

KINEMATIC ANALYSIS FOR THE EVALUATION OF STRUCTURALLY CONTROLLED INSTABILITIES AT THE ELLATZITE OPEN PIT MINE

Nikola Toshkov, Zhelyazko Yalamov, Georgi Royalski, Lyubomir Svilenov

Mining Complex, Ellatzite-Med AD, 2180 Etropole; E-mail: n.toshkov@ellatzite-med.com, zh.yalamov@ellatzite-med.com, g.roylanski@ellatzite-med.com, l.svilenov@ellatzite-med.com

ABSTRACT. While mining is considered a major triggering factor for slope instabilities in open pit mines, discontinuities within the rock mass, such as faults, joints, and anisotropy, like schistosity, often pre-define the failure mechanism. Kinematic analysis is applied to evaluate the possible failure mechanisms based on spatial and strength characteristics of the discontinuity sets for actual or design pit configuration. Bench-berm and inter-ramp analysis of wedge and plane failure mechanisms is performed in the Ellatzite open pit mine on a single bench and stack of benches. The obtained results are validated by observed back-breaks and failure angles at the mine.

Key words: kinematic analysis; KATS, back-break, failure angle, Ellatzite open pit.

КИНЕМАТИЧЕН АНАЛИЗ ЗА ОЦЕНКА НА СТРУКТУРНО КОНТРОЛИРАНИ РАЗРУШЕНИЯ В РУДНИК „ЕЛАЦИТЕ“

Никола Тошков, Желязко Ялъмов, Георги Роялски, Любомир Свиленов

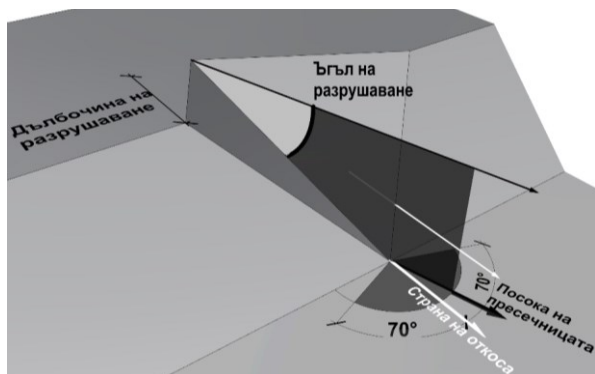
Рудодобивен комплекс, Елаците-мед АД, 2180 Етрополе

РЕЗЮМЕ. Докато минните дейности се считат за основна причина за предизвикването на разрушения на откосите в откритите рудници, прекъснатостите в скалния масив, като разломи, пукнатини и шистозност, често предопределят механизма на разрушаване. Кинематичният анализ оценява вероятността и големината на възможните структурни разрушавания за съществуваща и бъдеща минна конфигурация, чрез пространствените и якостни характеристики на прекъснатостите. В рудник „Елаците“ е извършен анализ на единично стъпало и пакет от стъпала за механизмите на плоско плъзгане и клиново разрушаване. Получените резултати за дълбочина на разрушаване на площадките и ъгълът на разрушаване са сравнени с наблюдаваните в рудника.

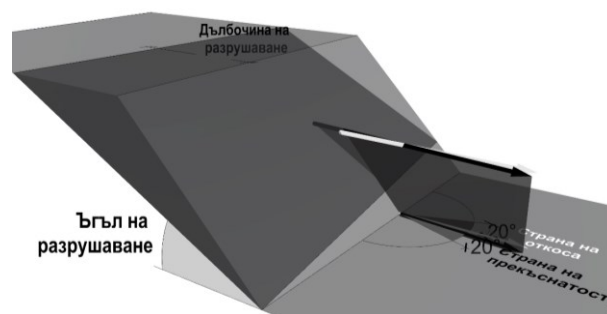
Ключови думи: кинематичен анализ; KATS, дълбочина на скъсване, ъгъл на разрушаване, рудник „Елаците“.

Въведение

В почти всеки открит рудник е имало или има разрушавания от различен мащаб, от откъсване на отделен скален блок до разрушаване на цял скален откос на минната изработка. Причините могат да бъдат както поради разрушаване на скалния масив, който се съпротивлява със своята якост, така и поради структурна предопределеност, когато механизмът на разрушаване бъде прекатурване, плоско или клиново плъзгане (Фигури 1 и 2). В този случай минната конфигурация може да бъде определена чрез кинематичен анализ, в които се използват пространствените и якостни характеристики на групите прекъснатости и геометричните особености на скалния откос (Goodman, 1989; Wyllie & Mah, 2004).



Фиг. 1 Дълбочина и ъгъл на разрушаване за клиново плъзгане. С бяла стрелка е показан векторът, описващ страната на откоса, а с тъмна – векторът, описващ посоката на пресечницата. Показан е ъгъл 70° в едната и другата страна от страната на откоса.



Фиг. 2 Дълбочина и ъгъл на разрушаване за плоско плъзгане. С бяла стрелка е показан векторът, описващ страната на откоса, а с тъмна – векторът, описващ страната на прекъснатостта. Показан е ъгъл 20° в едната и другата страна от страната на откоса.

Този анализ може да бъде детерминистичен, разглеждащ единичен случай, или вероятностен, който разглежда множество случаи според вероятностното разпределение на входните параметри на прекъснатостите и на скалния откос. При извършване на вероятностния анализ, освен средният коефициент на устойчивост за определен механизъм на разрушаване, се изчисляват и геометричните характеристики на потенциалните разрушения за конкретна вероятност. Софтуерът KATS е инструмент за извършване на автоматизиран кинематичен анализ за откоси, с помощта на който може да се оцени обемът, дълбочината на скъсване, ъгълът на разрушаване и дължината на разливане за единично стъпало и пакет от стъпала (User's Manual KATS, 2018). Такъв анализ е приложен в рудник „Елаците“ за намиране на структурно предопределени механизми на разрушаване в отделни негови сектори и лито-тектонски домейни. Чрез

пространствен анализ на геодезично заснетите постигнати долни и горни ръбове на скалните откоси, са определени дълбочината на скъсване и ъгълът на разрушаване. Получените резултати от кинематичния и пространствен анализ са сравнени. Направени са препоръки за оразмеряване на откоса. В допълнение, чрез детерминистични анализи на конкретни разрушения на единично стъпало и пакет от стъпала са калибрирани якостните параметри на прекъснатостите.

KATS и механизмите на плоско и клиново разрушаване

Докато за да възникне плоско плъзгане е нужно да има една прекъснатост или група от прекъснатости, то за клиново разрушаване са нужни минимум две такива, които да се пресичат в скалния масив. И за двата механизма, освен наличието на прекъснатости, е нужно да бъдат изпълнени допълнителни условия, за да възникне разрушение, като например плоскостта на плъзгане и пресечницата на двете прекъснатости да излизат на светлата част на откоса (Goodman, 1989). При плоското плъзгане наклонът на прекъснатостта трябва да бъде по-голям от силата на триене, която тя притежава, а страната към която затъва да не бъде с повече от 20° разлика от страната към която гледа скалният откос (Gómez & Silva, 2014). Възможността за изпълнение на тези условия са представени като независими вероятностни разпределения в KATS, а вероятността за възникване на плоско плъзгане се изчислява по Формула 1 (User’s Manual KATS, 2018).

$$P_{PF} = P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \quad (1)$$

където:

P_{PF} – вероятност за възникване на плоско плъзгане;

P_1 – вероятност за възникване на прекъснатостите;

P_2 – вероятността ъгълът между страната на откоса и прекъснатостта да е по-малък или равен на 20°;

P_3 – вероятността прекъснатостта да излезе на светлото сечение на откоса;

P_4 – вероятността ъгълът на вътрешно триене да бъде по-нисък от наклона на прекъснатостта, ако отсъства кохезия.

При клиновото плъзгане, освен споменатите условия, е нужно ъгълът между вектора, описващ пресечницата на двете прекъснатости и вектора, описващ страната към която гледа откос, да бъде по-малък от 70°. С помощта на генератор за случайни числа – „Latin Hyper Cube“, се генерират 10 000 случая от комбинацията на статистическите вероятностни нормални разпределения на геометричните характеристики на откоса и прекъснатостите. След което, всеки генериран случай се валидира кинематично според посочените по-горе условия и са изчислени следните 3 вероятности:

$$F_0 = \frac{\text{Брой кинематично валидни случаи}}{\text{Брой на генерираните случаи (10 000)}} \quad (2)$$

$$P_S = \frac{\text{Брой на неустойчивите клинове}}{\text{Брой кинематично валидни случаи}} \quad (3)$$

$$PF = F_0/P_S \quad (4)$$

където:

P_0 – кинематична вероятност за възникване;

P_S – вероятност за загуба на устойчивост;

PF – вероятност за клиново разрушаване.

За всеки от определените кинематично валидни случая е изчислен коефициентът на устойчивост по метода на граничното равновесие чрез двете класически формули (Goodman, 1989) съответно за клиново (Формула 5) и плоско плъзгане (Формула 6).

$$FoS = (\sin \beta / \sin 1/2 \varepsilon) \times (\tan \varphi / \tan \psi_i) \quad (5)$$

$$FoS = (\cos \psi_p \times \tan \varphi) / \sin \psi_p \quad (6)$$

където:

β – ъгъл между посоката на откоса и пресечницата на двете плоскости при клиново плъзгане;

ξ – половината от ъгъла, заключен между посоките на двете прекъснатости;

φ – ъгъл на вътрешно триене по плоскостите;

ψ_i – наклон на пресечницата за клиново плъзгане;

ψ_p – наклон на прекъснатостта при плоско плъзгане.

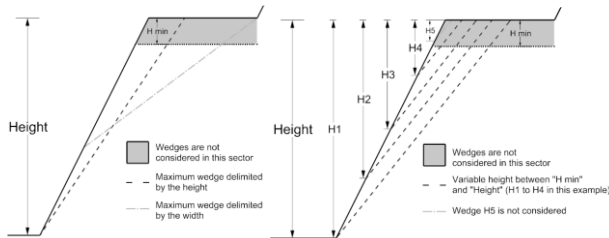
За да се провери конфигурацията на откоса, да се обобщат резултатите и да се изготвят препоръки за проектиране на борда срещу структурно контролирани разрушения, KATS се нуждае от определено ниво на допустимо разрушаване. В литературата са дадени различни препоръки, като в Read and Stacey, 2010, за единично стъпало, приемливото ниво на безопасност е вероятност от разрушаване под 25 % при коефициент на устойчивост 1.10, което с други думи означава, че стъпалото трябва да е толкова широко и откосът да е с такъв наклон, че в 75 % от случаите дълбочината на скъсване и радиусът на засипване да бъдат в рамките на стъпалото. За мащаба на пакет от стъпала, отделени чрез геотехническа берма, за откоси с висока важност за извършване на минните дейности, допустимо ниво е вероятността от разрушаване да е 10 % при коефициент на устойчивост 1.20. Резултатите от анализа са обобщени под формата на кумулативни вероятностни разпределения на елементите на разрушаване (обем, височина, дълбочина, ъгъл на разрушаване и дължина на разливане) с по-голяма вероятност и по-нисък коефициент от допустимите за отделните мащаби от конфигурацията на рудника.

Анализ на клиново и плоско плъзгане в рудник „Елаците“

Кинематичният анализ в рудник „Елаците“ е извършен към фактическо положение на рудника от 2021 г. за два мащаба на конфигурацията – единично стъпало и пакет от стъпала. При анализа на единично стъпало са използвани пространствените и якостни характеристики на групите пукнатини, а за пакет от стъпала – групи пукнатини, големите пукнатини и разломи.

За разлика от останалите входни параметри, височината на разрушаване няма нормално вероятностно разпределение. Тя зависи от точното място на пресичане между прекъснатостта при плоското плъзгане или пресечницата при клиновото разрушаване и откоса. Това може да се случи във всяко едно място от височината на откоса. Софтуерът разполага с две възможности за генериране на височината на всеки един от изчислителните 10 000 случая – височината на разрушаване да бъде

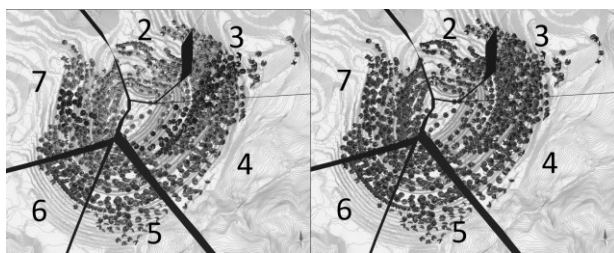
постоянна или варираща. При постоянна височина, генерираните разрушения са ограничени от максимална височина и широчина на единичното стъпало или пакета от стъпала. При варираща височина, вероятността плоскостта или пресечницата да пресекат откоса във всяка една точка от него е еднаква (Фиг. 3). И в двата случая могат да бъдат изключени много малки разрушения с височина, по-малка от приетата (User’s Manual KATS, 2018). В анализа направен в рудник „Елаците“ е използвана варираща височина на разрушаване и са изключени разрушения с височина по-малка от 3 m.



Фиг. 3 Генерирани разрушавания при фиксирана височина (вляво) и варираща – вдясно. И в двата случая могат да бъдат изключени разрушения с височина по-малка от минимално приетата (от User’s Manual KATS 2018).

Структурни домейни, кинематични сектори и база данни на прекъснатостите

За целите на анализа, за всички структурни измервания, съдържащи се в базата от данни с прекъснатостите в скалния масив от различен ранг и тип (Yalamov & Hadzieva, 2020), бяха създадени атрибутивни полета за лито-тектонски домейн и сектор от рудника към геометричното му състояние от м. септември, 2021 г. Това позволи допълнителна гъвкавост при аранжирането на данните за извършения статистически и стереографски анализ (Фиг. 4).



Фиг. 4. Пространствена позиция на измерванията за групи пукнатини. Вляво – оцветяване по лито-тектонски домейн. Вдясно - оцветяване по геометричен сектор на рудника.

Таблица 1. Пространствени характеристики на откоса за единично стъпало и пакет от стъпала за структурен домейн от гранодиорити GRD_101 в различните кинематични сектори, където той се разкрива.

Кинематичен сектор	Структурен домейн	Височина на стъпало / пакета от стъпала, m		Широчина на стъпало / пакета от стъпала, m		Ъгъл на стъпалото / междурампов ъгъл, °			Страна на откоса, °		
		Среден	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум	Средна	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум		
2	GRD 101	30 / 120	12 / 20	65 / 49.1	1.5 / 1.5	62 / 46.1	68 / 52.1	218.5	53.0	192.0	245.0
3	GRD 101	30 / 120	12 / 20	65 / 49.1	1.5 / 1.5	62 / 46.1	68 / 52.1	242.0	34.0	225.0	259.0
7	GRD 101	30 / 120	12 / 20	65 / 49.1	1.5 / 1.5	62 / 46.1	68 / 52.1	111.5	7.0	108.0	115.0

Определяне на пространствените и якостни характеристики на групите прекъснатости

Теренните структурни измервания с компас, разделени съответно на класове прекъснатости, кинематични сектори и структурни домейни са използвани в софтуера Dips за определяне на различните групи прекъснатости спрямо тяхната ориентация. В базата данни е създаден нов атрибут за съответната група и клас прекъснатост и са определени статистическото разпределение на техния наклон и посока. За всяка група пукнатини, големи пукнатини и разломи са определени относителните минимум и максимум (средната стойност съответно минус и плюс два пъти стандартното отклонение) на наклона и страната (Таблица 2).

Таблица 2. Пространствени характеристики на прекъснатостите от клас пукнатини за лито-тектонски домейн GRD_101 след групирването им в пукнатини системи чрез анализ в Dips.

Кинематичен сектор	Структурен домейн	Пукнатинна група	Наклон, °				Страна, °			
			Средно	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум	Средно	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум
2	GRD_101	JS1	78.1	24.1	30.0	90.0	186.7	24.2	138.3	235.2
2	GRD_101	JS2	37.6	9.9	17.8	57.5	182.8	58.8	65.1	300.4
2	GRD_101	JS3	79.2	22.2	34.7	90.0	272.2	22.4	227.3	317.1
2	GRD_101	JS4	78.8	19.6	39.6	90.0	242.4	9.5	223.5	261.3
2	GRD_101	JS5	28.8	12.2	4.5	53.2	346.3	38.9	268.5	64.1

Определянето на якостните параметри на прекъснатостите от клас пукнатини, използвани при анализа на единично стъпало, е извършено чрез програмата RocData по метода на Barton and Choubey за всеки лито-тектонски домейн. Данните, необходими за определяне на кохезията и ъгъла на вътрешно триене, са посочени в Таблица 3.

Таблица 3. Якостни параметри на пукнатини определени по метода на Barton and Choubey. JRC0, JCS0, JRCn и JCSn са съответно грапавост на пукнатина с дължина 0.1 m, якост на едноосов натиск на пукнатина с дължина 0.1 m, грапавина и якост на едноосов натиск на пукнатината с дължина равна на блоковете в масива (10m) за съответния литоложки тип скала.

Скален тип	JRC0	JCS0, MPa	Базов ъгъл на вътрешно триене, °	JRCn	JCSn, MPa	Кохезия, kPa		Ъгъл на вътрешно триене, °					
						Средно	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум	Средно	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум
GRD	8.0	97.3	31.0	3.8	32.2	9.5	5.0	0.0	19.5	37.3	2.0	33.3	41.3
HFS	7.0	60.0	27.0	3.7	22.8	8.4	5.0	0.0	18.4	33.6	2.5	28.6	38.6
MDP	8.0	89.0	29.0	3.8	29.1	9.0	5.0	0.0	19.0	35.1	1.5	32.1	38.1
SCH	6.0	27.0	26.0	3.5	11.8	7.5	5.0	0.0	17.5	30.3	2.0	26.3	34.3
PHY	6.0	17.0	26.0	3.5	7.4	7.2	5.0	0.0	17.2	29.6	2.0	25.6	33.6

За анализа на пакет от стъпала са използвани и прекъснатостите от клас големи пукнатини и разломи. Лабораторни изпитвания на тектонска глина са използвани за якостните параметри на разломите. Средният ъгъл на вътрешно триене е 23°, а кохезията – 32 kPa. При определянето на якостните параметри на групите пукнатини и големите пукнатини за мащаба на пакет от стъпала е използван методът на Jennings 1970, при който якостта на системата прекъснатости зависи от дължината ѝ и тази на скалния мост (Формули 7 и 8). Скалният мост има якост на

не нарушения масив, докато развитата прекъснатост – тази на пукнатините системи (Таблица 4).

$$c_{eq} = (1 - k) \times c + k \times c_i \quad (7)$$

$$\tan \varphi_{eq} = (1 - k) \times \tan \varphi + k \times \tan \varphi_i \quad (8)$$

където:

k – коефициент на продължителност – $k = \Sigma l_j / (\Sigma l_j + \Sigma l_r)$

c, c_j и c_{eq} – кохезия на скалния масив, пукнатините и системата прекъснатости;

φ, φ_j и φ_{eq} – ъгъл на вътрешно триене на скалния масив, пукнатините и системата прекъснатости;

l_r и l_j – дължина на скалния мост и прекъснатостта.

Таблица 4. Якостни параметри на групи от пукнатини и големи пукнатини за мащаба на пакет от стъпала.

GRD – гранодиорити; HFS- хорнфелзи; МДП – монцодиоритови порфирикти; SCH- шисти; PHU – филити.

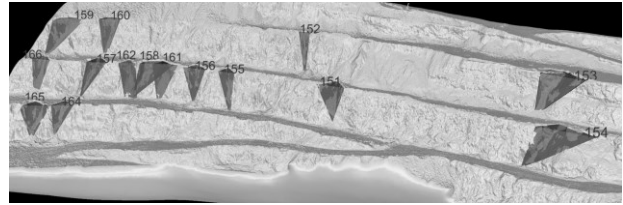
Скален тип	Якост на пукнатини		Якост на скалния масив		Съотношение между дължините на JMJ и скалния мост	Коефициент на продължителност (JMJ)	Еквивалентна кохезия за JMJ, kPa				Еквивалентен ъгъл на вътрешно триене JMJ, °			
	Кохезия, kPa	Ъгъл на вътрешно триене, °	Кохезия, kPa	Ъгъл на вътрешно триене, °			Средна	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум	Средна	Стандартно отклонение	Относителен минимум	Относителен максимум
GRD	9.5	37.3	527.6	59.4	1:1/3:1	0.50/0.75	269/139	67/35	134/70	403/209	48/43	5/4	39/34	58/51
HFS	8.4	33.6	344.2	51.7	1:1/3:1	0.50/0.75	176/92	44/23	88/46	264/139	43/38	4/4	34/30	51/46
MDP	9.0	35.1	468.7	55.9	2:1/3:1	0.75/0.75	124/124	31/31	62/62	186/186	40/40	4/4	32/32	48/48
SCH	7.5	30.3	95.4	39.2	1:1/3:1	0.67/0.75	37/29	9/7	18/15	55/44	33/32	3/3	27/26	40/39
PHU	7.2	29.6	58.4	30.3	1:1/3:1	0.75/0.75	20/20	5/5	10/10	30/30	30/30	3/3	24/24	36/36

Калибриране на якостните параметри по разрушения на единично стъпало

За калибриране на якостните параметри на пукнатините в монцодиоритовите порфирикти (MDP 123) в сектори 6 и 7 е използван ортофото модел, чрез който са извадени характеристиките на 14 клинови разрушения, на които детерминистично е изчислен коефициент на устойчивост в KATS, (Фиг. 5). Освен със средните якостни параметри, направени са и допълнителни изчисления с относителния минимум и максимум. Резултатите са посочени в Таблица 5, от която става ясно, че само един клин има устойчивост над 1.0 със средни и относително минимални якостни параметри, а с относителния максимум – 50 % от клиновете са с коефициент над 1.0.

Таблица 5. Резултат от детерминистичен анализ за калибриране на якостните параметри на пукнатините системи за кинематичен сектор 7 и структурен (литотектонски) домейн MDP_123

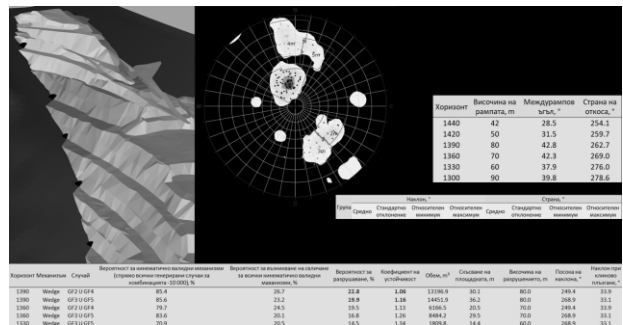
Структурното разрушение	Плоскост	Наклон, °	Срещна, °	Режим на разрушаването	Обем, m³	Съзавана площарата, m²	Височина на разрушаването, m	Характеристики на пресечниците		Коефициент на устойчивост		
								Наклон, °	Посока, °	Относителен минимум	Среден	Относителен максимум
151	1	60.3	153.2	По пресечниците	1457.6	12.0	26.8	93.0	41.3	0.83	0.89	1.03
	2	68.4	44.1									
152	1	69.3	144.7	По пресечниците	292.8	6.3	30.0	82.0	50.2	0.83	0.89	1.03
	2	60.4	34.9									
153	1	43.8	136.4	По пресечниците	2424.3	13.9	30.0	121.7	42.9	0.80	0.87	1.00
	2	69.5	51.6									
154	1	41.1	131.3	По плоскост 1	2624.7	12.5	27.8	146.9	40.0	0.77	0.83	0.96
	2	73.8	71.5									
155	1	69.3	142.7	По пресечниците	585.3	8.2	30.0	77.5	47.7	0.80	0.86	0.99
	2	52.9	44.1									
156	1	58.2	135.1	По пресечниците	1113.5	9.7	30.0	86.2	46.7	0.74	0.80	0.93
	2	51.4	54.2									
157	1	48.0	140.2	По пресечниците	1146.7	12.7	30.0	114.8	45.1	0.90	0.96	1.11
	2	83.8	31.1									
158	1	43.4	118.0	По пресечниците	2308.9	13.9	30.0	116.3	43.4	0.72	0.78	0.90
	2	85.1	31.3									
159	1	39.8	150.9	По пресечниците	1357.7	11.1	30.0	129.1	38.9	1.04	1.10	1.26
	2	72.4	54.0									
160	1	58.4	138.7	По пресечниците	800.2	9.3	30.0	96.2	50.0	0.74	0.80	0.92
	2	63.4	43.2									
161	1	57.4	153.3	По пресечниците	1351.8	13.2	30.0	105.7	46.7	0.90	0.96	1.11
	2	64.6	45.9									
164	1	47.5	128.3	По пресечниците	1440.7	11.9	30.0	97.5	42.9	0.87	0.93	1.07
	2	60.0	39.9									
165	1	50.0	112.0	По пресечниците	1245.3	8.9	28.0	82.2	45.9	0.71	0.77	0.88
	2	50.7	50.4									
166	1	60.9	141.8	По пресечниците	514.5	8.1	30.0	97.9	52.3	0.74	0.80	0.92
	2	68.8	37.7									



Фиг. 5. Ортофото модел на клинове в сектор 7 на рудника. Пространствените характеристики на прекъснатостите изграждащи всеки клин са измерени и използване при изчисление на коефициента на устойчивост. Номерацията на всеки клин е както в Таблица 5.

Калибриране на якостните параметри по разрушение на пакет от стъпала

Якостните параметри по метода на Jennings за групите пукнатини и големи пукнатини са използвани при анализ на структурно контролирано разрушение на пакет от стъпала. Разрушението възниква над разлом „Полегат североизток“, когато минните дейности достигат долния ръб на стъпало с кота 1390. Поради това, анализът е направен с данни за прекъснатости в домейн SCH 201, който се намира над разлома, а геометрията на откоса е измерена към всяка точка на пресичане на разлома с долния ръб на хоризонтите от 1300 до 1440 (Фиг. 6). Анализът показва, че при изкопаването на хоризонти 1440 и 1420 няма вероятност от разрушаване, но вероятността от клиново разрушаване на хоризонт 1390 е най-висока (22.8 %), а коефициентът на устойчивост е 1.06. Коефициентът на устойчивост е по-висок от граничния, тъй като използваните якостни параметри за скалния мост са за не изветряла скала, докато скалите и прекъснатостите на хоризонт 1420 са засегнати от изветрителни процеси поради близостта си до естествения терен.



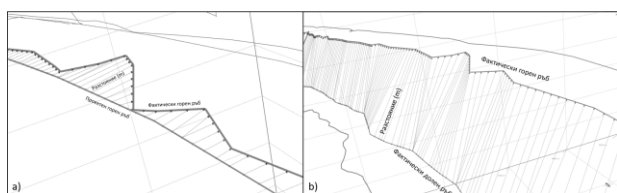
Фиг. 6. Конфигурация на откоса над разлом „Полегат североизток“. Определените системи от прекъснатости за анализа са показани на стереографска проекция в средата, а входните данни за ориентацията на откоса към всеки хоризонт, както и на групите прекъснатости са посочени вдясно. В таблицата най-долу са посочени резултатите и коефициентът на устойчивост към всеки хоризонт.

Количествена оценка на дълбочина на разрушаване на бермата (backbreak) и ъгъл на разрушаване на единичен откос (failure angle) към фактическа конфигурация на рудника.

За прилагане и валидиране на кинематичния анализ беше извършена количествена оценка за разрушената част

от проектните берми и постигнатите ъгли на единични откоси. Оценката се базира на пространствен анализ на проектни горни ръбове на откосите и маркшайдерски заснети фактически горни и долни ръбове на откосите. На тримерните геометрични линии, описващи ръбовете е извършено погъстяване (генериране) на възли през 2.0 m, със запазване на съществуващите характерни точки от тях. Процедурите по погъстяване на точките, измерване на разстоянията, запазването им като атрибутивни стойности и трансферът на атрибутивни данни между отделните пространствени заявки са извършени в среда на софтуера MOVE.

Оценката за **дълбочината на разрушаване на площадките (backbreak)** е извършена чрез пространствена заявка за селекция на най-близките възли от фактическия горен ръб по отношение на възлите от проектния горен ръб (Фиг.7а). Измерените разстояния между възлите са съхранени като стойности в новосъздаден атрибут на линията с фактически горен ръб.



Фиг. 7. Пространствен анализ на фактически и проектни ръбове на рудника: а). оценка на разрушение в бермата между проектен и постигнат горен ръб; б). Измерване на разстояние между възлите на постигнат долен и горен ръб на рудника за определяне на ъгъла на единичен откос.

За оценката на **фактическите ъгли на единични откоси** са анализирани линиите за фактически долен и горен ръб на откоса. Във възлите на анализирания долен ръб е създаден атрибут „**Z_toe**“, съдържащ котата на съответната точка. След това е извършена пространствена заявка за селекция на най-близките възли от фактическия горен ръб по отношение на анализирания долен ръб (Фиг. 7b). Разстоянията между отделните възли на двете линии са съхранени като нов атрибут за разстояние във възлите на линията за горен ръб. Освен измерените разстояния, при пространствената селекция е направен и трансфер (миграция) на атрибута „**Z_toe**“, от линията за долен ръб в линията за фактически горен ръб. Фактическите ъгли на единичен откос са изчислени в атрибутивния калкулатор на софтуера по Формула 9.

$$Slope_angle = deg \left(\arcsin \left(\frac{Z - Z_{toe}}{Nearest_vertex_distance} \right) \right) \quad (9)$$

където:

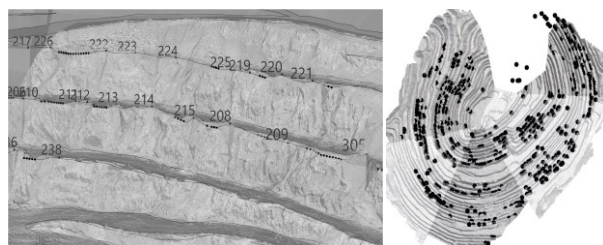
„**Slope_angle**“ – ъгъл на откоса;

„**Z**“ – „**Z_toe**“ – височина на откоса;

„**Nearest_vertex_distance**“ – тримерно разстояние между най-близките възли от двете линии.

Резултатът от извършения пространствен анализ са близо 24 000 точки в пространството за отработените хоризонти на рудника с атрибутивни данни за всяка от тях, включващи: дълбочина на разрушаване на площадките, постигнати ъгли на единични откоси, лито-тектонски домейн и сектор от рудника.

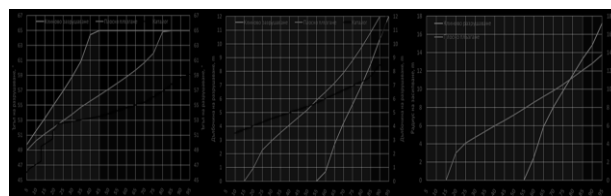
По информацията за дълбочина на разрушаване в точките от фактическия горен ръб, е извършен последователен анализ за намиране на тези с максимум или най-голяма дълбочина на разрушаване. Намерени са 479 броя разрушения, които са обединени в каталог и с тях са построени вероятностни разпределения, които са използвани за сравнение с тези изчислени от KATS (Фиг. 8). Изключена от анализа е информацията за точките на разстояние 5 m от точката, в която се достига максимум. Информацията в точките извън обхвата на разрушение е използвана за намиране на постигнатите ъгли, които не са засегнати от структурни разрушения.



Фиг. 8. Вляво е показан ортофото модел и заснетите горни и долни ръбове. Местата на структурните разрушения от каталога са обозначени с точка и поредния номер, а тези без разрушения с поредица от точки. В дясно са показани всички точки с установени структурни разрушения използвани в каталога.

Обсъждане на резултатите между извършения кинематичен и пространствен анализ

Построени са вероятностни кумулативни криви за ъгъла и дълбочината на разрушаване и за дължината на засипване за тези кинематични сектори и структурни домейни, които не отговарят на критериите за обезпеченост. Върху кривите са наложените и получените от пространствения анализ данни. Пример за сектор 7 в структурен домейн MDP_123 е показан на Фигура 9, от която се вижда, че за 85 % обезпеченост, структурният домейн трябва да има единични площадки с ширина не по-малки от 11 m, а ъгълът на откоса при плоско плъзгане при 65° има желаната обезпеченост, но при клиновото плъзгане тя е 45%. Пространствените данни от друга страна показват, че допустимата обезпеченост за широчината на площадката и ъгълът на откоса е изпълнена.



Фиг. 9. Њгъл и дълбочина на разрушаване и радиус на засипване за MDP 123 в сектор 7. С тъмна линия на първата и втора графика са илюстрирани данните от пространствения анализ на фактическо положение, а с другите две данните от KATS за клиново и плоско разрушаване, като по-светлата е за клиново. По хоризонталната ос е кумулативното разпределение в проценти.

Литература

- Gómez, P., & Silva, R. (2014). A Kinematic Analysis Tool for Slopes (KATS). *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure SBMR 2014 – ISRM Specialized Conference*, 09–13.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Jennings, J. E. (1970). A Mathematical Theory for the Calculation of the Stability of slopes in Open Cast mines. *Planning of Open Pit Mines*, 87–102.
- Read, J., & Stacey, P. (Eds.). (2010). *Guidelines for open pit slope design*. CSIRO Publ.
- User's Manual KATS. (2018). *User's Manual KATS*. Itasca Chile SpA.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining, 4th Edition*.
- Yalamov, Z., & Hadzieva, N. (2020). Adopted Approaches and Practices During the Structural-Geological Investigation of the Rock Mass in Ellatzite Open Pit Mine, for the Purpose of Numerical Modelin and Mine Design. *Proceedings of the IX International Geomechanical Conference 7-11 September 2020, Varna, Bulgaria*.