



**КЛЮЧОВИ ЕЛЕМЕНТИ ОТ АКТУАЛИЗАЦИЯТА НА ГЕОТЕХНИЧЕСКИЯ ДОКЛАД
НА РУДНИК „АСАРЕЛ“ – 2024 Г.**

д-р инж. Красимир Кърпаров, karparov@asarel.com
инж. Стойно Илчев, stilchev@asarel.com
инж. Милен Кръстев, mkrustev@asarel.com
инж. Антоний Кисъов, akisyov@asarel.com

РЕЗЮМЕ

В статията е дискутирана напукаността на масива на открития рудник „Асарел“, като пространствено са дефинирани така наречените „Разтрошена скална маса“ (PCM) и „Компетентна скална маса“ (КСМ). За тази цел е използвана информацията от геотехническите логове на 127 ядкови сондажи (вертикални и наклонени) с обща дължина на описаната ядка от над 33,500лм и 79 броя ядкови проучвателни сондажа с обща дължина над 32,100лм. В статията са представени резултатите от техните RMR стойности по класификацията на Bieniawski1989 и са дискутирани филтрационните свойства на описаните в геоложкия модел на находището 18 скални разновидности, попадащи съответно в КСМ и PCM.

ABSTRACT

The article discusses the fracturing of the massif, spatially defining as so-called "Fractured Rock Mass" (FRM) and "Competent Rock Mass" (CRM). For that purpose, were used the information from geotechnical logs of 127 core drillings (vertical and inclined) with a total length of over 33,500lm and 79 exploration core drillings with a total length of over 32,100lm. The article discusses the RMR values of the Bieniawski1989 clasification and the individual filtration properties of the described in the Geological Model 18 rock types, included in the CRM and FRM.

1. Увод и използвана база данни

От публикуването на първата актуализация на Геотехническия доклад през 2020 до настоящата му актуализация беше извършена и анализирана огромна по обем полева и камерална работа в областта на геотехниката и хидрогеологията, насочена към по-доброто изучаване на масива и условията, в които се развива рудник „Асарел“. По-доброто познаване на масива неминуемо води до повишаване на ефективността в управлението на деформационните процеси, повишаване на безопасността на минно-добивните дейности и повишаване на достоверността на ключови за устойчивостта на бордовете якостни и деформационни свойства на скалните разновидности от масива на рудник „Асарел“. В настоящия доклад ще бъде представен анализ на получените резултати за някои от най-важните геотехнически и хидрогеоложки характеристики на скалите от масива на рудник „Асарел“.

Настоящата актуализация включва старата база данни плюс допълнителната информация за напукаността на масива, изграждащ рудник „Асарел“ със сондажите от Етапи III и IV от програмата за осушаване на рудника. Настоящата актуализация стъпва на геотехническата информация от общо 113 сондажа (86 броя вертикални сондажи, 21 броя хоризонтални сондажи и 21 броя наклонени сондажи). Допълнително е използвана информацията от прокараните 79 броя ядкови проучвателни сондажа. По този начин, общата дължина на използваната сондажна ядка в настоящата актуализация възлиза на 65591.8 л.м. Ядката в наклонените сондажи е ориентирана с помощта на уреда Reflex АСТII.

Освен информацията от ядковите сондажи, за актуализацията на Геотехническия доклад е използвана и повърхностната картировка на откосите по клетки. При този метод се извършва картиране на структурните нарушения в скалите чрез разделяне на зоната на рудника на отделни

клетки. Правилно изпълненото картиране дава информацията относно ориентацията на прекъсванията, които се измерват директно, без необходимост от специално оборудване, за което се изисква калибриране, специална квалификация и интерпретиране. Картирането е проведено от служители на звено „Устойчивост на откосите“ към отдел „Минно инженерство“, като в проучването са включени данни от 2036 клетки, разположени по рудничните бордове. Данните в листите от картирането по клетки включват следната информация: номер и размер на клетката, достигнат ъгъл на работния борд, литоложка информация, метасоматична промяна, дължина на структурните нарушения в скалата, отстояния, завършване на пукнатините, широчина на пукнатините, вид на запълващия ги материал, простиране по правилото на дясната ръка и западане (наклон).

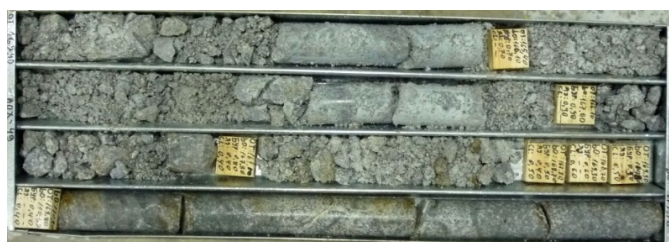
За статистическа обработка на данните в скалната механика се използват редица методи като би-номинално разпределение, Пуасоново разпределение, логаритмично разпределение, бета разпределение и др. Като най-популярен обаче, се налага методът на „Нормалното разпределение (Read & Stacey, 2009). В настоящата актуализация на Геотехническия доклад използването на този метод е извършено с помощта на екселската функция NORM.DIST.

2. Оконтуряване на РСМ в масива на рудник „Асарел“

Редица медно-порфирни находища отбелязват наличието на разтрошена зона, формирана около разломни структури. Размерите на тази зона е с различна дебелина и е в зависимост от тектонските или термални процеси формирали находището. Така например, в един от най-големите медно-порфирни рудници, Chuquibambuta в Чили, тази зона е формирана около главния разлом (с ориентация север-юг), като дебелината ѝ варира от няколко десетки до няколко стотици метри (Read J & Stacey P, 2009). В масива на р-к „Асарел“, значителен брой снимки на сондажна ядка и файлове с геотехническа картировка на тази ядка индексират за наличието на такава зона и около разломните



Тава № 48 от 161.4 до 165.4м



Тава № 49 от 165.4м до 171.1м



Тава № 50 от 171.1м до 175.0м

Фигура 1. Снимки на сондажна ядка от вертикален сондаж EG-51

свързани с оконтуряване на тази зона в находището.

структури. Това най-ясно може да се види на Фигура 1, която представлява снимки на част от сондажна ядка от вертикален сондаж EG-51. На фигурата са представени снимки на три последователни тави сондажна ядка от дълбочина между 161.4м и 175м.

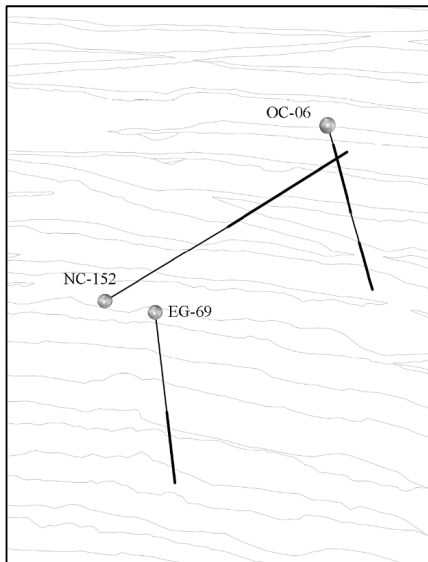
Тази дълбочина е подбрана по такъв начин, че напукаността на сондажната ядка да не бъде повлияна от производствени дейности, съпътстващи добива на полезни изкопаеми. От Фигура 1 може да се види, че от 161,4м до 168.7м (тава № 48 и 3/4 от тава № 49), скалната маса е с RQD=0%. След това се наблюдава интервал (от 168.7м до 170.2м), от който няма извадена ядка. В този интервал се наблюдава развитието на един от разломите в масива, като глинестият материал, запълващ разлома, е измит от сондажната промивка. В интервала от 170.2м до 175.0м се наблюдава КСМ с RQD=91%.

Създаването и обработката на повърхнините на разтрошената зона бе извършено със софтуерния продукт Rhinoceros – 7 (2016). По-долу е представена последователността на дейностите,

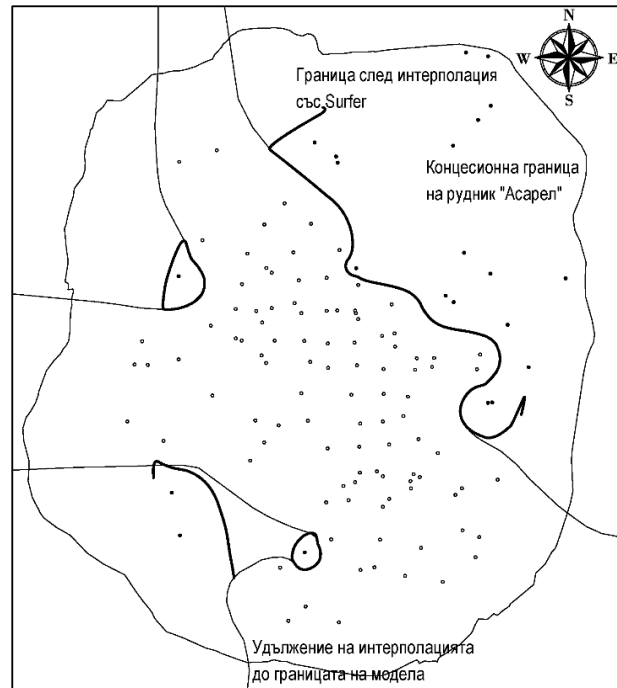
- Идентификация на разтрошената зона във всеки един от прокараните сондажи.

При извършения анализ на геотехническите логове на отделните сондажи и техния снимков материал бе установено, че качеството на сондажната ядка варира в много широки граници (с RQD между 0% и 100%). При това широко вариране на качеството на скалите бе взето решение, разтрошената зона на масива да включва категориите, определени от ISRM за почви (категиорите от S1 до S5 с RQD между 0% и 5%) и най-ниската категория за скален материал съгласно категорията на ISRM – R1 с RQD между 5% и 35%). Като обобщение може да се каже, че PCM в масива се определя в границите с RQD между 0% и 35%, а KCM в масива обхваща зона, в която стойността на RQD е над 35%.

При тези условия, като се вземе под внимание площта на рудника и средното разстояние между отделните сондажи, може да се очаква, че модела като цяло може да се получи твърде детайлен и разпокъсан, за да се оформи 3D тяло. За да се избегне този ефект бе прието минималната дължина на сондажната ядка, в която да се прилагат горните условия да не бъде по-малка от 15м, която е съобразена и с височината на стъпалата в рудника. В резултат на това допускане, на Фигура 2 могат да се видят сондажите NC-152, EG-69 и OC-06, които представляват съответно хоризонтален, вертикален и наклонен сондаж. На фигурата с удебелена линия са обозначени интервалите от тези сондажи, които попадат в KCM.



Фигура 2. Участъци от сондажи маркиращи разтрошена и компетентна скална маса



Фигура 3. Граница между разтрошената и компетентната скална маса на кота 705м

- Изготвяне на хоризонтални сечения на разтрошената зона от ядковите сондажи и тяхната интерполация

Интерполацията между точките от разтрошената и KCM е извършена с помощта на софтуера Surfer. Избраният за интерполация метод е този на „Естествената интерполация“ на съседните точки, който е най-общият и стабилен метод за интерполация, достъпен до момента. Този метод генерира консервативен резултат без изкуствени резултати чрез намиране на среднопретеглени стойности във всяка точка на интерполация на функционалните стойности, свързани с това подмножество от данни, които са естествени съседи на всяка точка на интерполация.

Теглата за интерполация са местните координати на естествения съсед, които се отнасят до точката на интерполация спрямо данните за естествения ѝ съсед, и тези координати са съотношения

на съдържанието на пресичане на дялове на Voronoi (Thiessen), които винаги са положителни и се сумират до едно. По този начин, неправилните изпъкнали области в облака с данни не са основната изчислителна операция, необходима за намиране на тези естествени координати на съседните с ясен геометричен алгоритъм и комбинирана декомпозиция, която позволява това да се направи в рамките на изчислителните ограничения, за всеки набор от данни в общо положение. Правилното подмножество на естествените съседи е достъпен автоматично от този алгоритъм. Естествената интерполация на съседните точки в декартовото пространство получава признание като надежден метод, особено за оскъдни и непостоянни данни и може да се приложи и към данни в сферично пространство.

Тъй като се очаква бъдещото развитие на рудника да достигне кота около 450м, моделът, представляващ разпространението на разтрошената зона, бе прието да бъде до кота 300м. При по-голяма дълбочина се наблюдава значителен недостиг на сондажна информация, при което грешката в процеса на оконтуряване на разтрошената зона би била значителна. Вертикалното разстояние между две съседни хоризонтални равнини бе определено на 15м, което съвпада с височината на стъпалата в котлована на рудник „Асарел“. На Фигура 3 може да се види границата между зоните с разтрошена и КСМ. На фигурата е представена концесионната граница на находището, а интерполацията, генерирана от софтуера Surfer, може да се види с удебелени линии, като тяхното удължение до границата на модела е представено с тънки линии.

- Изграждане на повърхнини между контурните линии във всяка една равнина

След генерирането на границите между КСН и РСМ за всяка една хоризонтална повърхнина със софтуера Surfer възникна въпросът как да се удължат тези линии до границите на модела по такъв начин, че да се осигури последователност между две съседни повърхнини. За тази цел бе направен анализ на броя на пресечените сондажи от всяка една повърхнина. Резултатите от този анализ могат да се видят на Фигура 4, от където се вижда, че точките с най-голяма гъстота от всички генерирани хоризонтални сечения са на кота 705м, което пресича 126 сондажа. По тази причина продължаването на получените интерполационни линии до границите на модела най-напред беше направено в тази равнина. След това процесът на удължаване на интерполационните линии в равнините под и над тази кота следват тенденциите на разпространение на тези от равнината с кота 705м, като се вземат в предвид техните локални особености. След като във всички хоризонтални сечения бяха създадени споменатите по-горе удължения на интерполационните линии, с помощта на софтуерния продукт Rhinoceros – 7 (2016), между тези линии, бяха генерирани повърхнини.

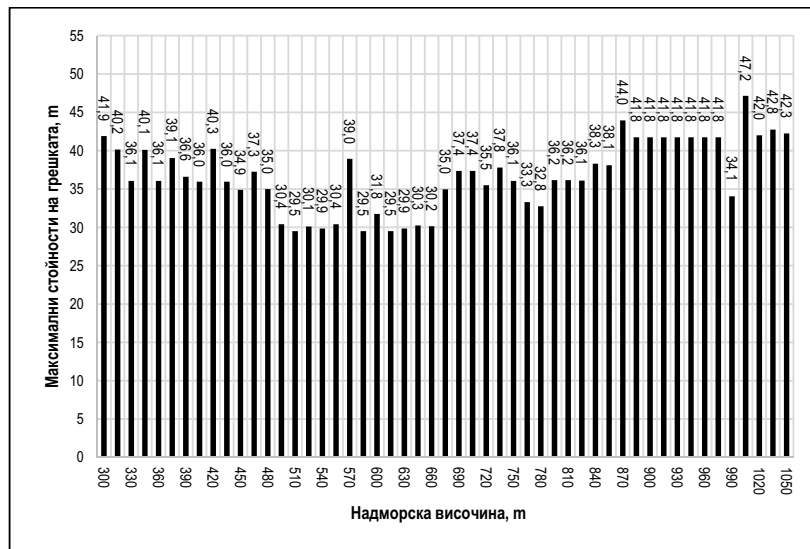


Фигура 4. Брой на точките с които е очертана разтрошената зона за всяко едно хоризонтално сечение

да се види на Фигура 5. От фигурата се вижда, че най-малка грешка може да се очаква между хор. 495 и хор. 660, където грешката е около 30м. С най-ниска точност се очертават най-ниските и най-високите

Интерес представлява точността, с която тази зона е оконтурена. За да се отговори на този въпрос бяха анализирани статистическите медиани на разстоянието между две съседни точки, през което е интерполирана границата между КСМ и РСМ за всяка една хоризонтална равнина. Очевидно, стойността на грешката в този случай за всяка една равнина би била половината от стойността на статистическата медиана за нея. Тази стойност на грешката може

хоризонти, където грешката достига до около 42m. Веднага възниква въпросът: Дали това е приемлива или неприемлива точност? За да се даде отговор на този въпрос трябва да се каже, че хоризонталната проекция на бордовете варира от 381m до 585m. Това означава, че грешката варира между 7.9% и 11.0% от тези проекции. Тук трябва да се каже, че като стандарт в скалната механика се приема грешка до около 20%. Това може да се види при нормативните стойности за коефициентите на устойчивост, нормативите за кинематичните анализи, лабораторните тестове и в други геотехнически области. В тази връзка, получените стойности за вариациите на границата между РСМ и КСМ са два до три пъти по-ниски от допустимите и са подходящи за извършването на геотехнически анализи. На Фигура 6 може да се видят 3D телата, определящи моделите на разтрошената и компетентната скална маса. За ориентация на читателя, на фигурата може да се види и горният ръб на котлована на рудник „Асарел“.



Фигура 5. Хоризонтална грешка при оконтуряване на разтрошената зона по хоризонти

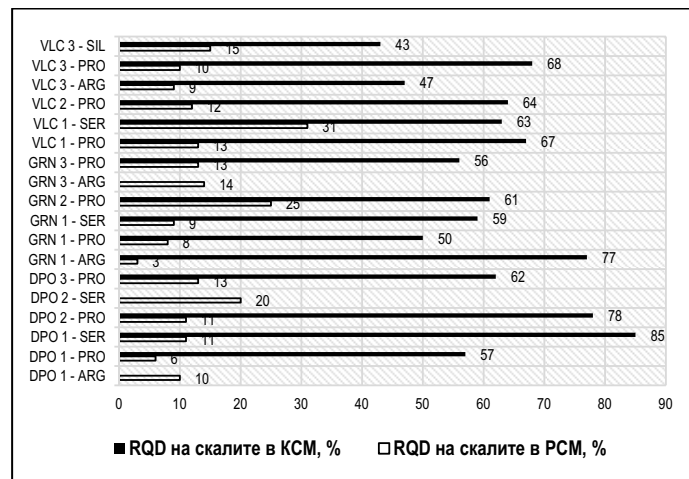


Фигура 6. Зони с КСМ в масива и концесионната граница на находище „Асарел“

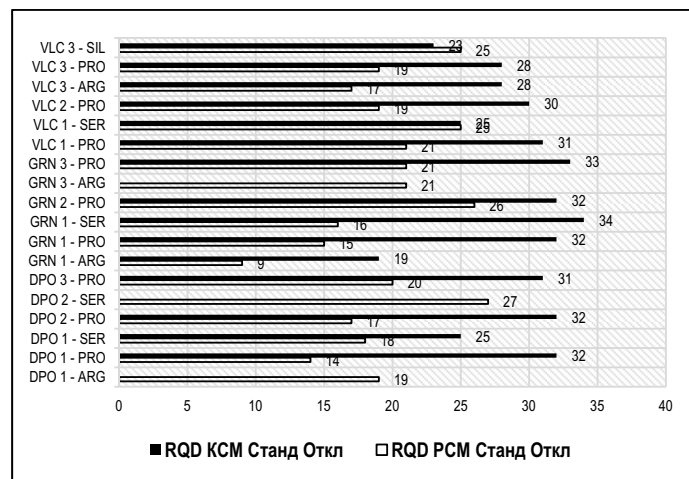
3. Анализ на резултатите от интензитета на напукаността на скалите (RQD)

На Фигура 7 могат да се видят RQD стойностите на отделните скални видове, попадащи в компетентната и PCM от масива на рудник „Асарел“, а на Фигура 8 са представени стойностите на техните стандартни отклонения. От фигурата се вижда, че средните RQD стойности на скалите съответно за KCM и PCM са съответно 62% (стандартно отклонение от около 29%) и 13% (стандартно отклонение от около 19%). От тук може да се направи изводът, че при разлика от 5 пъти в средните RQD стойности между компетентната и разтрошената зона, разликата в техните стандартни отклонения е само 10%.

Другият факт, който прави впечатление, е сравнението на RQD стойността и нейното стандартно отклонение, получени за компетентната и разтрошената зона за дадена скална разновидност. В този смисъл може да се види, че при KCM стандартното отклонение е около половината на средната стойност, докато в PCM стандартното отклонение е по-висока от средната стойност на скалната разновидност. Това означава, че в PCM има повече включения от компетентна маса, отколкото разтрошени включения в KCM. Като причина за това може да се посочи приетият критерий от 15m за дебелина на зоната (компетентна или разтрошена) при категоризацията на скалите. При варианта с намаляване на тази дебелина може да се очаква понижаване на стойностите на стандартното отклонение, но в същото време значително ще се повиши детайлността на границата между разтрошената и компетентната скална маса. Това от своя страна не би имало някакво особено практическо значение, тъй като при стабилитетните изчисления с помощта на софтуера FLAC 2D, зоните в изчислителните профили са с размер 20m x 20m.



Фигура 7. Стойности за напуканост на скалите за отделните скални разновидности



Фигура 8. Стойности на стандартното отклонение на напукаността на скалите за отделните скални разновидности

4. Анализ на резултатите от филтрационните свойства на скалите

За определяне на филтрационните коефициенти в отделните скални разновидности бяха анализирани 267 различен вид филтрационни теста, включващи: 45 водоналивни, 5 помпени и 217 пакер теста.

- Анализ на коефициентите на филтрация по литоложки вид

На Фигура 9 са представени осреднените стойности на коефициентите на филтрация на отделните скални разновидности за отделните литоложки видове, попадащи в КСМ. От фигурата може да се види, че с най-висок коефициент на филтрация са скалите с вулканична литология, а тези с най-ниска, са скалите с диорит-порфиритна литология. В стойностно изражение коефициентите на филтрация варират между 4.28E-3м/ден и 8.68E-3м/ден, като разликата е около 6 пъти Това, което прави впечатление, са ниските стойности на стандартното отклонение, което дава основание да се отчете една силна корелационна зависимост. Изключение прави литоложкият вид вулканит, при който стойността на стандартното отклонение е по-високо от средната му стойност. Този факт може да се обясни с относително по-малкия брой хидравлични тестове в сравнение с останалите два литоложки вида, с по-голямото разнообразие на запълващия пукнатините материал и по-високата RQD стойност на вулканитите в сравнение с другите два вида.

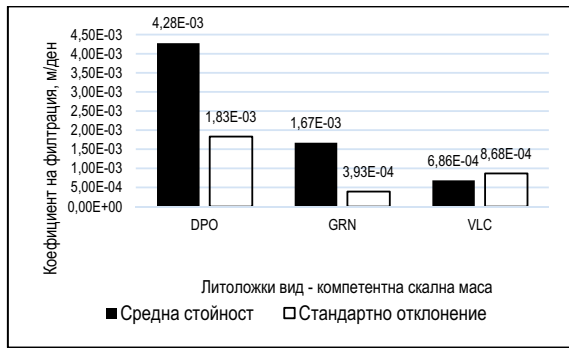
На Фигура 10 са представени коефициентите на филтрация в РСМ, като с най-висок коефициент са скалите с литология диоритов порфирит, а тези с най-нисък са скалите с гранитна литология. В стойностно изражение, коефициентите на филтрация варират между 1.19E-1м/ден и 2.40E-1м/ден, като разликата е около 2 пъти. От фигурата се вижда, че стойността на стандартното отклонение на осреднените коефициенти на филтрация за скалите с гранитна литология е равна или по-висока от коефициентите на филтрация. Това означава една много слаба корелационна зависимост, дължаща се предимно на голямото разнообразие на запълващия пукнатините материал, при положение, че скалите са с почти еквивалентни RQD стойности.

5. Класификационни системи и категоризация на скалите в масива на находище „Асарел“

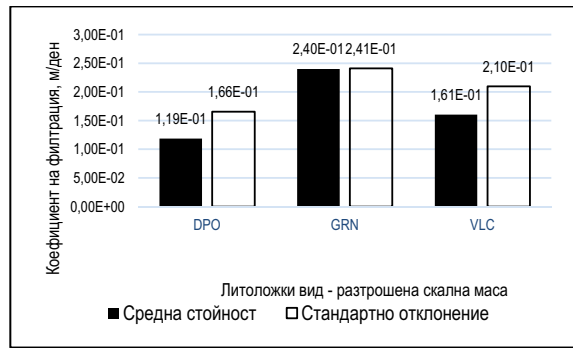
В световната геотехническа практика съществуват около 15 класификационни системи, като при извършване на минни дейности в открити рудници най-използваните класификационни схеми са тези на Bieniawski¹⁹⁸⁹ – RMR, на Laubscher – MRMR и на Hoek-Brown – GSI (Afrouz, 1992). Основните характеристики на тези модели могат да се опишат като:

1 – Моделът Hoek-Brown – GSI е базиран на RQD модела (Hoek & Wood, 1992), който произхожда от класификационната схема на Bieniawski¹⁹⁷⁶ (RMR). Когато се използва този модел, GSI стойностите се определят на база повърхностната картировка на пукнатините и геотехническото описание на ядката, като се приема, че ядката е суха.

2 – Моделът Laubscher (MRMR) е създаден на база разработките на Laubscher (1977, 1984), Laubscher & Taylor (1976) и Laubscher & Page (1990), които описват модифицирана система за оценка на скалната маса в минната индустрия, базирана на честотата на напукване на масива. Тази MRMR система използва някои принципи на RMR, дефинирани от Bieniawski, и ги коригира за отчитане на *in-situ* индуцираните напрежения, ефектите от взривните дейности и изветрянето на скалите. През изтеклите години бяха направени редица препоръки от водещи специалисти, свързани с получените стойности на MRMR. При използването на MRMR системата на Laubscher, трябва да се има предвид, че много от случаите, на които тя се основава, са взети от подземни минни операции и главно от рудници, използващи метода на блоково обрушаване. Като недостатък на тази система може да се посочи фактът, че за да се премине от MRMR към GSI трябва да се извърши трансформация на стойностите на RQD. Priest & Hudson (1979) и Bieniawski (1989) предлагат преобразователни коефициенти, но тяхното използване не е препоръчително поради насочеността, свързана с RQD, и емпиризма на предложените корелации. Поради тази причина и двата метода могат да доведат до грешки и неточности в процедурите и биха съдържали високи нива на неточност.



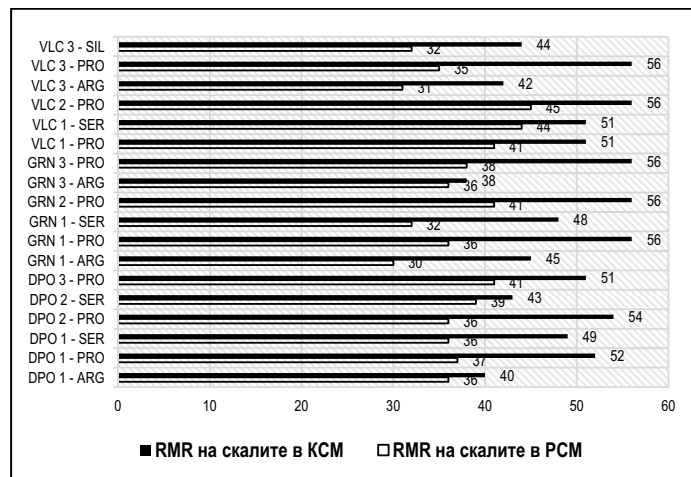
Фигура 9. Коефициенти на филтрация по литоложки вид в компетентна скална маса



Фигура 10. Коефициенти на филтрация по литоложки вид в разтрошена скална маса

3 – Моделът на Bieniawski₁₉₈₉ (RMR) се базира на създадения от Bieniawski (1976), RMR₁₉₇₆ модел, който оценява 5 характеристики на скалите: тяхната якост, качество (RQD), разстоянието между пукнатините, тяхното състояние и подпочвените води. Системата за оценка на скална маса на Bieniawski (RMR₁₉₇₆) първоначално се основава на случаи от гражданското строителство. Въз основа на това в минната индустрия постепенно назряваше тенденция тази класификация донякъде да разглежда като консервативна и бяха предложени няколко конструктивни изменения с цел да се направи класификацията по-подходяща за приложение. На база тези предложения, Bieniawski (1989) извършва модификации на системата (RMR₁₉₈₉), като вместо критерия за оценка състоянието на пукнатините се добавят други 4 характеристики, а именно: дължина на пукнатините, дебелина, вид запълващ материал и грапавост. Освен това, стойности на GSI, по-големи от 25, са същите като тези от системата на Bieniawski₁₉₈₉. По този начин, тази класификационна система се превръща в една от най-използваните от геотехническите специалисти в световен мащаб.

Въз основа на гореизложеното, за класифициране на скалите в находище Асарел бе приета класификационната система на Bieniawski – RMR₁₉₈₉, като са анализирани геотехническите логове от ядровото сондиране и картирането на бордовете по клетки. Както беше отбелязано по-горе, качеството на скалите в находище „Асарел“ се разделя на два вида: компетентна скална маса, в която могат да се опишат структурни нарушения и разтрошена скална маса, при която структурните нарушения са хаотично ориентирани и не може да се разграничат някои елементи на отделни пукнатинни системи. Тези особености налагат някои промени в прилагането на RMR₁₉₈₉, като в районите с разтрошена скална маса не могат да бъдат отчетени дължината на пукнатините и по този начин, при прилагането на системата RMR₁₉₈₉, за скалната маса дефинирана като PCM, не се получават точки по критерия „Дължина на пукнатините“.



Фигура 11. RMR₁₉₈₉ стойности на скалните разновидности попадащи в KCM и PCM от находище „Асарел“



На Фигура 11 са представени RMR_{1989} стойностите на скалните разновидности, попадащи в КСМ и РСМ от находище „Асарел“. От фигурата може да се види, че RMR_{1989} стойностите на РСМ са между 5% и 38% по-ниски от съответните стойности за КСМ. Прави впечатление, че при скалите с аргилитна метасоматична промяна, разликата между RMR_{1989} стойностите на скалните в РСМ са между 10% и 26% по-ниски в сравнение с тези в КСМ, докато при скалите с пропилитна метасоматична промяна, разликата между RMR_{1989} стойностите на скалните в РСМ са между 20% и 38% по-ниски в сравнение с тези в КСМ. Това може да се обясни с разликите в модула на еластичност, като скалите с аргилитна метасоматична промяна са със стойности от около 17GPa, а тези с пропилитна – 47GPa. Като друга причина може да се посочи видът на запълващия пукнатините материал, като този в скалите с аргилитна метасоматична промяна е предимно глина, а в тези с пропилитна промяна пукнатините са предимно отворени.

Авторите на статията биха искали да благодарят на ръководството на „Асарел-Медет“ АД за неговата подкрепа по време на работата и разрешението да публикуват получените резултати от направените наблюдения и извършените анализи.

Използвана литература

1. Кърпаров К., Кръстев М., Илчев Ст., Кисьов А., 2024, Актуализиран геотехнически доклад и модел на рудник „Асарел“, вътрешно фирмен доклад.
2. Rhinoceros – 7, 2016, Robert Mcneel & Associates
3. Afrouz, A, 1992, Practical handbook of rock mass classification systems and modes of ground failure, CRC Press
4. Hoek, E & Wood, D, 1992, Proc. ISRM Symp. On Rock Characterization, Chester, UK
5. Laubscher, D.H. 1977. Geomechanics classification of jointed rock masses – mining applications. Trans. Instn Min. Metall. 86, A1-8.
6. Laubscher, D.H. and Taylor, H.W. 1976. The importance of geomechanics classification of jointed rock masses in mining operations. In Exploration for rock engineering, (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 119-128. Cape Town: Balkema
7. Laubscher, D.M. and Page, C.H. 1990. The design of rock support in high stress or weak rock environments. Proc. 92nd Can. Inst. Min. Metall. AGM, Ottawa, Paper # 91
8. Priest, S & Hudson, J, 1976, Discontinuity spacing in rock, Int JRM and Geomechanics, 15 (5), pp. 135-148
9. Read J & Stacey P, 2009, Guide lines for open pit slope design, CRC press, Balkema
10. Bieniawski, T, 1989, Engineering Rock Mass Classifications. New York, Wiley
11. Bieniawski, T, 1976, Rock Mass Classification in Rock Engineering. Proceedings, Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, 97-106.