

ХИДРАУЛИЧКА ПРОВОДЉИВОСТ ПУКОТИНА И ЊЕН ЗНАЧАЈ ПРИЛИКОМ ПРОЈЕКТОВАЊА И САНАЦИЈА ИНЈЕКЦИОНИХ ЗАВЕСА БРАНА

HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF FRACTURES AND ITS IMPORTANCE IN THE REHABILITATION OF DAM GROUT CURTAINS

Срђан Спасојевић

Прегледни рад
10.5937/IASPN25087S

Апстракт: Течење флуида у испуцалим стенским масама претежно се одвија кроз пукотине, па је најважнији параметар за квантитативан опис пукотина њихова хидрауличка проводљивост (K). Овај параметар је од великог значаја за пројектовање, утврђивање ефикасности и санацију инјекционих завеса брана јер директно утиче на губитке воде, филтрационе силе и повећане узгоне у темељу бране, што може угрозити њену стабилност. Ипак, нема већег изазова за инжењере и хидрогеологе за утврђивање хидрауличке проводљивости и описивања кретање воде у стенама. Овај рад описује истраживање хидрауличке проводљивости пукотина у кречњачкој подлози бране Мратиње, као и образложење зашто инјекциона завеса није била у потпуности ефикасна након изградње бране.

Кључне речи: хидрауличка проводљивост пукотина, инјекциона завеса, течење

Abstract: Fluid flow in rock masses predominantly occurs through discontinuities, with hydraulic conductivity representing the principal parameter for the quantitative characterization of fracture networks. This parameter is of critical importance for the design, evaluation of effectiveness and rehabilitation of dam grout curtains, as it directly affects water losses, seepage forces, and uplift pressures in the dam foundation, potentially compromising overall dam stability. However, the determination of hydraulic conductivity and the characterization of fluid flow in fractured rocks remain among the most challenging tasks for engineers and hydrogeologists. This paper describes the investigation of the hydraulic conductivity of fractures in the limestone foundation of the Mratinje Dam and examines the reasons why the grout curtain was not fully effective after the dam's construction.

Key Words: hydraulic conductivity of fractures, dam grout curtains, fluid flow

УВОД

Подземна вода се креће у стенама кроз пукотине, тј. чврста стенска маса се одликује пукотинском порозношћу. Обично се струјање воде или других флуида у стенама пукотинске порозности изучава за потребе експлоатације рудних сировина, геотермалних вода, депоновања нуклеарног отпада, водоснабдевања и енергетике, али и при сагледавању и ограничавању неконтролисаног прилива подземне воде у тунелима или губитака воде кроз темеље спојница брана.

Хидрауличка проводљивост (К) пукотина квантитативно описује струјање воде кроз стенску масу. Од кључног је значаја за пројектовање и санацију инјекционих завеса брана. Висока вредност К указује на знатне губитке воде кроз темељну спојницу и висок узгон воде испод бране.

Специфичност истраживања описаног у овом раду јесу анализа и одређивање замењујуће величине хидрауличног отвора пукотина и утврђивање њихове расподеле применом статистичке анализе.

Оно је извршено на значајном хидротехничком објекту Југоисточне Европе, постојећој бетонској лучној брани Мратиње у кањону реке Пиве у Црној Гори. Изградњом ове бране формирано је вештачко језеро Пива. Брана је висока 220 m и дугачка 261 m, с корисним обимом акумулације од око 800 милиона кубних метара.

Истраживање је извршено коришћењем обимног фонда геотехничких података прикупљених с локације изградње бране, истражних бушотина, студије пукотина и прслина, тј. дисконтинуалност, картираним записима квалитета језгра (RQD), сеизмичким профилима, и испитивањима водопропустљивости у бушотинама (енгл: *packer test* или методом Лижона/Lugeona).

С хидролошког и хидрогеолошког, па и инжењерског становништа посебно су занимљиви записи о испитивањима водопропустљивости у бушотинама (ВТП) спроведеним током истражних радова. Ови подаци су обрађени и анализирани савременим истраживачким методама како би се добиле важне информације о кретању воде кроз пукотине и идентификацију хидрауличке проводљивости пукотина и стенског масива на локацији бране.

Добијени резултати су коришћени за интерпретацију уочених недостатака у извођењу инјекционе завесе, а у вези су с хидрауличким отвором пукотина, дужином продора инјекционе масе, као и избором притиска и материјала за инјектирање.

ГЕОЛОШКИ И ХИДРОГЕОЛОШКИ УСЛОВИ НА ЛОКАЦИЈИ

Кањон на месту бране је с врло стрмим и готово вертикалним странама, одсецима. Цела лева и десна обала изграђене су од масивних тријаских кречњака с неравномерним распоредом пукотина (Слика 1). Према свом постанку, кречњак је гребенског типа, и на њега су знатно утицали тектонски покрети у геолошкој прошлости.

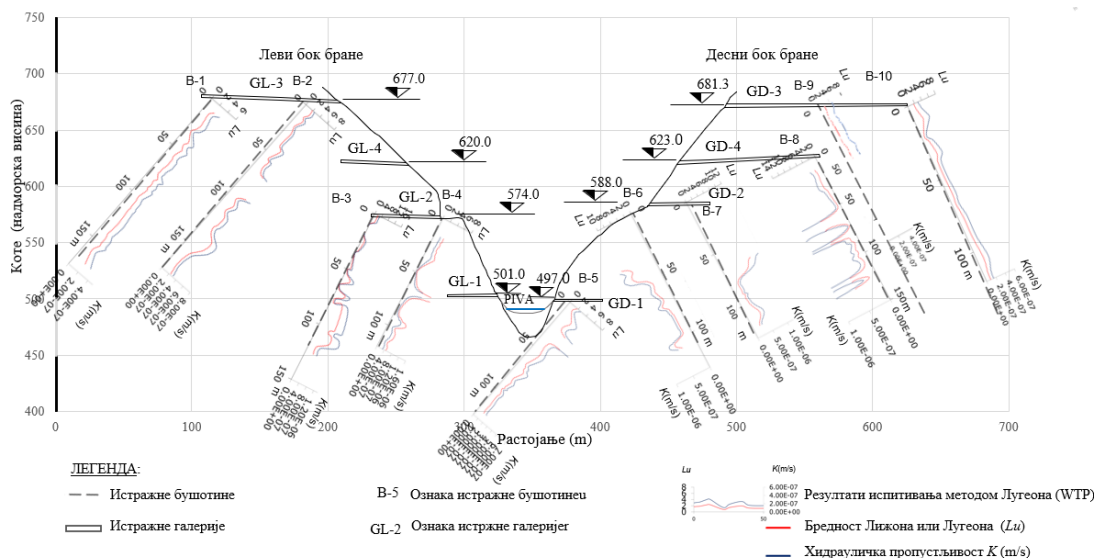
Површине кањона су веома неравне и избраздане, што је типично за дебелослојевите и масивне кречњаке, под јаким тектонским утицајима, као и деловањем мраза, падавина и инсолације. Као резултат свих ових процеса, а првенствено механичког распадања, на више места у подножју стрмих падина настала су већа удубљења. Она су касније испуњена растреситим стенским блоковима и наслагама, које се сваке године акумулирају и формирају сипаре.

Присуство више пукотина и разлома у масиву кречњака, као и карбонатни састав, омогућили су развој процеса карстификације. Међутим, у близини бране кречњаци имају мању густину пукотина, испуцалост и слабију водопропустљивост. Мањи број пукотина и нижа водопропустљивост указују на то да су у овом делу они отпорнији с мањим степеном скаршћивања.

Положај и режим подземних вода условљени су хидрогеолошким карактеристикама стенског масива, као и режимом подземних вода у залеђу акумулације и учесталосту падавина. Ниво подземних вода углавном је сличан нивоу у акумулацији, изузев у случајевима инфилтрације услед обилних и интензивних падавина или након топљења снега. Ова појава је последица тектонске раседне зоне у залеђу, која делује као проводник и снижава ниво подземних вода. Када се ниво воде у акумулацији дужи време одржава на истој коти, успоставља се равнотежа између нивоа воде у акумулацији и дотока подземних вода из стенског масива.

ПРИКУПЉАЊЕ И ОБРАДА ПОДАТАКА, МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Прикупљање података обухватало је истражне бушотине и испитивања водопропустљивости у бушотинама у кречњачком стенском масиву. Основни подаци о структурној геологији добијени су из језгра бушотина, што подразумева класификацију стенског масива, одређивање индекса квалитета стене (RQD) и број пукотина. Нажалост, мерење оријентације пукотина (тј. правац пружања и пад) није било изводљиво јер језгра бушотина нису била оријентисана.



Слика 1: Уздужни геолошки пресек на локацији бране, душотине и испитивања водопропустљивости (ВТП) дуж осе бране Мрајине

Приликом истражне фазе за пројектовање бране изведено је и више од 100 испитивања водопропустљивости у бушотинама, тзв. *packer test* (ВТП). У овом раду су коришћени подаци око 42 испитивања водопропустљивости, лоцираних у непосредном положају данашњег темеља бране. Изабрана су само она мерења која су показала стабилан проток, тј. где је достигнуто стационарно стање или где је измерен број пукотина на испитиваној деоници. Испитивања су изведена у бушотинама дубине од 120 до 180 m и пречника 76 mm.

Хидрауличка пропустљивост изражена је у Лижоновим јединицама (Lu), а која је емпиријски дефинисана као хидрауличка проводљивост потребна да би се постигао проток од 1 литар/минут по метру испитног интервала под референтним притиском воде једнаким 1 МПа, тј. количини воде која стенска маса прима по 1 метру бушотине током 1 минута под притиском од 10 атмосфера:

$$Lu = \alpha \cdot \frac{q}{L} \cdot \frac{P_0}{P} \quad (2)$$

где је α бездимензиони фактор и у међународном систему јединица (SI јединице) и узима се вредност $\alpha = 1$. Специфична пропустљивост (q) одређује се на основу укупне количине унете воде Q (литара) и времена трајања уливања T (минута), односно: $q = Q$ (литара) / T (минута). Ознака P представља притисак којом се вода утискује у испитивану зону (МПа),

а P_0 одговара референтном притиску једнаком 1 МПа. Ознака L означава дужину испитиване деонице (m).

Хидрауличка проводљивост се изражава у m/s, под претпоставком да је стенски масив хомоген и изотропан, и користећи корелацију између Лижо-нове јединице (Lu), и хидрауличке проводљивости (K): $1 Lu \approx 1,3 \times 10^{-7} m/s$.

Један од основних циљева испитивања водопропустљивости стенског масива јесте утврђивање просторног положаја и праваца кретање, тј. режима кретање воде. Обично се резултати испитивања водопропустљивости наносе на геотехничке профиле бушотине, што омогућава повезивање пропустљивости с геолошким особинама стенске масе. Како би се потпуније проучиле карактеристике пукотинске порозности потребно је одредити кључне хидролошке параметре. Хидрауличка проводљивост пукотина, тј. пукотинска порозност, зависи пре свега од величине отвора пукотина, стања пукотина, тј. храпавости, дужине, међу-пукотинске повезаности, као и од свеукупног ефекта водопропусности система пукотина, која може бити делимично отворена или затворена. Најважнији хидролошки параметри, тј. подаци о хидрауличкој проводљивости пукотина и стенског масива које је потребно дефинисати а који су свеобухватно разматрани су следећи:

- просторна расподела хидрауличке проводљивости, тј. по дубини, и
- величина хидрауличког отвора или зева пукотина b_h .

Просторна расподела хидрауличке проводљивост (K) по дубини, утврђена је обрадом резултата испитивања водопропустљивости у бушотинама, тако што је припремљен графички приказа дистрибуције учесталости, тј. хистограми логаритмованих вредности $\log(K)$ појединачних испитивања по дужини пробне деонице. Подаци $\log(K)$ детаљно су анализирани како би се утврдило постојање статистичке зависности по дубини и дефинисала одређена статистичка расподела хидрауличке проводљивости пукотина.

Други значајан параметар, величина и просторна расподела хидрауличког отвора или зева пукотина (b_h), одређен је прилагођавањем различитих теоријских статистичких расподела стварно измереним вредностима хидрауличке проводљивости по дужини пробне деонице, заједно с подацима о интензитету испуцалости, тј. броју пукотина. Даље се утврђивала сагласност изабране расподеле са стварним вредностима, тј. избор расподеле која се најбоље поклапа са измереним вредностима.

РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

РАСПОДЕЛА ХИДРАУЛИЧКЕ ПРОВОДЉИВОСТИ ПО ДУБИНИ

Бројне студије су показале да се хидрауличка проводљивост стенских маса смањује с дубином. Смањење пропустљивости с дубином обично се приписује већем броју стиснутих пукотина, тј. мање величине отвора пукотина, и већем размаку између пукотина у дубини масива. Ова појава је последица већих природних напона, ниже густине пукотина, као и нижег степена трошења и растерећења стенске масеа.

С обзиром на геоморфологију кањона реке Пиве, сматра се да постоји прерасподела напона услед одсека долине, при чему настају пукотине затезања на малим дубинама. Да би се овај ефекат узео у обзир, расподела хидрауличке проводљивости (K) разматрана је у односу на дубину (d_s). Величина d_s је најкраће растојање до стрмих падина долине.

Слика 2 показује да хидрауличка проводљивост (K) кречњака не указује на јасан тренд опадања са дубином, за разлику од кристаластих магматских и метаморфних стена у Шведској. Осим тога, средња вредност хидрауличке проводљивости (K) кречњака је $1,9 \times 10^{-7}$ m/s, док је за кристаласте магматске и метаморфне стене $7,9 \times 10^{-8}$ m/s. Ово је 2,4 пута више у поређењу с магматским стенама.

На локацији бране уочена је појава опадање развоја карста са дубином. С обзиром на то да водопропустљивост кречњачког водоносника зависи од степена развоја карста, природно је да се прихвати и претпоставка да је хидрауличка пропустљивост сличне законитости, тј. да хидрауличка пропустљивост (K) опада са дубином.

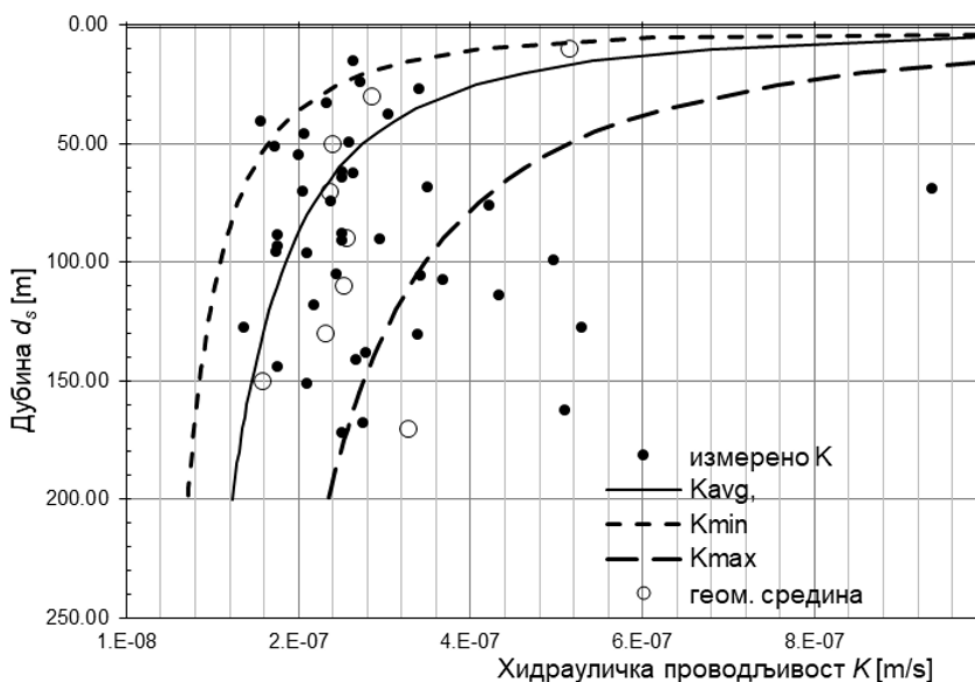
Утврђено је да постоји статистичка законитост расподеле хидрауличке проводљивости с повећањем дубине (d_s). Она се може прилагодити теоријској експоненцијалној расподели (*power-law distribution*):

$$K = K_0 \cdot d_s^{-\beta} \quad (2)$$

где је K_0 [m/s] параметар хидрауличне проводљивости, d_s [m] вертикална одстојање до косина падине, а β експонент.

У оквиру овог истраживања, вредности K_0 су се кретале у интервалу од $1,50 \times 10^{-6}$ m/s до $4,50 \times 10^{-6}$ m/s, при чему је најбоље поклапање постигнуто за вредност $2,45 \times 10^{-6}$ m/s. Параметар је усвојен константан 0,55.

Коефицијент корелације (r) и коефицијент детерминације (R^2) између K_{avg} и геометријске средине измерених вредности хидрауличне проводљивости износе $r = 0,85$ и $R^2 = 0,72$. Ове вредности су нешто ниже, али статистички значајне, што потврђује прихватљивост претпоставке о опадању хидрауличне проводљивости с повећањем дубине.



Слика 2: Распoдела хидрауличке прoвoдљивoсти (K) и укупина са дубинoм, и нeйрейтирана на oснoву иcпитивања вoдoпрoуcтљивoсти у дубoтинама

РАСПОДЕЛА ХИДРАУЛИЧКЕ ПРОВОДЉИВОСТИ И ВЕЛИЧИНА ОТВОРА

Бројна истраживања су такође показала да је хидрауличка пропустљивост стенске масе последица система пукотина, за које је карактеристична линијска а не просторна структура. Разлог је што је ток воде концентрисан у пукотинама, тј. потенцијални токови воде формирају се само у појединим пукотинама; стога, само мали број пукотина има водоносни (водопропусни) карактер.

Основни корак у добијању хидрауличких параметара јесте одређивање провoдљивoсти или трансмисивности пукoтина. Статистичке методе представљају уобичајени метод који се примењује за проучавање просторне варијабилности хидрауличке провoдљивoсти пукoтина. Ове методе обезбеђују стохастички опис сваке појединачне пукoтине на oснoву улазних података. Бројна истраживања доследно показују да хидрауличка провoдљивoст пукoтина oбичнo слeди лoгнoрмалну или бимoдалну, тј. мултимoдалну рaспoдeлу.

Лoгнoрмална рaспoдeла, која је најчeшћe у употреби, пoгодна је кaкo за хoмoгeнe тaкo и за хeтeрoгeнe стeнскe масивe. Дрyгe рaспoдeлe, пoпут Levу стабилнe рaспoдeлe, тaкoђe прeдстaвљaју вaђaнe oпциje.

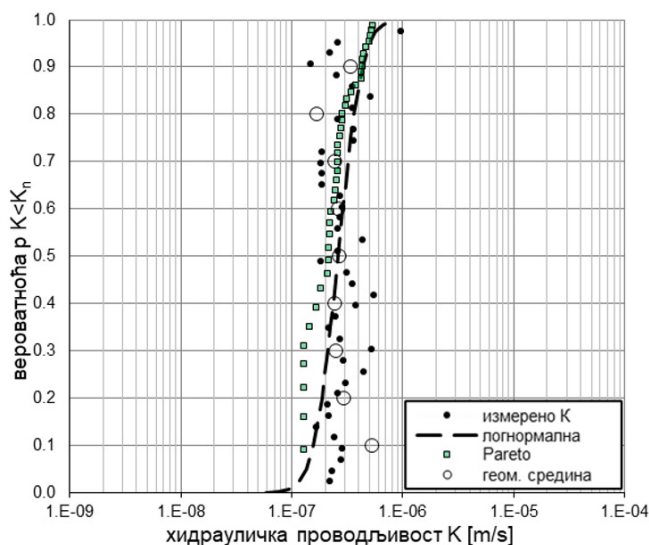
Једноставна експоненцијална расподела, Pareto расподела, такође се може користити за повезивање хидрауличке проводљивости појединачних пукотина. Применом ове расподеле могуће је поуздано проценити хидрауличку проводљивост на основу максималне хидрауличке проводљивости (K_{max}). Она се одређује за пукотину са највећом водопропустљивошћу на пробним деоницама. Ова расподела степенског закона показала се поузданом у случајевима када постоји велики број стиснутих пукотина и само неколико широких, односно када највећа пукотина контролише прилив воде, а тиме и хидрауличку проводљивост.

Применом Pareto расподеле израчунава се вероватноћа да је хидрауличка проводљивост (K) мања од хидрауличке проводљивости на деоници (K_n), тј. израчунава се $P(K < K_n)$, односно кумулативна функција расподеле (CDF):

$$P(K_n) = P(K < K_n) = 1 - \left(\frac{K_{max}/K_n}{N + 1} \right)^k \quad (3)$$

где је n број измерених хидрауличких проводљивости на деоници, N укупан број пукотина, а K_{max} хидраулична проводљивост највеће пукотине.

Обе криве, степенаста (Парето) и логнормална, могу се прилагодити мерењима хидрауличке проводљивости (K) и приказане су на полулогаритамском хистограму на Слици 3. Оне добро одговарају геометријским срединама варијација K за дубине од 40 до 140 m. Неколико одступања уочено је за плитке дубине (<40 m) и дубине веће од 140 m.



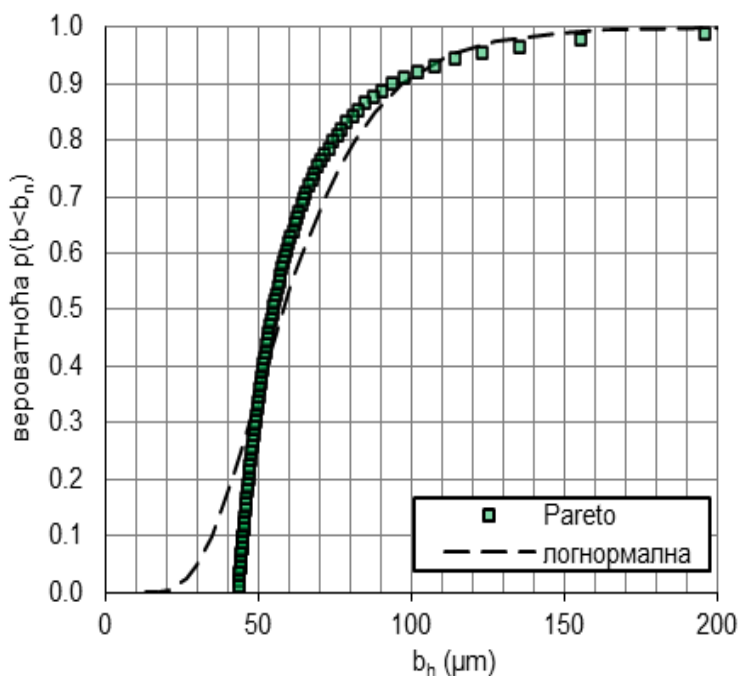
Слика 3: Кумулативни дијаграми расподеле хидрауличке проводљивости (K) на брани Мрајиње

Разматрање величине хидрауличног отвора пукотина заснован је на хидраулици тока кроз сложен низ пукотина на већем међусобном размаку или где постоји значајна разлика у њиховој величини отвора, али је струјање и даље ламинарно, течност вискозна, нестишљива, инертна у односу на стенски масив. У таквим случајевима хидрауличка проводљивост једне пукотине добија се решавањем Највијер-Стоксове једначине, што доводи до течења према условима једначине трећег степена:

$$K = \frac{\rho_w g}{\mu_w} \frac{b_h^3}{12} \quad (4)$$

Број пукотина дуж пробних деоница комбинује се с подацима испитивања водопропустљивости (ВТП) у бушотинама, како би се проценила погодна теоријска статистичка расподела хидрауличног отвора пукотина. У овом истраживању коришћена је степенаста, Парето дистрибуција, као и логнормална на исти начин као што је претходно учињено за хидрауличку проводљивост (K) по дубини.

Приказана једначина трећег степена статистички се преуређује тако да се хидраулички отвор (b_h) повезује с хидрауличком проводљивошћу (K), Сл. 4.



Слика 4: Кумулативни дијаграм моделираних величина хидрауличких отвора пукотина

Слика 4 приказује моделирање хидрауличног отвора пукотина из скупа података и одражава релативни садржај различитих хидрауличких отвора у стенској маси. Моделирање користи Парето својства да представи укупан проток у односу на број пукотина. Максимални хидраулички отвор, $b_{\max} = 195,87 \mu\text{m}$, процењен је коришћењем максималне вредности хидрауличке проводљивости добијене раније, $K_{\max} = 9,46 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Логнормално моделирање апроксимира се геометријском средином (b_g) од $58,29 \mu\text{m}$ и стандардном девијацијом ($\sigma_{\ln b}$) од 0,40 за логтрансформисане податке $b_h (\ln b_h)$.

Прорачунати хидраулички отвори из Парето расподеле крећу се од $50 \mu\text{m}$ до $200 \mu\text{m}$, при чему унутар овог опсега 90% пукотина има хидрауличке отворе мање од $93,28 \mu\text{m}$, а 10% их има мање од $45,12 \mu\text{m}$.

Прорачунати хидраулички отвори из логнормалне расподеле крећу се од $20 \mu\text{m}$ до $200 \mu\text{m}$, при чему унутар овог опсега 90% пукотина има хидрауличке отворе мање од $97,33 \mu\text{m}$, а 10% их има мање од $34,91 \mu\text{m}$.

Утврђени садржај различитих хидрауличких отвора (зева) пукотина могу објаснити зашто инјекциона завеса бране није постигла потребан ниво водонепропустљивости, тј. потпуну ефикасност.

Инјектирање је извршено применом *downward* методе, тј. силазно инјектирање, одозго надолу, с ниским притисцима до 0,5–0,6 МПа. Инјектирање се вршило у потезима од 5 m с размаком бушотина од 3 m. Поступак инјектирања који је коришћен за изградњу и касније за поправку инјекционе завесе није био адекватан. Коришћени инјекциони материјал, портланд цемент, може да продре у пукотине с хидрауличким отворима величине 100–150 μm , па је у случају кречњака са стиснутим пукотинама имао ограничену дужину продора у стенски масив и није могао у потпуности да затвори све пукотине с мањом величином отвора (зева). Такође, поступак је требало спровести с већим притисцима инјектирања за добијање оптималног учинка.

ЗАКЉУЧАК

У раду је истакнут значај познавања кретања воде кроз стенску масу, тј. познавање хидрауличке проводљивости пукотина. Искоришћена су савремена теоријска сазнања за процену постојећих података забележених током геолошких и хидролошких истраживања у прошлости.

Резултати показују да је хидрауличку проводљивост пукотина, тј. величине отвора пукотина могуће описати Парето и логнормалном расподелом.

На основу системске анализе геолошких и хидрогеолошких података утврђена је расподела хидрауличке ширине пукотина, а даљом анализом

је објашњено зашто инјекциона завеса није била у потпуности ефикасна након изградње. Уочени недостаци могу се објаснити имајући у виду време изградње бране и тадашњу доступност технологије. Технологија инјектирања значајно је напредовала у последњих 20 година, а пре свега у погледу теоријског приступа и концепта аналитичког решења за ширење инјекционе масе кроз испуцалу стенску масу.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Arnold, C. (1983) Pareto Distributions, MD. International Co-operative Publishing House.
- [2] Burgess, A. (1977) Groundwater Movements Around a Repository Regional Groundwater Analysis. Stockholm, Sweden: Kaernbraenslesakerhet.
- [3] Black, H., J. (1987) Fluid flow and flow mechanics in crystalline rock. The Geology of Fluid Flow: Fluid Flow in Sedimentary Basins and Aquifers, Geological Society by Blackwell Scientific, London, UK.
- [4] Belićević V., Knežević D. (2011) Antifiltration grout curtain of hydropower plant Piva – Mratinje dam. Dam Maintenance and Rehabilitation. Proceedings of the Inter.Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams, Taylor and Francis, London, UK.
- [5] Fell R., MacGregor P., Stapledon D., Bell G. (2005) Geotechnical Engineering of Dams. Taylor & Francis, London. <https://doi.org/10.1201/NOE0415364409>
- [6] Freeze, R. A. (1975) A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media. Water Resources Research 11 (5):725–741. <https://doi.org/10.1029/WR011i005p00725>
- [7] Galdi, G., P. (2009) Navier–Stokes Equations: A Mathematical Analysis. Springer, Encyclopedia of Complexity and Systems Science, New York.
- [8] Kujundžić B. (1979) Use of tests and monitoring in the design and construction of rock structures. Proc. of 4th Int. Congr. Rock Mech. (ISRM), Montreux, Switzerland.
- [9] Laubach, S., Lander, R., Criscenti, L., Anovitz, L., Urai, J., Pollyea, M., Hooker, J., Narr, W., Evans, M., Kerisit, S., Olson, J., Dewers, T., Fisher, D., Bodnar, R., Evans, B., Dove, P., Bonnell, L., Marder, M., Pyrak-Nolte, L. (2019) The role of chemistry in fracture pattern development and opportunities to advance interpretations of geological materials. Reviews of Geo-physics, 57:1065–1111. <https://doi.org/10.1029/2019RG000671>

- [10] Louis, C. (1974) Rock Hydraulics in Rock Mechanics. Springer Verlag, Vienna, Austria. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-4109-0>
- [11] Jovanović L., Kujundzić B., Marković O., Radosavljević Ž., Božović A. (1972) HPP “Mratinje” Detailed Design – Geology. Energoprojekt, Belgrade.
- [12] Rehfeldt R., Boggs M., Gelhar L. (1992) Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer: 3. Geostatistical analysis of hydraulic conductivity. Water Resources Research, 28(12): 3309–3324. <https://doi.org/10.1029/92WR01758>
- [13] Snow, D., (1969) Anisotropic permeability of fractured media. Water Resources Research, 5(6):1273–1289. <https://doi.org/10.1029/WR005i006p01273>.
- [14] Spasojević, S. (2022) Single-layer load-bearing tunnel lining structure in hard rock masses. Building Materials and Structures, 65(4): 167–177. <https://doi.org/10.5937/GRMK2204167S>
- [15] Wei, Z., Egger, P., Descoeudres, F. (1995) Permeability predictions for jointed rock masses. International Journal of Rock Mechanics, Mineral Science and Geomechanics, 32: 251–261.
- [16] Woodbury D., Sudicky E. (1991) The geostatistical characteristics of the Borden aquifer. Water Resources Research, 27(4): 533–546. <https://doi.org/10.1029/2020WR029034>
- [17] Witherspoon, P., Wang, S., Iwai, K., Gale, J. (1980) Validity of Cubic Law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resources Research, 16: 1016–1024.

Рад број 7, категорија Прегледни рад

Срђан Спасојевић,
 Geo.tunnel.konsult d.o.o,
 Београд, Захумска 28А
srdjans@geotunnelconsult.com,
 ORCID: 0009-0004-7280-9930, стр. 87