbed stresses, *Geofluids*, (2021) 6, pp. 1–19, doi: 10.1155/2021/6634673.

[2] Mark, C., Agioutantis, Z.: Analysis of coal pillar stability (ACPS): A new generation of pillar design software, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 29 (2019) 1, pp. 87–91, doi: 10.1016/j.ijmst.2018.11.007.

[3] González-Nicieza, C., Álvarez-Fernández, M.I., Menéndez-Díaz, A., Álvarez-Vigil, A.E.: A Comparative analysis of pillar design methods and its application to marble mines, *Rock Mech. Rock Eng.*, 39 (2006) 5, pp. 421–444, doi: 10.1007/s00603-005-0078-z.

[4] Đokić, N., Duranović, M., Lapčević, V., Torbica, S., Petrović, M., Savić, L.: Proposal of 2D finite element model for square pillar stability analysis, *Podzemni Rad.*, 33 (2018), pp. 31–40, doi: 10.5937/PodRad1833031D.

- [5] Reed, G., Mctyer, K., Frith, R.: An assessment of coal pillar system stability criteria based on a mechanistic evaluation of the interaction between coal pillars and the overburden, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 27 (2017) 1, pp. 9–15, doi: 10.1016/j.ijmst.2016.09.031.
- [6] Pápay, Z., Török, Á.: Effect of thermal and freeze-thaw stress on the mechanical properties of porous limestone, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 62 (2017) 2, pp. 423–428, doi: 10.3311/PPci.11100.
- [7] Zenah, J., Görög, P., Török, Á.: Stability of underground excavation in porous limestone: Influence of water content, *Acta Montan. Slovaca*, 25 (2020) 3, pp. 337–349, doi: 10.46544/AMS.v25i3.7.
- [8] Vásárhelyi, B.: Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the miocene limestone, *Rock Mech. Rock Eng.*, 38 (2005) 1, pp. 69–76, doi: 10.1007/s00603-004-0034-3.
- [9] Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M.: Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of the Athens Schist Formation, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 57 (1998) 2, pp. 151–160, doi: 10.1007/s100640050031.
- [10] Somodi, G., Krupa, Á., Kovács, L., Vásárhelyi, B.: Comparison of different calculation methods of Geological Strength Index (GSI) in a specific underground construction site, *Eng. Geol.*, 243 (2018), pp. 50–58, doi: 10.1016/j.enggeo.2018.06.010.
- [11] Mathey, M.: Modelling coal pillar stability from mine survey plans in a geographic information system, *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, 118 (2018) 2, pp. 157–164, doi: 10.17159/2411-9717/2018/v118n2a9.
- [12] Lin, H., Yang, R., Li, Y., Fang, S.: Stability of coal pillar and roof movement characteristics in roadway backfill mining, *Adv. Civ. Eng.*, (2021) 3, pp. 1–13, doi: 10.1155/2021/5588923.
- [13] Ziwei, D., Jindui, J., Amirohossein, B., Ji, L., Yue, S.: Mechanism and control of spalling for friable sandstone pillars in a room and pillar mine, *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, 11 (2018) 6, pp. 197–205, doi: 10.25103/jestr.116.25.
- [14] Arthur, F.A., Ge, M.: Numerical approach to predict the strength of St. Peter sandstone pillars acted upon by vertical loads— A case study at Clayton, IA, USA., *IOSR J. Eng.*, 5 (2015) 1, pp. 36–41
- [15] Arzúa, J., Alejano, L., Clérigo, I., Pons, B., Méndez, F., Prada, F.: Stability analysis of a room & pillar hematite mine and techniques to manage local instability problems, *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses*, CRC Press, 2014., pp. 1147–1152, doi: 10.1201/b16955-198.
- [16] Sherizadeh, T., Kulatilake, P.H.S.W.: Assessment of roof stability in a room and pillar coal mine in the U.S. using three-dimensional distinct element method, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 59 (2016) 10, pp. 24, doi: 10.1016/j.tust.2016.06.005.
- [17] Tzalamarias, M., Tzalamarias, I., Benardos, A., Marinos, V.: Room and pillar design and construction for underground coal mining in Greece, *Geotech. Geol. Eng.*, 37 (2019) 3, pp. 1729–1742, doi: 10.1007/s10706-018-0717-2.
- [18] Kim, J.G., Abdellah, W.R., Yang, H.S.: Parametric stability analysis of pillar performance at Nohyun limestone mine, South Korea—A case study, *Arab. J. Geosci.*, 12 (2019) 12, p. 390, doi: 10.1007/s12517-019-4550-6.
- [19] Castro-Caicedo, A.J., Alejano, L.R., Monsalve Oliveros, J.E., Bernal Montiel, A.: Geotechnical design of pillars in underground mines of gold veins in cases of Colombia, *DYNA*, 86 (2019) 4, pp. 337–346, doi: 10.15446/dyna.v86n209.74041.
- [20] Chen, T., Mitri, H.S.: Strategies for surface crown pillar design using numerical modelling – A case study, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 138 (2021) 2, pp. 104599, doi: 10.1016/j.ijrmms.2020.104599.
- [21] Song G., Yang, S.: Probability and reliability analysis of pillar stability in South Africa, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 28 (2018) 4, pp. 715–719, doi: 10.1016/j.ijmst.2018.02.004.
- [22] Sharma, P., Verma, A.K., Gautam, P.: Stability analysis of underground pillar in the presence of overlying dump: A case study, *Arab. J. Geosci.*, 13 (2020) 5, pp. 217, doi: 10.1007/s12517-020-5133-2.
- [23] Esterhuizen, G.S., Tyrna, P.L., Murphy, M.M.: A case study of pillar collapse at a limestone mine in Pennsylvania, *Proceedings of The 52nd US Rock Mechanics Geomechanics Symposium*, American Rock Mechanics Association, Washington, USA, 2018., p. ARMA-2018-363.
- [24] Doležalova, M., Zemanova, V., Danko, J., Kovacs, L.: Convergence measurement and numerical modeling of the rock mass, *Građevinar*, 52 (2000) 3, pp. 153–142, 2000.
- [25] Jessu, K.V., Spearing, A.J.S.: Performance of inclined pillars with a major discontinuity, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 29 (2019) 3, pp. 437–443, doi: 10.1016/j.ijmst.2018.09.006.
- [26] Le Quang, P., Zubov, V., Duc, T.P.: Design a reasonable width of coal pillar using a numerical model: A case study of Khe Cham Basin, Vietnam, *E3S Web Conf.*, 174 (2020), p. 01043, doi: 10.1051/e3sconf/202017401043.
- [27] Török, Á., Siegesmund, S., Müller, C., Hüpers, A., Hoppert, M., Weiss, T.: Differences in texture, physical properties and microbiology of weathering crust and host rock: A case study of the porous limestone of Budapest (Hungary), *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 271 (1997) 1, pp. 261–276, doi: 10.1144/GSL.SP.2007.271.01.25.
- [28] Zenah, J., Török, Á., Rehány, N., Görög, P.: Investigation of the effect of construction activities to underground cavities cut into porous limestone, *Proceedings of the ISRM Specialised conference and 8th Conference of Croatian Geotechnical Society – Geotechnical Challenges in Karst, Omiš, Croatia, 2019.*, pp. 453–458
- [29] He, M.: Latest progress of soft rock mechanics and engineering in China, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 6 (2014) 3, pp. 165–179, doi: 10.1016/j.jrmge.2014.04.005.
- [30] Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B.: Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition, *Proceedings of the NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002*, pp. 267–273
- [31] Vásárhelyi, B., Davarpanah, M.: Influence of Water Content on the Mechanical Parameters of the Intact Rock and Rock Mass, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, (2018) 10, doi: 10.3311/PPci.12173.
- [32] EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules, 2004.