

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ СЪЮЗ ПО МИННО ДЕЛО, ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL UNION OF MINING, GEOLOGY AND METALLURGY
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОЮЗ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ, ГЕОЛОГИИ И МЕТАЛЛУРГИИ



PROCEEDINGS

of the

XII INTERNATIONAL GEOMECHANICS CONFERENCE

7 – 11 September 2026
Astor Garden Hotel, Sts. Constantine and Helena
Varna, Bulgaria

Proceedings of the XII INTERNATIONAL GEOMECHANICS CONFERENCE



**7 – 11 September 2026
Varna, Bulgaria**

EDITORIAL BOARD

**Prof. DSc Nikolay Nikolaev, Prof. Dr. Krastyo Dermendzhiev,
MSc Eng. Tzvetan Dilov, Prof. Dr. Chavdar Kolev,
Assoc. Prof. Dr. Nikolay Milev, Prof. Dr. Georgi Mihaylov,
Assoc. Prof. Dr. Veliko Parushev, M.Sc. Eng. Georgi Petrov,
Dr. Eng. Maria Topalska, Prof. Dr. Andrey Totsev**

**SCIENTIFIC AND TECHNICAL UNION OF MINING, GEOLOGY AND METALLURGY
2026, Bulgaria**

ISSN: 1314-6467

GOLDEN SPONSOR

GEOTECHMIN GROUP



SILVER SPONSOR





***Dear Ladies and Gentlemen,
Dear Colleagues,
Dear Guests,***

I am pleased on behalf of the Organizing Committee to congratulate the participants in the **XII International Geomechanics Conference**.

This year's edition of the conference is the twelfth, and the conference has been held for more than 27 years, which proves the authority and significance of this scientific forum. The theme of the conference this year is **"Geomechanics in a Changing Engineering Environment"**.

The conference topics include the entire spectrum of fundamental issues related to the physical and mechanical properties of rocks and soils, the stress-strain state of rock massifs and soils, measurements in geomechanics and remote methods, stability assessment, blasting and seismic impacts, dynamic manifestations of rock pressure, ecology and environmental protection, and artificial intelligence. This actual thematic topics provoked your interest again and we suggest to your attention these scientific papers, presented on the conference.

I would like to express my sincere gratitude to the Golden Sponsor Geotechmin Group - Geotechmin OOD, Ellatzite-Med AD, Geotrading AD, Geostroy AD and Silver Sponsor - Assarel Medet AD.

The discussion of research results during the conference will provide opportunities for the application of geomechanical methods related to the development and use of underground space in the mining industry, construction, industrial and public buildings, transport facilities, and others.

We look forward to meeting you at the **XIII International Geomechanics Conference!**

Be healthy and good luck!

**Assoc. Prof. Dr. Eng. Kremena Dedelyanova
Chairperson of the Organizing Committee**



АСАРЕЛ МЕДЕТ - АД

МИННО-ОБОГАТИТЕЛЕН КОМПЛЕКС - ГР. ПАНАГЮРИЩЕ



МИННО-ОБОГАТИТЕЛЕН КОМПЛЕКС

„Асарел-Медет“ АД

4500 Панагюрище, България

e-mail: pbox@asarel.com

www.asarel.com





С иновации и опит, ръка за ръка, градим заедно бъдещето

ГЕОСТРОЙ
ГРУПА ГЕОТЕХМИН

Инфраструктурно

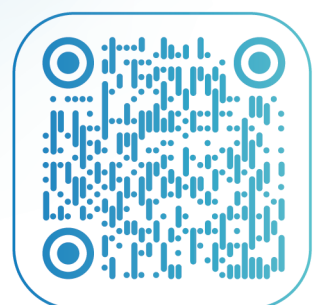
Промислено

Гражданско строителство



THE
PARTNER
YOU
CAN **RELY ON**

Reliable Supply Chain Solutions
for Mining Industry



УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ - СТАНДАРТ ЗА КАЧЕСТВЕН ЖИВОТ



ЕЛАЦИТЕ МЕД

ГРУПА ГЕОТЕХМИН



УПРАВЛЕНИЕ

с. Мурково 2086, Тел: (02) 923 77 21,
e-mail: office@ellatzite-med.com

РУДОДОБИВЕН КОМПЛЕКС

гр. Етрополе 2180, Тел: (02) 923 76 72,
e-mail: mine.complex@ellatzite-med.com

ОБОГАТИТЕЛЕН КОМПЛЕКС

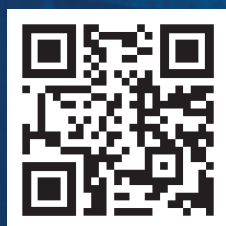
с. Мурково 2086, Тел: (02) 923 77 29,
e-mail: flotation.complex@ellatzite-med.com





140
ГОДИНИ

ФЕДЕРАЦИЯ
НА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИТЕ
СЪЮЗИ В БЪЛГАРИЯ



CONTENTS

	Topic A	1
	Physical and mechanical properties of rocks and soils	
	Физико-механични свойства на скали и почви	
<u>A-1</u>	PHYSICAL - MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SECONDARY QUARTZITES FROM THE LOCALITY "CRN VRV" AS A MATERIAL FOR ROAD TAMPON	3
	Blagica Doneva, Gorgi Dimov, Radmila Karanakova Stefanovska	
	Topic B	9
	Stress and strain state of rock massifs and soils. Interaction between massifs and structures	
	Напрегнато и деформирано състояние на скален масив и почви.	
	Взаимодействие между масива и конструкциите	
<u>B-1</u>	ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФРИКЦИОННИ АНКЕРИ ТИП „СПЛИТ СЕТ- Н“ В УСЛОВИЯТА НА РУДНИК „МИЛИН КАМЪК“	11
	Г. Стоянчев, Кр. Дерменджиев, Ир. Михайлова	
<u>B-2</u>	ДЕФОРМАЦИОНЕН ПРЕХОД ПРИ ЗОНИРАНО ЛОКАЛНО ПОДОБРЯВАНЕ НА ЗЕМНАТА ОСНОВА С КОРАВИ ВКЛЮЧЕНИЯ: БЪЛГАРСКИ ПРИМЕР ОТ ПРАКТИКАТА	17
	Цветан Лозанов, Николай Милев	
<u>B-3</u>	УТОЧНЕНИЕ НА ГЕОМЕХАНИЧНАТА ТЕОРИЯ ЗА ЕКСТРЕМНИ ДЪЛБОЧИНИ	27
	Николай Жечев, Рафаил Рафаилов	
	Topic C	35
	Measurements in geomechanics. Contact and remote methods. Monitoring	
	Измервания в геомеханиката. Контактни и дистанционни методи.	
	Мониторинг	
<u>C-1</u>	MODERN GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF SOILS	37
	Wojciech Sas	
<u>C-2</u>	ПРИЛОЖЕНИЕ НА ДИСТАНЦИОННО ГЕОТЕХНИЧЕСКО КАРТИРАНЕ ЧРЕЗ UAV-БАЗИРАНА ФОТОГРАМЕТРИЯ В РУДНИК ЕЛАЦИТЕ	44
	Iv. Vasilev	
<u>C-3</u>	ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРИ НАЗЕМНОТО ЛАЗЕРНО СКАНИРАНЕ В ПОДЗЕМНОТО МИННО СТРОИТЕЛСТВО И ПРАКТИЧЕСКИ ПОДХОДИ ЗА ТЯХНОТО ПРЕОДОЛЯВАНЕ	52
	Марко Марков	
<u>C-4</u>	ANALYSIS OF OUTLIER DETECTION METHODS IN RTK-GNSS DEFORMATION MONITORING	57
	Roumen A. Ivanov, Nevena I. Babunska-Ivanova	
<u>C-5</u>	ГЕОТЕХНИЧЕСКИ И КОНСТРУКТИВЕН МОНИТОРИНГ В ПОДЗЕМНОТО ГРАДСКО СТРОИТЕЛСТВО	63
	Борислав Борисов	

Topic D

73

Stability assessment. Dynamic impacts. Manifestations of rock pressure. Probabilistic approach. Hazard and risk in geomechanics. Artificial intelligence

Оценка на устойчивото състояние. Динамични въздействия. Прояви на скалния натиск. Вероятностен подход. Опасност и риск в геомеханиката. Изкуствен интелект

- D-1 MACHINE LEARNING-BASED PREDICTION OF PERMEABILITY IN ANTHROPOGENIC AGGREGATES: TOWARDS SIMPLIFIED ENGINEERING MODELS** 75
Justyna Dzięcioł
- D-2 IMPACT OF EXTREME RAINFALL RISKS ON OPENCAST MINES PLANNED DEWATERING AND SLOPE STABILITY** 83
Pavlovic N., Petrovic B., Subaranovic T., Pavlovic V.
- D-3 FORECASTING THE MANIFESTATIONS OF ROCK PRESSURE IN COAL-BEARING MASSIFS BASED ON CHANGES IN GAS MIXTURE PARAMETERS** 90
Nataliia Vergelska, Victoriia Vergelska
- D-4 ENGINEERING-GEOLOGICAL ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE FINAL SLOPES IN MARL MINES** 93
Radmila Karanakova Stefanovska, Zoran Panov, Risto Popovski, Blagica Doneva
- D-5 АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА „ПВР“ В ОТКРИТ РУДНИК „ЕЛАЦИТЕ“ ЗА ОГРАНИЧАВАНЕ НА ПРЕХВЪРЛЯНЕТО НА ВЗРИВЕНА СКАЛНА МАСА КЪМ ПО-ДОЛНИ РАБОТНИ ХОРИЗОНТИ** 101
Радослав Асенов
- D-6 ГЕОМЕХАНИЧНА СЪЩНОСТ НА БАРИЕРНИТЕ ЦЕЛИЦИ И ПОДХОДИ ЗА ТЯХНОТО ОРАЗМЕРЯВАНЕ** 110
Георги Михайлов
- D-7 APPLICATIONS OF NEURAL NETWORKS TO SLOPE STABILITY PREDICTION** 125
Kremena Arsova, Dimitar Kaykov
- D-8 ХВОСТОХРАНИЛИЩАТА В БЪЛГАРИЯ: ИСТОРИЧЕСКО РАЗВИТИЕ, ТЕХНОЛОГИИ НА ИЗГРАЖДАНЕ И ЗНАЧЕНИЕ НА СТРУКТУРАТА НА ХВОСТА ЗА ОЦЕНКАТА НА ВТЕЧНЯВАНЕТО** 132
Момчил Бояджиев, Николай Милев
- D-9 ГЕОМЕХАНИКАТА – ОСНОВА ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ, ОСНОВА ПРИ ИЗБОРА В ПАРАМЕТРИТЕ НА СИСТЕМИТЕ НА РАЗРАБОТВАНЕ, ОСНОВА ПРИ ОСИГУРЯВАНЕ НА ДЪЛГОВРЕМЕННА УСТОЙЧИВОСТ НА ИЗЗЕТИТЕ ПРОСТРАНСТВА, ОСНОВА НА ПОДЗЕМНИЯ ДОБИВ НА ПРИРОДНИ РЕСУРСИ** 143
Георги Дачев

Topic E

151

Environmental protection. Sustainable development. Geotechnical aspects of cultural heritage

Опазване на околната среда. Устойчиво развитие. Геотехнически аспекти на културното наследство

<u>E-1</u>	CARBON FUNCTIONS OF PEATLAND GEOSYSTEMS IN THE NORTH-WESTERN REGION OF UKRAINE: A REGIONAL ASSESSMENT IN THE CONTEXT OF EUROPEAN EVIDENCE	153
	Andrii Pokshevnytskyi	
<u>E-2</u>	ЕКСПЕРИМЕНТ ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА ОБЕМА НА МЕЛНИЧЕН ОСТАТЪК ПОДАВАН ЗА ПОВТОРНО СМИЛАНЕ	157
	Цветан Дилов, Иванина Сергеева	
<u>E-3</u>	ЕТИЧНИ ПОСЛАНИЯ ЗА ЧОВЕШКОТО ПОВЕДЕНИЕ В УСЛОВИЯТА НА ОБЩЕСТВЕНИЯ И ДИГИТАЛНИЯ ПРЕХОД	163
	Веселина Александрова, Ваня Тагарева, Виолета Василева	
<u>E-4</u>	ПОЛИТИКАТА ЗА ЗДРАВЕ, БЕЗОПАСНОСТ И ОКОЛНА СРЕДА	172
	Владислав Стойков	



TOPIC A

Physical and mechanical properties of rocks and soils

Физико-механични свойства на скали и почви

PHYSICAL - MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SECONDARY QUARTZITES FROM THE LOCALITY "CRN VRV" AS A MATERIAL FOR ROAD TAMPON

Blagica Doneva¹, Gorgi Dimov¹, Radmila Karanakova Stefanovska¹

¹Goce Delcev University, Faculty of natural and technical sciences, Stip, blagica.doneva@ugd.edu.mk

ABSTRACT

The paper presents the physical and mechanical characteristics of secondary quartzites from the "Crn Vrv" locality, which is located southwest of Kratovo, in the Kratovo-Zletovo volcanic area, Republic of North Macedonia.

Secondary quartzites or silexes are a product of hydrothermal alterations in rocks of intermediate composition (andesites, andesitic tuffs and breccias).

The examination of the physical and mechanical characteristics of the material, its chemical composition, as well as special analyses of the crushed material, showed that the material can be used in construction as a tampon material for roads and also as an aggregate for mineral mixtures of concrete.

Keywords: Quartzites, tampon material, physical and mechanical characteristics, chemical composition.

Introduction

Within the volcanic rock complex, in the Kratovo-Zletovo volcanic area, in NE Macedonia, several localities are known in which significant masses of strongly silicified rocks are encountered, extending from the extreme NW part of this area: near the village of Beljakovci, Sopsko Rudari, and across the hills: Borovik, Cmi Vrv, Plavica and Ozren, to the village of Tursko Rudari and Spancevo, in its extreme SE part. In addition to the aforementioned, strongly silicified rocks are also present in other localities in this area, but there they occur in smaller concentrations and with lower intensity.

Although these rocks were formed as a result of hydrothermal silicification /in a broader sense/, they are not uniform, they differ significantly from each other, both in terms of composition and in terms of physical and mechanical characteristics. Specific and particularly favorable chemical, mineralogical-petrographic and physical and mechanical characteristics are possessed by the siliceous hydrothermal rocks in the central part of the Kratovo-Zletovo volcanic area /in the vicinity of Kratovo/, especially on the Plavica and Cmi Vrv mountains. The Plavica and Crn Vrv mountains represent the extreme western parts of the Osogovo massif, and are located about 7 km SE (Crn Vrv) and 3 km south (Plavica) of Kratovo, and at a distance of about 5 km from each other.

In the geological literature, these rocks are known under several different names, such as: silex, secondary quartzites, metasomatic quartzites, orthoquartzites, hydrothermal quartzites - hydroquartzites, alumoquartzites, monoquartzites, kazakhites, secondary alumoquartzites, etc. In our geological literature, these rocks are most often referred to as "secondary quartzites". This term refers to the products of hydrothermal alterations of the rocks in the volcanic apparatuses, which are formed in the stage of calming down of volcanic activity and which are naturally found in the complex characterized by the constant presence of quartz (partially chalcedony and opal) and a certain amount of impurities from other minerals. However, in our professional, especially commercial terminology, this specific mineral raw material has been known for a long time under the name - silex.

. Secondary quartzites (silex) as mineral raw material have large uses in ceramic and similar industries for coating grinding mills, in abrasive industry for production of flint – paper, as "sand" for cutting decorative stones, as material for making containers for aggressive chemicals, in electrical – chemical industry for obtaining ferro – silica or silica metal. For all these products can be used only high quality silexes which beside favorable chemical composition should have favorable physical – mechanical properties, and such are those in the "Crni Vrv" deposit, which have been exploited for several decades.

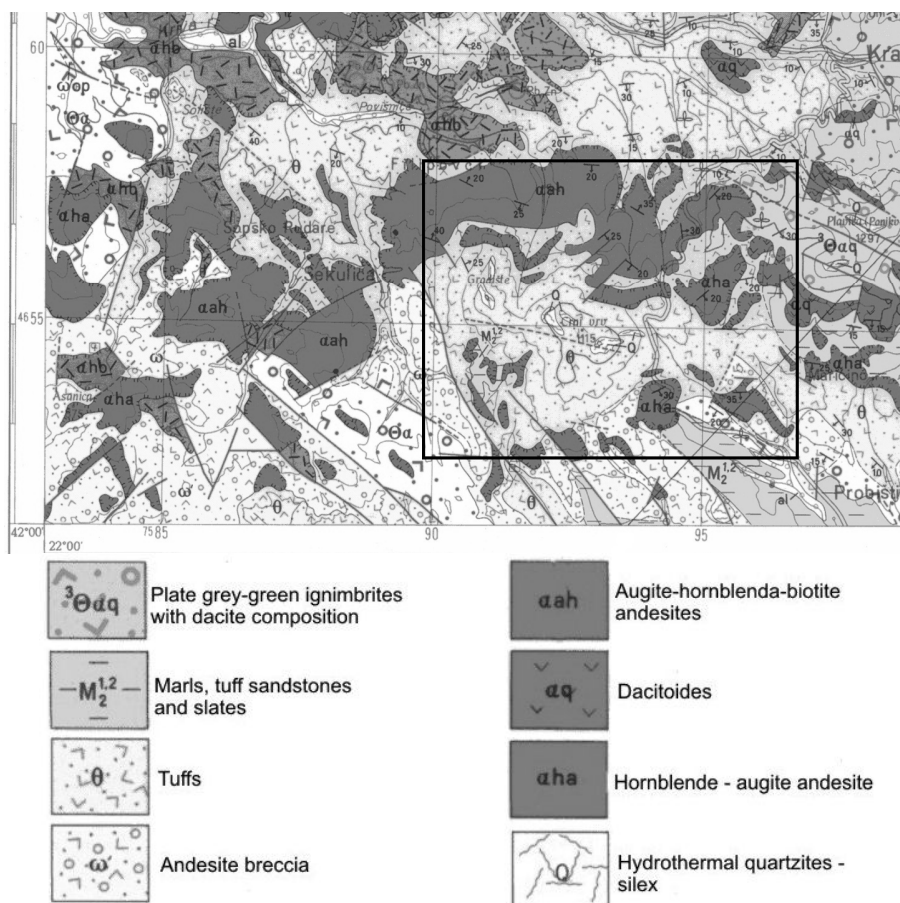


Fig. 2: Geological map of the vicinity of the investigated area [1, 2]

Geological features of the deposit

The area of the central part of the Kratovo - Zletovo volcanic area, in which the "Crni Vrv" deposit is located, is composed of a complex of volcanic, subvolcanic and volcanogenic-sedimentary formations, the composition of which corresponds to a granodioritic magma, or its equivalents - dacites and andesites.

The petrographic composition of the rocks represented here is quite heterogeneous, considering that here occur rocks with a composition close to rhyolites (quartzlatites) and those with a composition close to basalts (andesite – basalts), so we could speak of an association: rhyolite – dacite – andesite - basalt, with numerous, often unclear transitions between them, going from the most acidic to the most basic representatives, or vice versa. Here, it is possible to distinguish three phases of the formation of the volcanics: the first phase includes amphibole - biotite and pyroxene - biotite acito - andesites; the second phase is subvolcanic hardened sanidine dacites (quartzlatite) and on the third, last phase occurred outcrops of labradorite - augite andesites (andesite basalts).

Pyroclastic rocks are formed, for the most part, in the first phase, but their formation continues until the final phase of volcanic formation.

Volcanism in the central part of the Kratovo-Zletovo region was predominantly submarine and sublacustrine and intense over a relatively long geological period (from the Middle Oligocene to the beginning of the Quaternary), which is evidenced, among other things, by the great thickness of the volcanic complex of the rocks. The occasional phases of subsidence of volcanic activity correspond to the deposition of volcanogenic-sedimentary formations. The thickness of the volcanic complex of the rocks, i.e. the depth at which their crystalline or plutonic foundation is found, has not yet been determined by the research work carried out so far, but it is certain that in this part of the Kratovo-Zletovo volcanic region it exceeds 1,000 m.

Secondary quartzites occur in andesitic-dacite rocks along a fault line that has a regional character. It

extends in the direction NW - SE starting from Kumanovo through Crni Vrv, Plavica - Zatica, Pleshinci to Probishtip. Along these fault structures, siliceous components were deposited from hydrothermal solutions that underwent intensive metasomatic changes in the surrounding volcanic rocks, forming large masses of silicified rocks. In the area of the deposit itself, the fracture systems occur as ring-shaped forms where the hydrothermal-metasomatic processes are most pronounced. In addition to dacite-andesitic rocks, andesitic tuffs and breccias are found that have undergone a lower degree of silicification or are not silicified at all.

Secondary quartzites occur at the surface and, with small interruptions, can be traced over 2 km. Their thickness is quite variable and ranges from 20 – 80 m, and gradually decreases with depth (fig. 3).

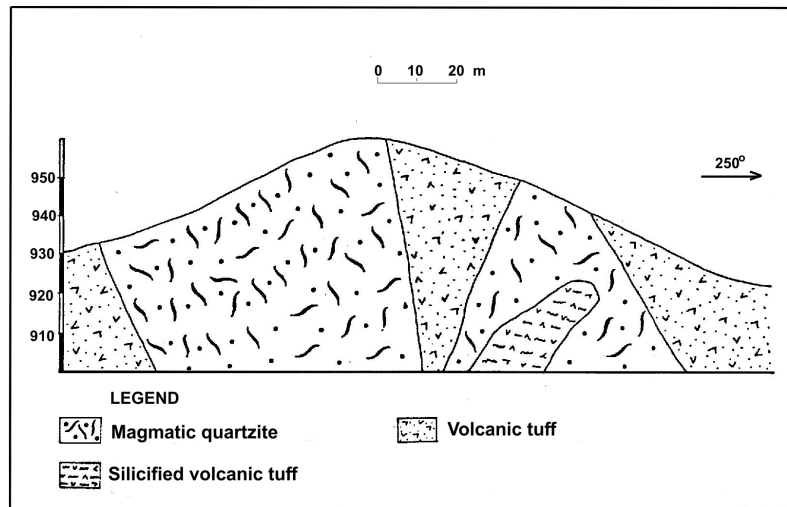


Fig. 3. Geological profile of the deposit "Crni Vrv" [3]

The genesis of secondary quartzite from "Crni Vrv" is closely related to the hydrothermal changes of rocks of intermediate composition, in volcanic apparatuses and their immediate surroundings. Their formation begins after the paroxysmal activity of the volcanic apparatus, i.e. in the fumarolic - solfatar stage. The fumarolic-solfatar alterations take place not only along the cracks, but especially along the horizons of the porous products of the eruptions, which can be spread over several hundred meters from these apparatuses [3, 4].

Accordingly, secondary quartzites are metasomatic formations that formed, basically, without the introduction of SiO_2 , from the magma (also Al_2O_3 , TiO_2 , K_2O and Fe), which indicates that only the redeposition of these components and their transfer to the location of the action of gas hydrothermal solutions. Only water, S, F, Cl, P, B and heavy metals (except Fe) were brought. This is evidenced by the preserved relict structures and textures of the original rocks in them, as well as their spatial position. Namely, the siliceous ore bodies have a subvertical distribution, and their dimensions gradually decrease with depth. Data from deep exploration drillings show that their roots are found at a depth of over 400 m, when they gradually emerge. Their borders towards the surrounding volcanic rocks are most often gradual, i.e. the degree of silicification of the surrounding rocks gradually decreases with distance from the pure siliceous masses (with over 95 % SiO_2).

Mineralogical, petrographical and chemical composition of quartzites

The secondary quartzite ore bodies of Crni Vrv are made of amorphous to microcrystalline silica mass, sometimes with some opal. Their color is light gray to slightly blue, and when brecciated, reddish. These are dense, very hard and tough rocks, very difficult to process, resistant to impact and abrasion, with low porosity and high resistance to the action of aggressive chemicals. They have a regularly high content of silicate minerals (which significantly distinguishes them from other types of secondary quartzites) and a tolerant content of harmful components. An "average sample" of quality quartzite from the "Crni Vrv" deposit has the

following chemical composition (%) [3]:

Table 1. Chemical composition of quartzites

SiO₂	98.23	MgO	0.025
TiO₂	0.20	CaO	0.15
Al₂O₃	0.35	Na₂O	0.008
Fe₂O₃	0.32	K₂O	0.10
FeO	0.15	P₂O₅	Traces
MnO	traces	Loss of ignition	0.47

Physical - mechanical parameters of quartzite

The physical – mechanical properties of quartzite are determined with several laboratory examinations on tampon quartzite material with grain size from 0 to 31.5 mm.

Table 2 shows the results obtained from the geomechanical examinations: [5]

Table 2. Physical - mechanical characteristics of quartzite

Test	Results	Criterion
Grain shape (% mass)	14.54	(max) 40 %
Dilapidated grains	1.09	(max) 7 %
Content of clay and silt particles (% mass)	1.64	(max) 5 %
Sensitivity on ice influence (content of particles < 0.02 mm)	2.11 (F1)	/
Consistency on ice Na ₂ SO ₄ (loss of mass)	grains < 8 mm – 3.9 % grains > 8 mm – 3.5 %	grains < 8 mm to 10 % grains > 8 mm to 12 %
Optimal water content / Maximum volume mass – Proctor test (modified method)	$\gamma_{dmax} = 2.06 \text{ g/cm}^3$ $W_{opt} = 5.7 \%$	/
Granular composition	There is no deviation from the boundary belt for the tampon material	Boundary belt for the tampon material
Degree of unevenness	34.0	(min) 15.0
Abrasion loss value by Los Angeles method (% mass)	21.8	(max) 40 %
California bearing ratio (CBR) %	81.4	(min) 80 %
Determined organic matters	0.81	(max) 5 %
Hardness after Moss	7	
Compressive Strength (MPa)	150-300	
Compressive Strength (MPa)	150-300	
Compressive Strength (MPa)	150-300	
Porosity	3.56 %	
Specific mass	2.63 – 2.70 t/m ³	
Volume mass	2.51 - 2.64 t/m ³	

Conclusion

The investigations conducted on the secondary quartzites (silexes) from the "Crn Vrv" locality confirmed that this material possesses highly favorable physical, mechanical, and chemical characteristics for application in road construction. The geological and mineralogical analyses indicate that these hydrothermally altered



quartzites are characterized by a very high silica content (98.23% SiO_2), low porosity, high hardness, and excellent resistance to mechanical wear and weathering.

The laboratory test results demonstrate that all examined parameters satisfy the prescribed requirements for road tampon materials. The aggregate exhibits a suitable grain shape, very low content of clay and deleterious particles, excellent resistance to frost action and abrasion, high California Bearing Ratio (CBR), and appropriate compaction characteristics. Furthermore, the granulometric composition falls within the required limits for road base construction.

The obtained results confirm that the secondary quartzites from the "Crn Vrv" deposit represent a high-quality construction material suitable for use as road tampon material and, owing to their favorable properties, also as aggregate for concrete mineral mixtures. Their utilization provides a reliable and durable source of construction aggregate while promoting the efficient exploitation of domestic mineral resources. Consequently, the "Crn Vrv" quartzites represent a valuable raw material with significant technical and economic potential for infrastructure development in North Macedonia.

References

1. Hristov S. et al. (1963 - 1968). Basic geological map of the Republic of Macedonia - sheet Kratovo 1 : 100 000
2. Hristov S. et al. (1969). Interpreter of Basic geological map of the Republic of Macedonia - sheet Kratovo 1 : 100 000;
3. Blazev, K. et al. (2009). Mining project for exploitation of Quartzite from the Kratovo – Zletovo area, Probishtip
4. Panov, Z. (2011). Rock mechanics. University textbook. Stip
5. Geing – Krebs und Kiefer (2017). Report from examinations of geomechanical characteristics of quartzite – 0/31.5 mm for evaluation for its use as tampon



TOPIC B

Stress and strain state of rock massifs and soils. Interaction between massifs and structures

Напрегнато и деформирано състояние на скален масив и почви. Взаимодействие между масива и конструкциите

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФРИКЦИОННИ АНКЕРИ ТИП „СПЛИТ СЕТ- Н“
В УСЛОВИЯТА НА РУДНИК „МИЛИН КАМЪК“**

Г. Стоянчев, e-mail: g.stoyanchev@mail.bg
Кр. Дерменджиев, e-mail: knderm45@gmail.com
Ир. Михайлова, e-mail: i_mihailova@mail.bg

РЕЗЮМЕ

Рудник „Милин камък“ е новостроящ се обект. В неговият проект са заложили модерни решения за прокарване на капитални и спомагателни изработки с анкерен крепеж. Заложени са решения с използване на различни типове анкери, които трябва да бъдат изследвани за работоспособност. Към момента обект на прилагане и изследване са фрикционни анкери с различна дължина и диаметър. В докладът са представени методиката на изследване и резултати от проведените опити. От анализа на резултатите се констатира, че този тип анкери притежават добра работоспособност, изразена чрез носеща способност и податливост.

ABSTRACT

The Milin Kamak mine is a newly constructed site. Its design includes modern solutions for driving capital and auxiliary works with anchor fasteners. Solutions using different types of anchors are included, which must be tested for operability. At the moment, the object of application and research are friction anchors of different lengths and diameters. The report presents the research methodology and results of the experiments. The analysis of the results shows that this type of anchors has good operability, expressed in terms of load-bearing capacity and yielding.

Увод

Рудник „Милин Камък“ се намира в землището на гр. Брезник. Проектиран е за добив и преработка на златосъдържаща руда. Разработването ще се извършва по подземен начин. Разкриването на рудничното поле ще се извърши с две наклонени шахти ситуирани на две различни площадки. За вентилационни цели се предвижда капитален комин и вертикална шахта. Рудничното поле е разделено на два хоризонта, бремсбергов и уклон. Подготовката е скална с разделяне на хоризонтите на етажи, отработвани последователно отдолу нагоре. В рамките на етажа, рудничното поле по разпространение се разделя на блокове подготвяни с слоеви травербани – достъпи. Етажите ще се отработват със слоеве последователно отдолу нагоре със сухо запълване.

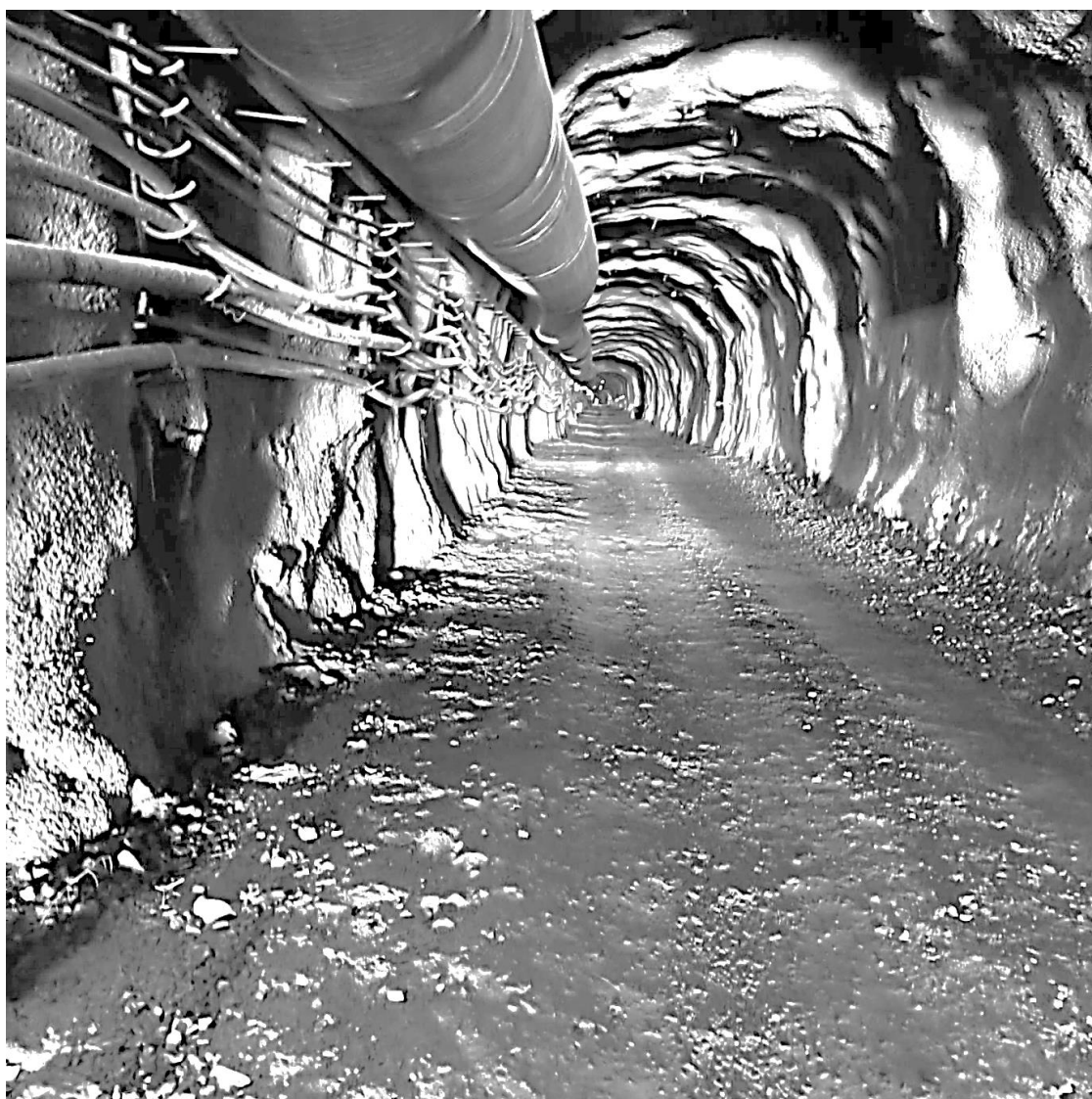
В зависимост от местоположението си подготвителните изработки са с различен размер на напречното сечение и ще се закрепват с комбиниран анкерен крепеж. Технологията на прокарване на изработките е механизирани: изкопаване-отбиване с пробивно взривни работи /ПВР/ ; машинно пробиване на взривните дупки; натоварване и извозване на минната маса с товарачни машини; анкериране с използване на пробивна карета; поставяне на метална минна мрежа и последващо торкретиране, сн.1

Местоположение на изследваните анкери

Изследваните анкери са разположени на стъпката на главна наклонена шахта „Бърдо“, която е обект на прокарване, фиг.1. Анкерите са монтирани в часта от минната изработка, закрепена с два типоразмера анкери с дължина 1.8 и 2.4m., арматурна мрежа и торкрет бетон. Местоположението на анкерите , предмет на измерването е показано на фиг.1 /Кроки/.

Анкерите са предварително монтирани и тяхното местоположение е посочено от геомеханика на рудника. Общият брой на тези анкери е 9. По брой и дължина на анкера и диаметър на анкерната дупка те са както следва:

- 3 бр. с дължина 1.8m, монтирани в анкерна дупка пробита с корона 43mm;



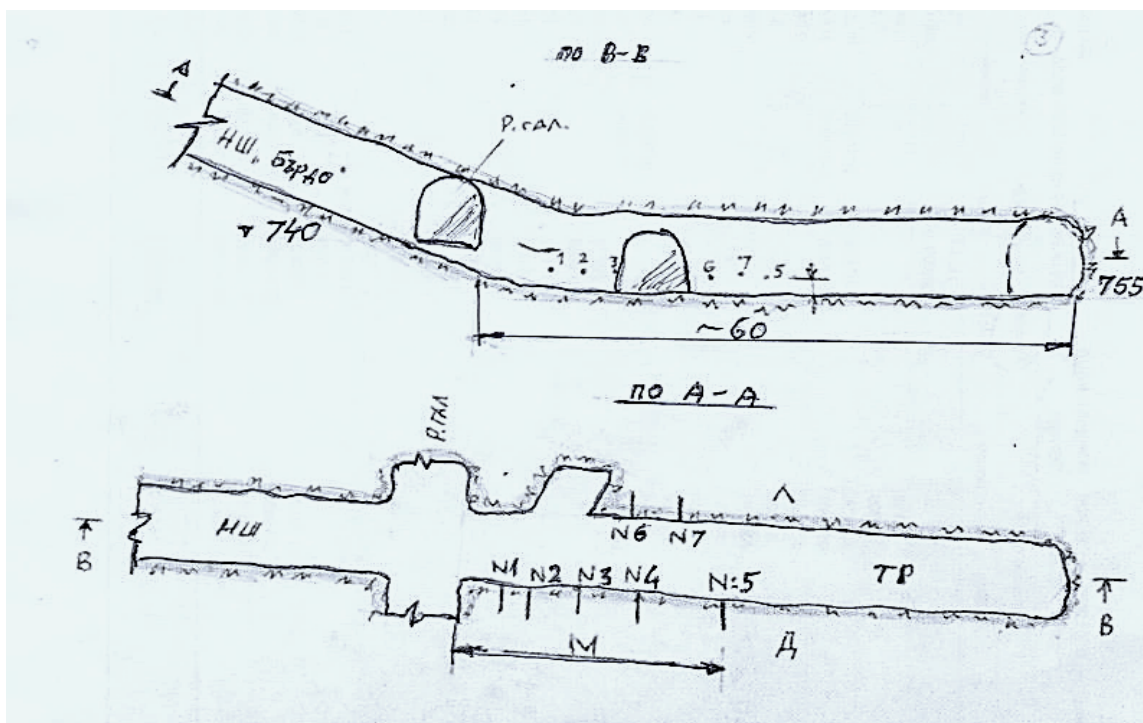
сн.1

- 3 бр. с дължина 1.8m, монтирани в анкерна дупка пробита с корона 41mm;
- 3 бр. анкери с дължина 2.4m, монтирани в анкерна дупка пробита с корона 41mm;

При изследването се установи, че по два броя анкери, съответно с дължини 1,8 и 2,4m са с компроментирани краища и не може да бъдат изтеглени. От останалите 5 броя анкери са разположени: 3 анкера от дясната и 2 броя от лявата страна на изработката.

Всички анкери с изключение на №5 бяха донабити с 10-20cm преди измерването. В резултат, на което определената носеща способност на анкерите трябва да се смята като монтажна.

Вместващите скали, в които са монтирани анкерите представляват андезитобазалтови брекчи със серицитизация. Същите са с висока степен на нарушеност и сравнително ниска устойчивост. Тези условия могат да се смятат като средни по якост, с якост на едноосов натиск 25-35 MPa.



фиг.1

Апаратура и методика на изследване

Използваната апаратура за изследването на носещата способност на анкерите е собственост на фирма „РОКЩАЛ-Н“ ЕООД и е тарирана с измервателни средства на фирма BIMCO с точност на отчитане 20kg, сн.2.

Носещата способност на анкерите се определя чрез упражняване на изтеглящо усилие по оста на анкера, P , t/kN/ и същевременно се измерва приплъзването на анкера – преместване U , mm.

При последователно увеличаване на изтеглящото усилие се регистрират съответните натоварвания и приплъзвания. Това нарастване продължава до стойност на максимално усилие, при което настъпва рязко спадане на натоварването до определена стойност- регистрира се като носеща способност на анкера. При опитите за по-нататъчно нарастване на натоварването се достига отново максималното усилие и се реализира приплъзване.

Нарастването на носещата способност на анкерите продължава във времето. След няколко месеца постоянната носеща способност се очаква да бъде по-висока с 0.5 до 1 t. Предстоят измервания за уточняването ѝ.

Резултати от измерванията

Резултатите от изследването на анкерите по описаната методика за определяне на изтеглящото усилие P и приплъзванията U са представени в таблици в 7 броя таблици, една от тях е показана като таблица №1. Графиките за поведението на анкерите в координатна система натоварване-преместване са представени на фиг.2, 3 и 4.

В таблиците с резултатите от измерванията на анкерите са използвани следните съкращения:

$L = 1.8$ m означава анкер с дължина 1.8m;

P – Текуща стойност на силата на изтегляне на анкера, t;

U – Движението на задната част на изтеглящия цилиндър спрямо неподвижното му тяло, mm;

ΔU – Промяна на положението на изтеглящия цилиндър с нарастване на изтеглящата сила, mm.

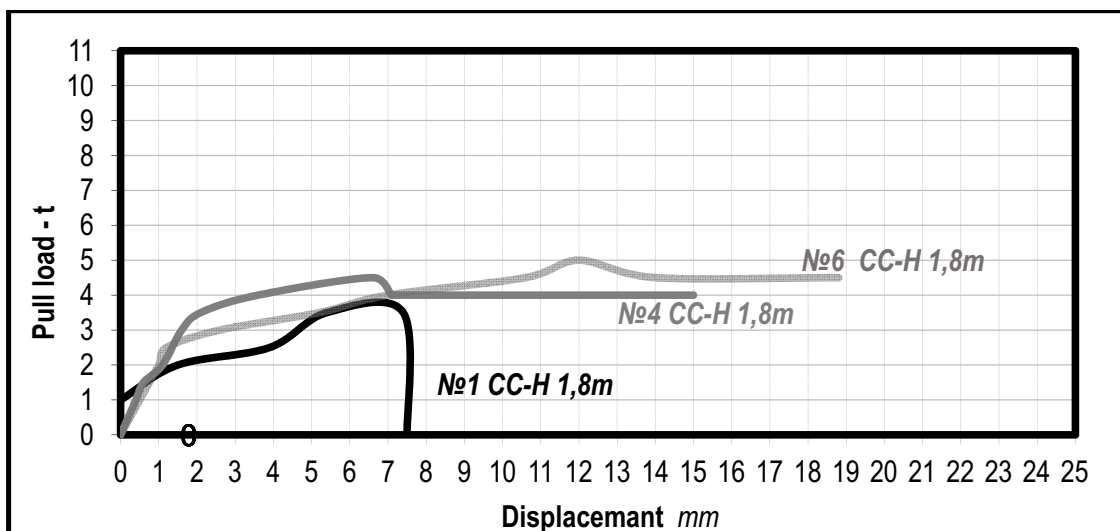


сн.2

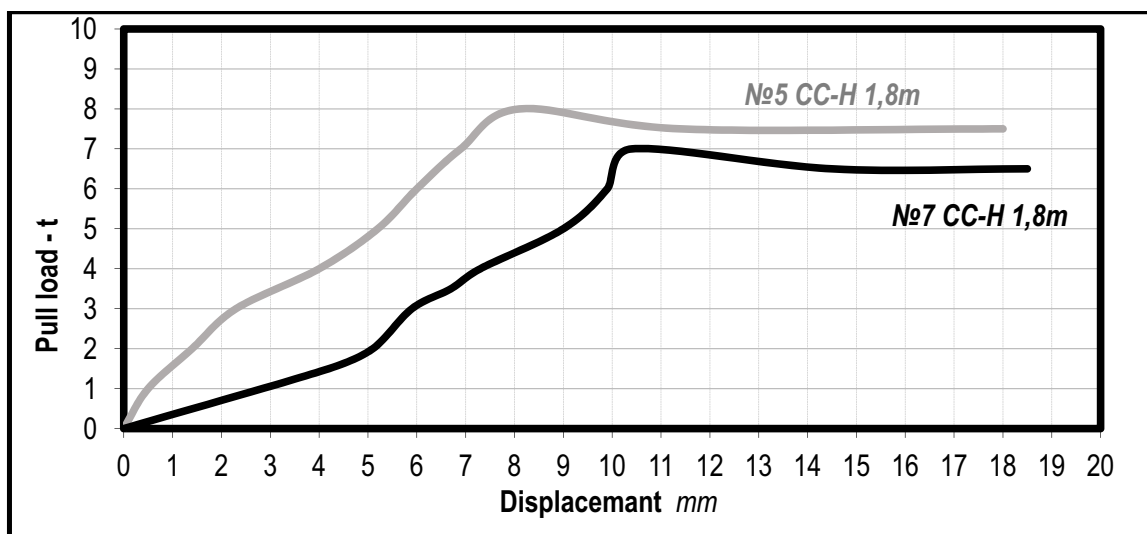
Таблица №1

Анкер №1 L=1.8m, анкерната дупка пробита с корона Ф43mm. Разстояние от повърхността до мястото за монтаж на анкера е 419m, от дясната страна. Хоризонтално монтиран на 1.6m височина от пода.											
№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>P</i>	0	1	2	2.5	3.5	3.5	3.7	-	-	-	
<i>U</i>	8.6	10.1	12.5	14.0	16.0	16.10					
ΔU	0	1.50	3.90	5.40	7.40	7.50					

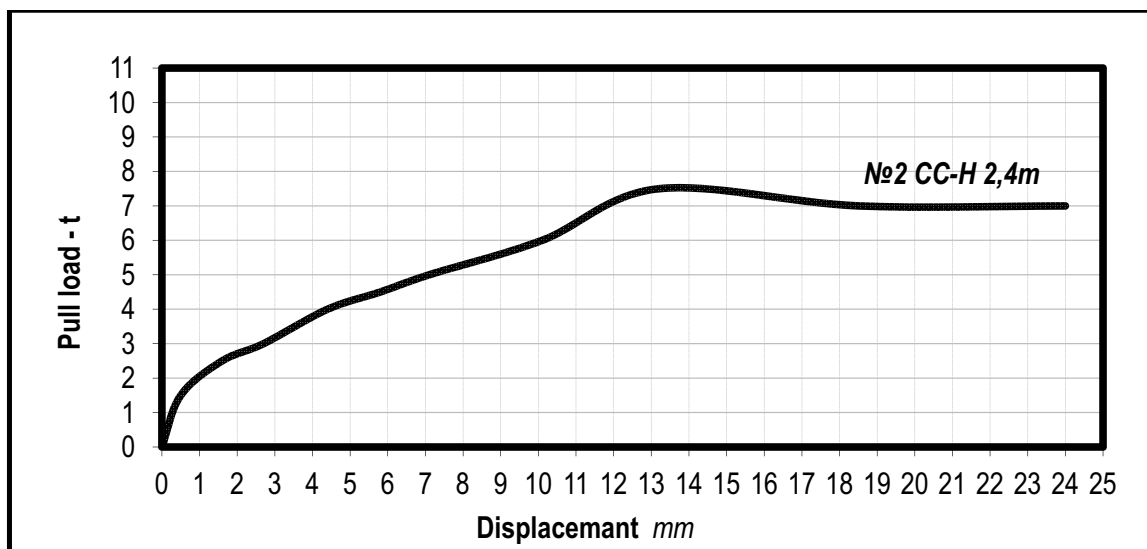
При товар 3.70 t , пръстена на анкера се скъсва и изследването е прекратено.
Масивът, в който е монтиран анкер №1 е андезитобазалтова брекча със серицитизация.
По същия начин са представени и данните при измерването на другите анкери



фиг.2



фиг.3



фиг.4

Анализ на резултатите от измерването

Определената постоянна носеща способност за анкери с № 1; 2; 4; 6 и 7 може да се смята като първоначална, тъй като независимо от това, че анкерите бяха монтирани по-рано, същите бяха донабити на 26.03.2025г. с 10-20см.

За анкер №5 може да се приеме, че носещата способност е нараснала във времето, тъй като същия не е донабиван.

Носещите способности на анкерите монтирани в дупка пробита с корона $\Phi 41\text{mm}$ показват по-високи стойности.

Анкери с дължина 1.8m и диаметър на анкерната дупка, пробита с коронка 41mm показват висока носеща способност с 1.5 - 2 t от аналогичния анкер, монтиран в отвор пробит с коронка 43mm, фиг2 и фиг.3.

За анкер с дължина 2.4m, монтиран в отвор пробит с корона 41mm, показаните резултати са типични за този тип анкер, фиг.4. Не зависимо, че е измерен само 1 анкер, препоръчваме същия тип анкери да се монтират в дупка, пробита с коронка 41mm.

Препоръчваме най-долния ред анкери, разположени в стената на изработката да бъде винаги монтиран със задигане към масива. Това би позволило осушаване (изтичане на вода), ако има такава, без да се предизвиква отслабване на масива, поради преовлажняване.

Получените резултати от измерването на анкерите са в пряка зависимост от диаметъра на отвора на анкерната дупка и физикомеханичните свойства на масива - андезитобазалтова брекча със серицитизация. При прокарването на минни изработки, в които е настъпила хидротермална промяна – аргилитизация (глинеста промяна с намаляване на коефициента на триене стомана-масив) се очаква да се намали носещата способност на анкера.

Препоръчваме практически да се измерят какви диаметри на анкерната дупка се получават след пробиване с различни коронки (39; 41 и 43) в различните видове скали.

Заклучение

От направените измервания, може да се направи извода, че постигнатите носещи способности на използваните фрикционните анкери Сплит сет-Н в условията на рудник „Милин камък“, гр. Брезник са добри и ще осигурят устойчивостта на минните изработки.

Литература

1. ДЕРМЕНДЖИЕВ, Кр. и др. Изчисляване на носещата способност на фрикционни анкери в условията на р-к „Бабино“. / Кр. Дерменджиев, Г. Стоянчев. // Сб.докл. от международна конференция по геомеханика, Несебър, 11-15 юни, 2007, с. 56-61.
2. ДЕРМЕНДЖИЕВ, Кр. Изследване на параметрите и възможностите на тръбен анкер с хидравлично разпъване// Технологии и практики при подземен добив и минно строителство: Сб. докл. от IV-ра Нац. научно-техническа конф. Девин, 23-26.09. 2014, с121-126.
3. СТОЯНЧЕВ, Г., Г.Дачев, Кр. Дерменджиев. Изследване на поведението и носещата способност на прътов анкер в условията на мина „Кошава“, „Гипс“ АД. Сб. Докл.от IX Международна конференция по Геомеханика.7–11 септември,2020, Варна, България, с.289–294.
4. СТОЯНЧЕВ, Г., Кр. Дерменджиев. Доклад от проведени измервания на монтажната носеща способност на фрикционни анкери тип Сплит сет-Н в условията на рудник „Милин камък“, гр.Брезник, Перник, 26.3.2025

ДЕФОРМАЦИОНЕН ПРЕХОД ПРИ ЗОНИРАНО ЛОКАЛНО ПОДОБРЯВАНЕ НА ЗЕМНАТА ОСНОВА С КОРАВИ ВКЛЮЧЕНИЯ: БЪЛГАРСКИ ПРИМЕР ОТ ПРАКТИКАТА

Цветан Лозанов¹ и Николай Милев²

¹ Докторант – Катедра „Геотехника“, Университет по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ), бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, България, tsvetan.iv.lozanov@gmail.com

² Доцент – Катедра „Геотехника“, Университет по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ), бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, България, milev_fte@uacg.bg

РЕЗЮМЕ

При широкоплощни логистични сгради локалното разпространение на силно деформируеми почви може да наложи частично, а не „пълно“ подобряване на земната основа под цялата сграда. В този случай проектният проблем не се изчерпва с намаляване на максималното слягане в слабата зона, а включва и ограничаване на деформационния контраст към околната естествена основа. Настоящият доклад разглежда логистичен комплекс в района на с. Гурмазово, при който част от сградата попада върху прахови и прахово-глинести пластове с ниска коравина и значителна деформируемост. За подобряване на земната основа са изпълнени неармирани бетонни корави включения с диаметър 320 mm, разположени в зони с различен растер от 1.80x1.80 m до 2.60x2.60 m, и разпределящ слой от уплътнен трошен камък. Подобрената зона е представена в пространствен изчислителен модел чрез еквивалентни деформационни характеристики, като е отчетен плавен преход към неподобрената земна основа. Изчисленото максимално слягане е намалено от 174 mm при нетретирана основа до 71 mm след подобряването. Приетото зонироване намалява максималното слягане и осигурява постепенно изменение на коравината към естествената земна основа.

Ключови думи: корави включения, подобряване на земната основа, зонировано подобряване, преходна зона, слягане под фундаменти, завъртане на фундаменти, относително слягане

DEFORMATION TRANSITION IN LOCALIZED ZONED GROUND IMPROVEMENT WITH RIGID INCLUSIONS: A BULGARIAN CASE STUDY

Tsvetan Lozanov¹ and Nikolay Milev²

¹ PhD Student – Department of Geotechnics, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1 Hristo Smirnenski Blvd., Sofia 1046, Bulgaria; tsvetan.iv.lozanov@gmail.com

² Associate Professor – Department of Geotechnics, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1 Hristo Smirnenski Blvd., Sofia 1046, Bulgaria; milev_fte@uacg.bg

ABSTRACT

For large-footprint logistics buildings, the local occurrence of highly deformable soils may require partial rather than full-area ground improvement beneath the entire structure. In such cases, the design problem is not limited to reducing the maximum settlement within the weak-soil zone, but also includes controlling the deformation contrast with the surrounding natural ground. This paper presents a logistics complex near Gurmazovo, Bulgaria, where part of the building is underlain by silty and silty-clayey strata characterized by low stiffness and high deformability. The ground improvement solution consists of unreinforced concrete rigid inclusions with a diameter of 320 mm, installed in zones with varying grid spacings from 1.80x1.80 m to 2.60x2.60 m, together with a compacted crushed-stone load transfer layer. The improved zone is represented in a three-dimensional numerical model using equivalent deformation properties, with a gradual transition towards the unimproved ground. The calculated maximum settlement is reduced from 174 mm for the untreated ground to 71 mm after

improvement. The adopted zoning reduces the maximum settlement and provides a gradual change in stiffness towards the unimproved ground.

Key words: rigid inclusions, ground improvement, zoned ground improvement, transition zone, foundation settlement, foundation rotation, differential settlement

ВЪВЕДЕНИЕ

При големи по площ сгради локалното разпространение на силно деформируеми почви поставя специфична проектна задача: подобряването под цялата конструкция може да бъде неоправдано, а рязката граница между подобрена и естествена основа може да предизвика неблагоприятни относителни слягания и завъртания на фундаменти. Проектното решение трябва да ограничи както максималните слягания, така и деформационния контраст между отделните зони [1, 2, 6, 9, 11].

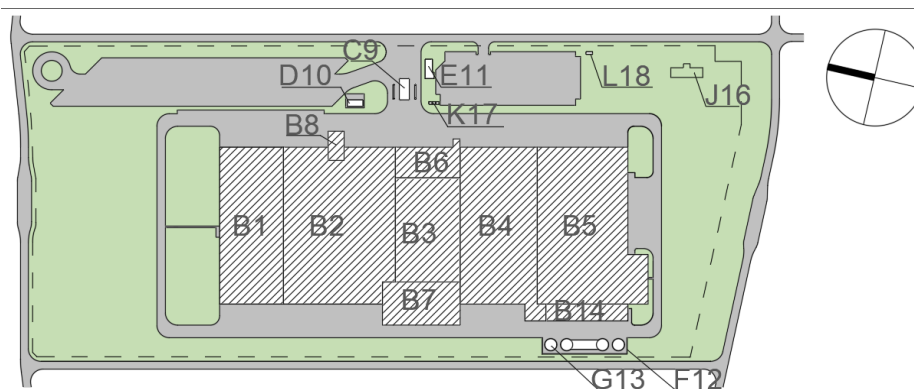
Коравите включения работят съвместно с почвата като композитна основа, без пряка конструктивна връзка с фундаменти, като натоварването се преразпределя чрез разпределящ слой от добре уплътнена трошена скална маса [1, 3, 6]. Това позволява растерът им да бъде изменян съобразно геотехническите условия и натоварванията.

Докладът разглежда логистична база в землището на с. Гурмазово, община Божурище, със сглобяема стоманобетонна връхна конструкция и единични чашковидни фундаменти. В част от площадката са установени прахови и прахово-глинести пластове с относително ниска коравина и значителна деформируемост. За проблемната зона е разработено локално зонирано подобряване с неармирани бетонни корави включения (т. нар. „rigid inclusions“). В предходно изследване за същия комплекс са разгледани алтернативни решения с дълбочинно почвено смесване и каменни колони, като е отчетено влиянието на етапността на строителството върху сляганията [8].

Чрез пространствен модел с еквивалентни деформационни характеристики е сравнено поведението на нетретирания и подобрената основа, с акцент върху максималното слягане и прехода към естествената земна основа. Локалната носимоспособност на отделните включения и отрицателното триене не са предмет на настоящата разработка.

ПРОЕКТНИ ПРЕДПОСТАВКИ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИ УСЛОВИЯ

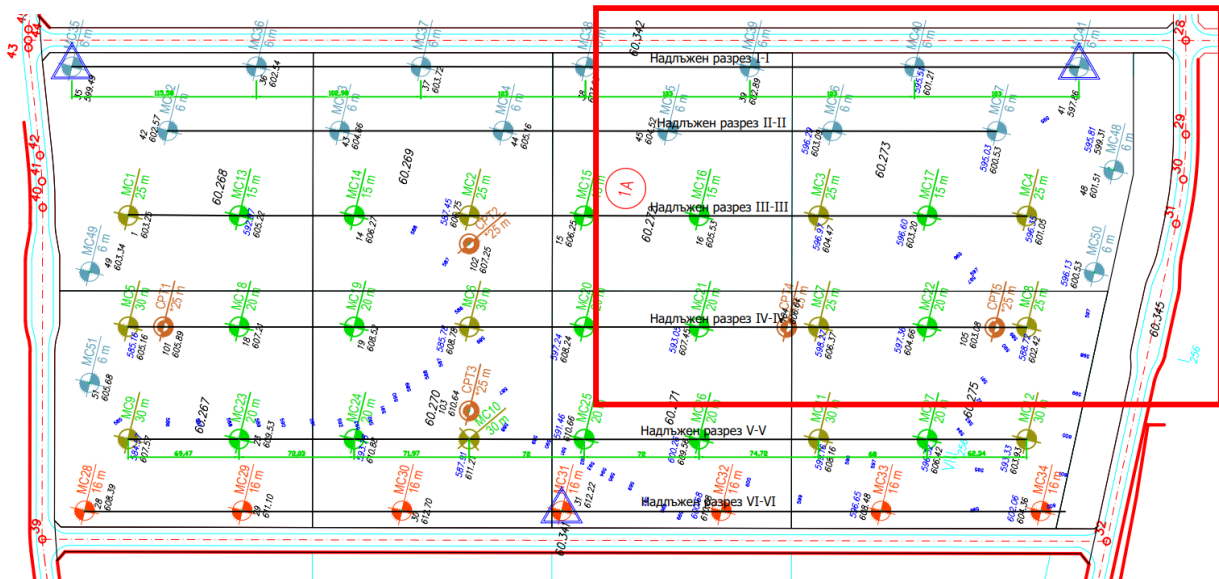
Разглежданият комплекс е проектиран като сглобяема стоманобетонна конструкция със система от прости греди, ставно свързани с колоните. Колоните са замонолитени в единични чашковидни фундаменти с размери, определени от натоварването и положението им в конструкцията. Подобряване с корави включения е предвидено както под фундаменти, така и под настилната на товарната зала. Общото ситуационно разпределение на комплекса е показано на Фигура 1.



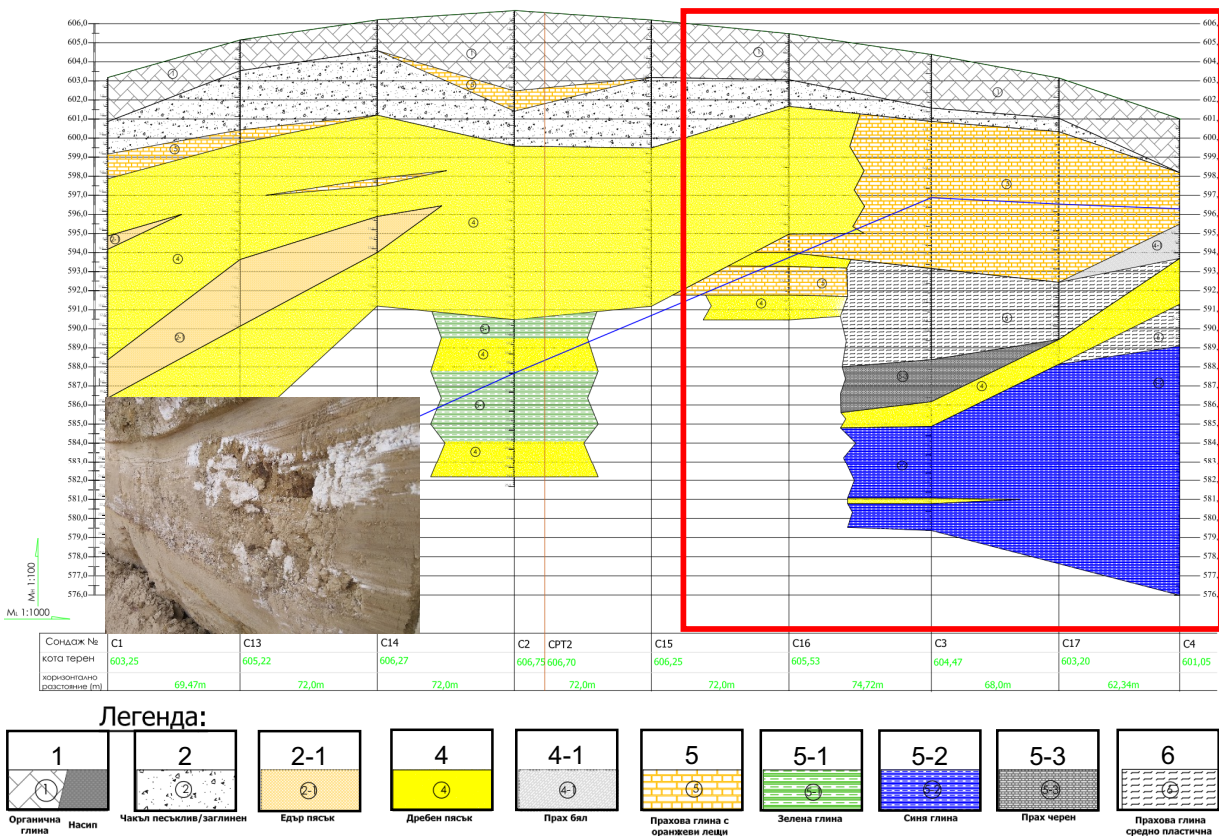
Фиг. 1. Общо ситуационно разпределение на логистичния комплекс

Инженерно-геоложкото проучване включва сондажи, лабораторни изследвания на земни и водни проби и полеви изпитвания със стандартен пенетрационен тест (SPT) и статична пенетрация (CPT).

Терминологията за идентификация и описание на почвите е съобразена с ISO 14688-1 [7]. Разположението на проучвателните изработки и локалният обхват на слабите почви са показани на Фигура 2.



Фиг. 2. Разположение на проучвателните изработки и локален обхват на слабите почви



Фиг. 3. Характерен надлъжен (III-III) инженерно-геоложки разрез през проблемната зона

Таблица 1. Параметри на почвени пластове.

Пласт	Наименование	Wn	ρ_s	ρ_n	ρ_d	n	e	φ	c'
-	-	%	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	-	°	kPa
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Насип, взаимствани почви	28.80	2.71	1.89	1.47	45.89	0.848	21.55	38.5
2	Чакъл, пясъклив	13.55	2.74	2.08	1.83	33.12	0.497	45.01	-
2-1	Пясък, едър, чакълест	16.77	2.69	1.95	1.64	39.44	0.652	25.90	36.6
4	Пясък, дребен	26.31	2.69	1.94	1.54	42.70	0.751	25.80	43.1
4-1	Бял прах, пясъклив заглинен	33.10	2.30	1.51	1.15	40.71	0.840	15.56	32.3
5	Прахова глина	31.61	2.70	1.81	1.38	49.07	0.966	21.13	38.6
5-1	Прахова глина - зелена	32.22	2.324	1.51	1.15	41.45	0.836	11.75	25.7
5-2	Прахова глина - синя	31.62	2.35	1.53	1.17	41.85	0.838	3.02	12.9
5-3	Оранжева пясъчлива глина	28.00	2.72	1.77	1.38	49.16	0.967	24.60	42.0
6	Прахова глина пореста	57.73	2.68	1.68	1.07	59.91	1.525	17.08	43.6

Площадката попада в областта на разпространение на Лозенецката свита. За разглежданата дълбочина определящ е горният комплекс, представен преобладаващо от глинести отложения с чакълести и пясъчливи лежи и прослойки с пясъчливо-глинест запълнител, като в отделни пластове са установени и варовити включения [12]. Характерен надлъжен инженерно-геоложки разрез през проблемната зона е представен на Фигура 3.

За проектно определящия прахово-глинест пласт са приети обемно тегло $\gamma = 17.50 \text{ kN/m}^3$, деформационен модул $E = 10 \text{ MPa}$, кохезия $c' = 16 \text{ kPa}$ и ъгъл на вътрешно триене $\varphi' = 20^\circ$. За останалите пластове приетите деформационни модули са в границите 30–35 MPa за пясъчливите и нарастващи в дълбочина на пласт 5, 5.1, 5.2. и 5.3 поради относително по-голямата мощност.

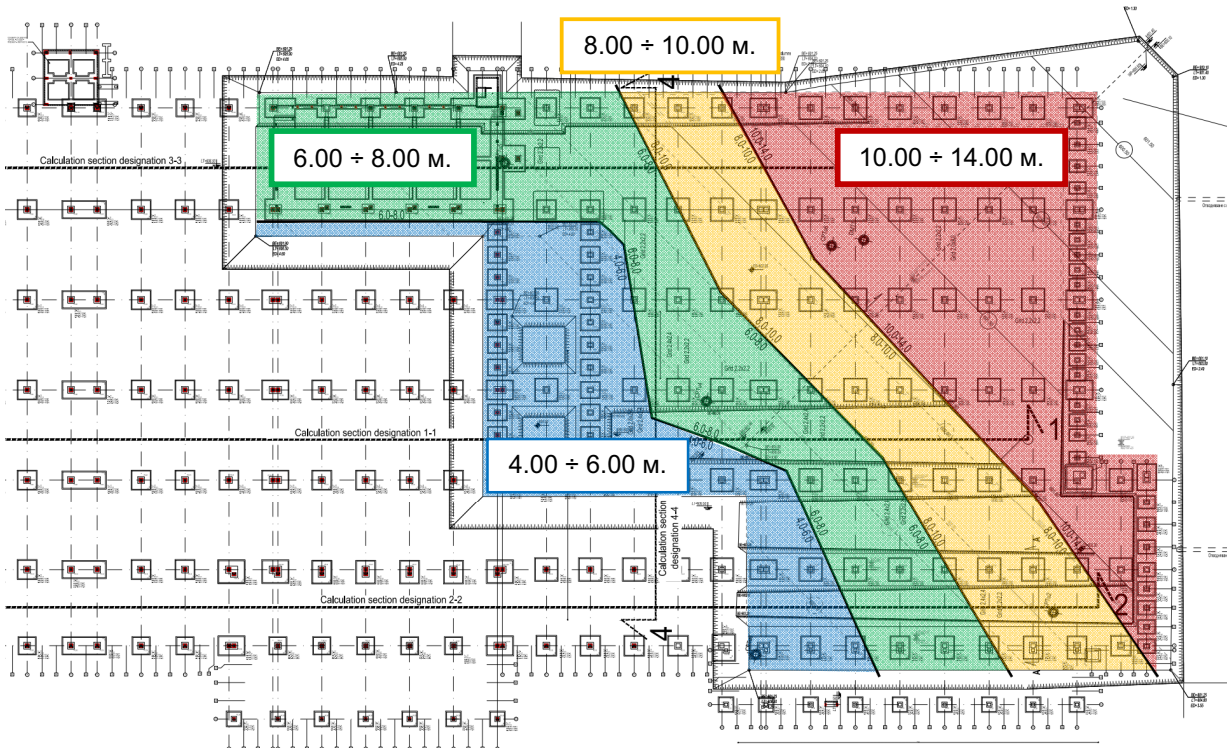
Необходимостта от подобряване е свързана с локално разпространените прахови и прахово-глинести прослойки с ниска коравина и якост. Подходите за фундиране и подобряване при подобни почвени условия са разгледани в [13, 14]. Ограниченото разпространение на „слабите“ почви в плана на сградата води до различна деформируемост на основата под отделните конструктивни зони.

Базовият модел на нетретираната основа показва максимално слягане 174 mm при приет за проекта критерий $s_{lim} = 120 \text{ mm}$. Проверката по гранично състояние на експлоатационна годност е извършена в общата рамка на Еврокод 7 [4]. Превишаването на проектния критерий е установено в участъка с локално разпространени прахови и прахово-глинести прослойки, поради което подобряването е ограничено до тази част от сградата.

ЗОНИРАНО РЕШЕНИЕ С КОРАВИ ВКЛЮЧЕНИЯ

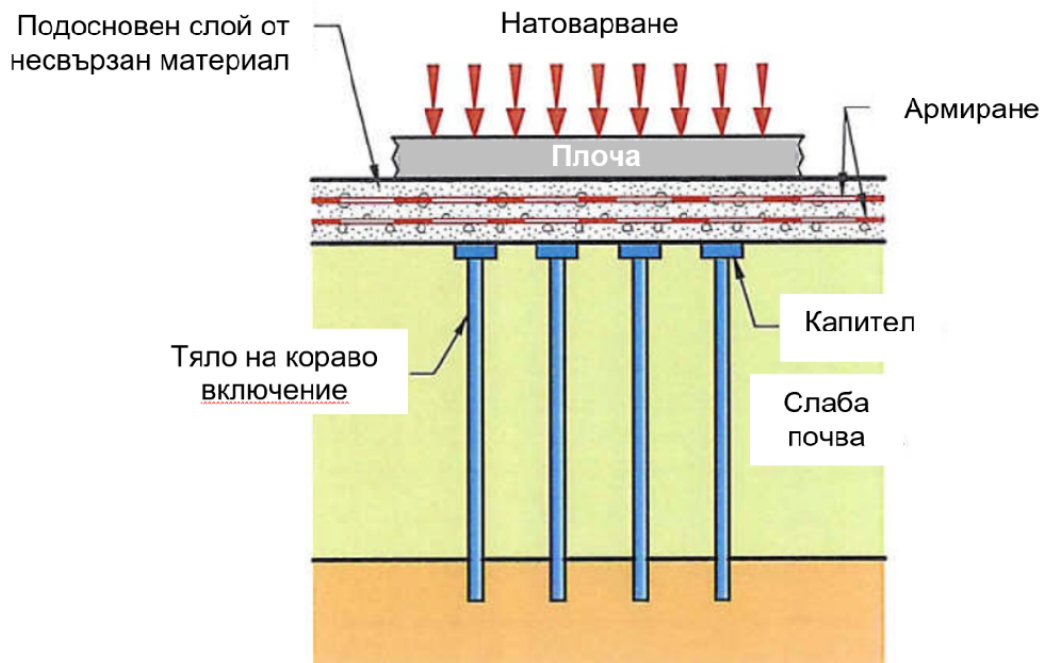
Локалното подобряване е изпълнено с $\square 5 \text{ 200}$ неармирани бетонни корави включения с диаметър на елементите $D = 320 \text{ mm}$ и променливо междуосово разстояние (растер) според геотехническите условия и натоварването. Възприетата конструктивна концепция съответства на общите принципи за проектиране на земна основа, подобрена с корави включения [1, 6, 11]. Включенията са разположени под единичните чашковидни фундаменти и под настилната на товарната зала. Предвид вариращата мощност на слабия пласт, дължините варират от 4 до 14 m. В план са обособени зони с дължини на включенията 4,00–6,00, 6,00–8,00, 8,00–10,00 и 10,00–14,00 m (Фиг. 4).

В най-неблагоприятните и по-тежко натоварени участъци е приета квадратна мрежа $1.80 \times 1.80 \text{ m}$. Към границата на подобряването растерът се увеличава последователно през 2.00×2.00 , 2.20×2.20 и $2.40 \times 2.40 \text{ m}$ до $2.60 \times 2.60 \text{ m}$ в преходната зона. При диаметър 320 mm това намалява коефициента на заместване от 2.48% до 1.19%. Границите между зоните преминават между единичните фундаменти и са съобразени с разпространението на относително по-деформируемите пластове и с нивото на натоварване.



Фиг. 4. Зониране на дължините на коравите включения.

Над „главите“ на включенията е предвиден разпределящ слой от уплътнен трошен камък с променлива дебелина до нивото на фундиране. Включенията не са конструктивно свързани с фундаментите и работят като елементи на композитната земна основа [1, 9]. Принципната работа на системата „фундамент–разпределящ слой–корави включения–почва“ е показана на Фигура 5.



Фиг. 5. Принципна схема на земна основа, подобрена с корави включения [1]

ИЗЧИСЛИТЕЛНА МЕТОДИКА

Изчислителният анализ е извършен с програмната система Tower 8 [10] чрез пространствен модел на връхната конструкция и земната основа, представена като линейно-еластично изопараметрично полупространство. Сравнени са два варианта с еднаква геометрия, фундаментна схема и натоварвания: нетретирана основа и локално подобрена основа с корави включения.

За нетретирания вариант са използвани деформационните характеристики на естествените почвени пластове от инженерно-геоложкия доклад. При подобрения вариант системата „почва–корави включения“ е представена чрез еквивалентен деформационен модул за всяка зона [1]:

$$E_{eq} = \eta \cdot \alpha_s \cdot E_c + (1 - \alpha_s) \cdot E_s \quad (1)$$

където:

$E_c = 9000$ МПа – деформационен модул на материала на включенията;

$E_s = 10$ МПа – деформационен модул на подобрения почвен пласт;

α_s – коефициент на заместване;

$\eta = 0.85$ – корекционен коефициент за срязване.

Таблица 2. Еквивалентни деформационни характеристики на зоните с корави включения

Растер s , [m]	Диаметър d , [m]	Модул на включенията E_c , [MPa]	Модул на почвата E_s , [MPa]	Коеф. на заместв., α_s , [%]	Корекционен коефициент η , [-]	Проектно приет E_{eq} , [MPa]
1	2	3	4	5	6	7
1.80	0.32	9000	10	2.48	0.85	200
2.00				2.01		163
2.20				1.66		140
2.40				1.40		120
2.60				1.19		100

Изчислените стойности на E_{eq} намаляват от 199.6 МПа при растер 1.80 m до 100.9 МПа при растер 2.60 m. В пространствения модел са използвани проектно приетите стойности 200, 163, 140, 120 и 100 МПа за растери съответно 1.80, 2.00, 2.20, 2.40 и 2.60 m. Обобщените параметри за петте зони са представени в Таблица 2. Зоните са въведени според действителното разположение на включенията, а границите между тях преминават между единичните фундаменти.

Сравнението е извършено за квазипостоянната комбинация на въздействията по пълните слягания, относителните слягания и завъртанията на фундаментите.

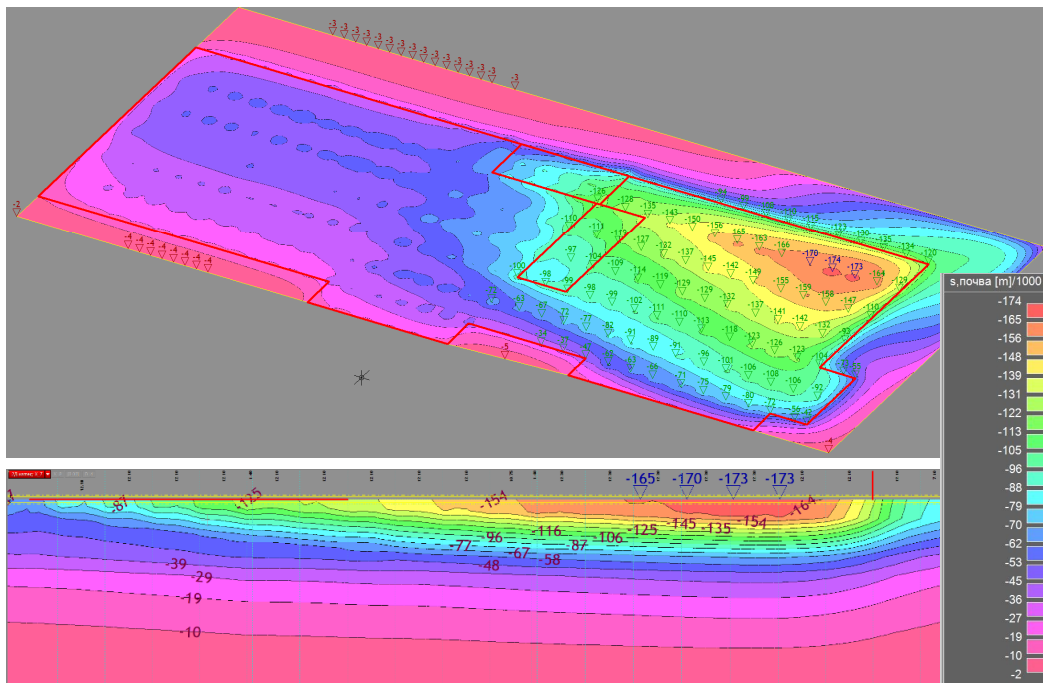
Моделът се използва за сравнение на общите деформации при нетретирана и подобрена земна основа. Носимоспособността на отделните включения и отрицателното триене не са разгледани и следва да бъдат проверявани отделно при цялостното проектиране на системата [1, 5, 11].

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

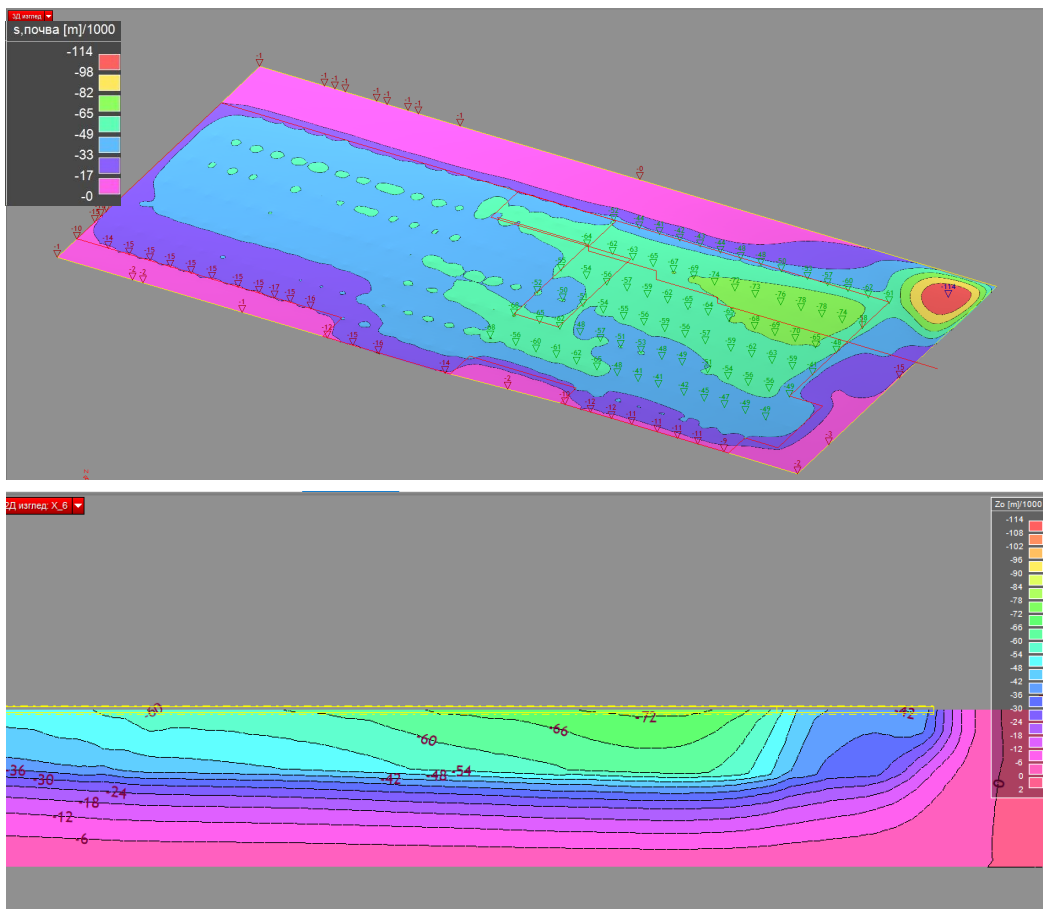
При квазипостоянната комбинация максималното слягане за нетретираната основа достига 174 mm (Фиг. 6). След въвеждане на зонирания подобрения максималното слягане намалява до 71 mm, т.е. с приблизително 59% (Фиг. 7). Полученото максимално слягане е под приетия за проекта критерий $s_{lim} = 120$ mm.

Последователното увеличаване на растера намалява приетия еквивалентен модул от 200 МПа в най-интензивно подобрения зона до 100 МПа в преходната зона. По-високата коравина е концентрирана в участъците с най-неблагоприятни почвени условия и относително по-големи натоварвания, а към периферията на подобрението тя намалява последователно.

Изолините на слягането отразяват постепенното намаляване на приетата коравина от основната подобрена зона към естествената основа. Получените резултати позволяват количествено сравнение на максималните слягания. Ефектът върху относителните слягания и завъртанията може да бъде оценен единствено качествено, тъй като не са представени числени профили през границите на зоните.



Фиг. 6. Изчислени слягания при нетретирана земна основа: пространствено разпределение (горе); характерен профил на изолините (долу)

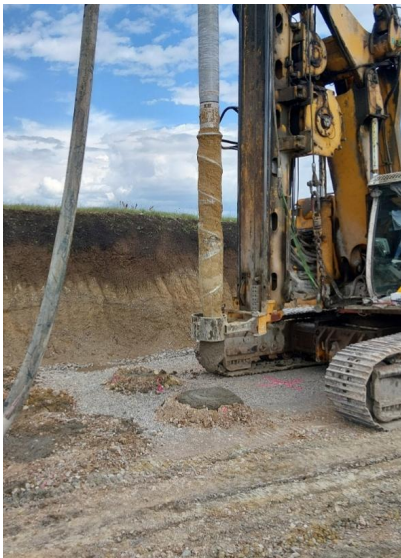


Фиг. 7. Изчислени слягания при зонирано подобрена земна основа: пространствено разпределение (горе); характерен профил на изолините (долу)

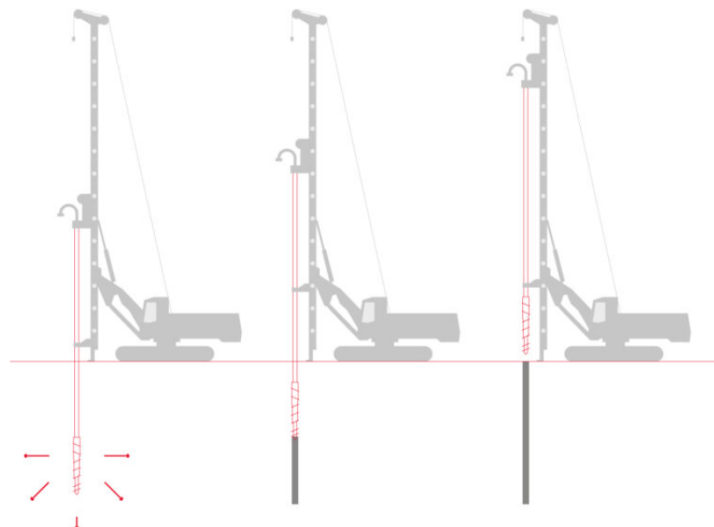
ИЗПЪЛНЕНИЕ НА ПРОЕКТНОТО РЕШЕНИЕ

Проектното решение е реализирано на площадката чрез изпълнение на неармирани бетонни корави включения със специализирана верижна механизация. Използвани са два различни начина за проникване и изместване на почвата – чрез ротационен инструмент с изместващ шнек и пълно изместване, и чрез вибрационно вграждане под натиск на тръбен инструмент. При изтеглянето на инструмента се подава бетонната смес и по този начин се формира тялото на включението. Използваната механизация е показана на Фигура 8, а технологичната последователност – на Фигура 9 и Фигура 10. Характерно и за двете технологии е, че почвата не се извлича на повърхността, а се измества странично при проникването на инструмента. Това ограничава образуването на земни маси за извозване и улеснява организацията на работната площадка. В зависимост от вида на почвата изместването може да доведе и до локално уплътняване и повишаване на страничните напрежения около включенията, което допринася за общото подобряване на земната основа.

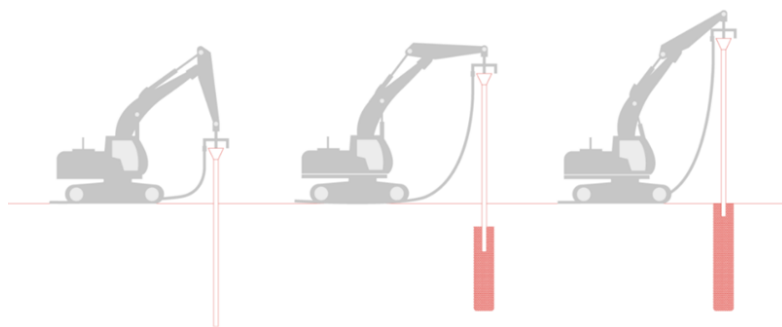
Коравите включения са изпълнени съгласно проектното разположение под единичните фундаменти и под настилка на товарната зала. След изпълнението на включенията е положен разпределящият слой от уплътнен трошен камък до проектното ниво на фундиране.



Фиг. 8. Специализирана механизация и инструменти, използвани при изпълнението на коравите включения: ротационен инструмент с пълно изместване на почвата (ляво); вибрационна глава със захващащ механизъм за тръбен инструмент (дясно)



Фиг. 9. Технология на изпълнение посредством изместващ шнек (menard.com).



Фиг. 10. Технология на изпълнение посредством вибрационно действие под натиск (menard.com).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За разглеждания логистичен комплекс локално разпространените прахови и прахово-глинести пластове водят до максимално изчислено слягане 174 mm при нетретирана основа. Зонираното подобряване с неармирани бетонни корави включения с диаметър 320 mm намалява стойността до 71 mm, или с приблизително 59%.

Промяната на растера от 1.80x1.80 до 2.60x2.60 m намалява коефициента на заместване от 2.48% до 1.19% и приетия еквивалентен деформационен модул от 200 до 100 МПа. Така най-високата коравина е концентрирана в най-неблагоприятните и относително по-тежко натоварени участъци, а към естествената основа е оформена преходна зона.

При локално разпространени деформируеми почви не е достатъчно да се осигури висока коравина само в третираната зона. Съществен е и преходът към естествената земна основа. Използваният модел е подходящ за сравнителна оценка на глобалните деформации, но не заменя локалните проверки на включенията, разпределящия слой и почвата между тях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ASIRI National Project. (2012). *Recommendations for the Design, Construction and Control of Rigid Inclusion Ground Improvements*. IREX – Presses des Ponts, Paris, France.
- [2] Briançon, L., Dias, D., & Simon, C. (2015). Monitoring and numerical investigation of a rigid inclusions-reinforced industrial building. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), 1592–1604. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0262>.
- [3] Burtin, P., & Racinais, J. (2016). Embankment on soft soil reinforced by CMC semi-rigid inclusions for the high-speed railway SEA. *Procedia Engineering*, 143, 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.045>.
- [4] European Committee for Standardization – CEN. (2024). EN 1997-1:2024. *Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules*. CEN, Brussels, Belgium.
- [5] European Committee for Standardization – CEN. (2025). EN 1997-3:2025. *Eurocode 7: Geotechnical design – Part 3: Geotechnical structures*. CEN, Brussels, Belgium.
- [6] Han, J. (2015). *Principles and Practice of Ground Improvement*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- [7] International Organization for Standardization – ISO. (2017). *ISO 14688-1:2017. Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1: Identification and description*. ISO, Geneva, Switzerland.
- [8] Milev, N. (2024). Advanced soil improvement methods using DSM and stone columns for reducing settlement in logistics facilities considering construction stages. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1427(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1427/1/012001>.
- [9] Pham, H. V., Briançon, L., Dias, D., & Racinais, J. (2019). Investigation of behavior of footings over rigid inclusion-reinforced soft soil: Experimental and numerical approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(12), 1940–1952. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0495>.
- [10] Radimpex Software. (2025). *Tower 8: User Manual*. Radimpex Software d.o.o., Belgrade, Serbia.



- [11] Smith, M., Bishop, J., Collin, J., Gallant, A., Hudson, M., Johnsen, L., Kniss, K., Pockoski, M., Swift, S., Warren, S., Wissmann, K., & Siegel, T. (2023). Part I: Selection and design of rigid inclusions. *DFI Journal*, 17(2), 1–10. <https://doi.org/10.37308/DFIJnl.20230303.279>.
- [12] Божинова-Хаапанен, А. (2021). *Инженерногеоложки свойства на Софийските глин*. Планета-3, София, България.
- [13] Дингозов, Г., Етимов, Т., & Киров, Б. (1980). *Фундиране в слаби почви*. Техника, София, България.
- [14] Евстати́ев, Д. (2009). *Методи за подобряване на строителни почви*. Българска академия на науките (БАН), София, България.

УТОЧНЕНИЕ НА ГЕОМЕХАНИЧНАТА ТЕОРИЯ ЗА ЕКСТРЕМНИ ДЪЛБОЧИНИ

Николай Жечев, n_rafailov@abv.bg
Рафаил Рафаилов, r_rafailov@mgu.bg

ABSTRACT

This paper presents a refined geomechanical framework for the analysis of plastic zone development around underground excavations at extreme depths. The study proposes a modified analytical model based on the classical Bulychev theory, extended to account for key physical processes relevant to deep mining conditions, including thermal stresses, time-dependent behavior (creep), and tectonic stress anisotropy.

A comparative analysis of established models—Protodyakonov, Hoek–Brown, and Bulychev—is performed to identify their applicability and limitations. The proposed formulation introduces an equivalent stress representation for anisotropic stress fields, a thermally induced stress component derived from thermoelastic theory, and a logarithmic time-dependent function to capture creep effects. These modifications are integrated into a unified expression for the radius of the plastic zone.

The model is applied to the TauTona gold mine in South Africa (depth ~4000 m), demonstrating improved agreement with observed field data. Results indicate that the modified model predicts larger plastic zones and increased convergence compared to classical approaches, providing a more conservative and realistic assessment of rock mass behavior under extreme conditions.

The findings confirm that traditional models tend to underestimate deformation and plastic zone extent at great depths, while the proposed approach enhances predictive accuracy and supports safer design of underground structures. The model is particularly suitable for deep mining and tunneling applications, where coupled thermo-mechanical and rheological effects are significant.

Keywords: geomechanics, plastic zone, deep mining, rock mechanics, Bulychev theory, thermal stresses, creep behavior, stress anisotropy

1. Въведение

При дълбочини над 3000 m класическата теория на Булычев дава систематично по-малки стойности на пластичната зона, тъй като не отчита термичните напрежения, тектонската анизотропия и пълзенето. Настоящият доклад предлага модифицирана формула, верифицирана с данни от рудник Таутона (4000 m).

Изследването представя три основни подхода, които са оказали значително влияние върху развитието на науката (Goodman, 1989). В основата на съвременните разработки стои фундаменталният труд на проф. Н. С. Булычев (Bulychev, 1982), чиито теоретични постижения са верифицирани и разширени във второто издание (Bulychev, 1994). За приложение при екстремни дълбочини (4000 m) класическата теория изисква модификации, включващи термични напрежения, време, зависимо поведение (пълзене) и тектонска анизотропия.

2. Сравнителен анализ на моделите и области на приложение в нелинейната механика на пластичните зони

Сравнителният анализ на трите основни модела - на Протодяконов, Хук-Браун и Булычев, позволява да се идентифицират техните предимства, ограничения и оптимални области на приложение (Brown, 2008).

Обобщена форма на трите модела може да се представи като:

$$F(\sigma, \mathbf{P})=0 \quad (1)$$

където $\mathbf{P}$ е вектор на параметрите за съответния модел.

Критерий за избор на модел:

$$M_{opt} = \arg \min_M [\alpha E(M) + \beta C(M) - \gamma A(M)] \quad (2)$$

където: $E(M)$ – грешка на модела спрямо експериментални данни; $C(M)$ – сложност на прилагане; $A(M)$ – адекватност за конкретната задача; α, β, γ – тегловни коефициенти.

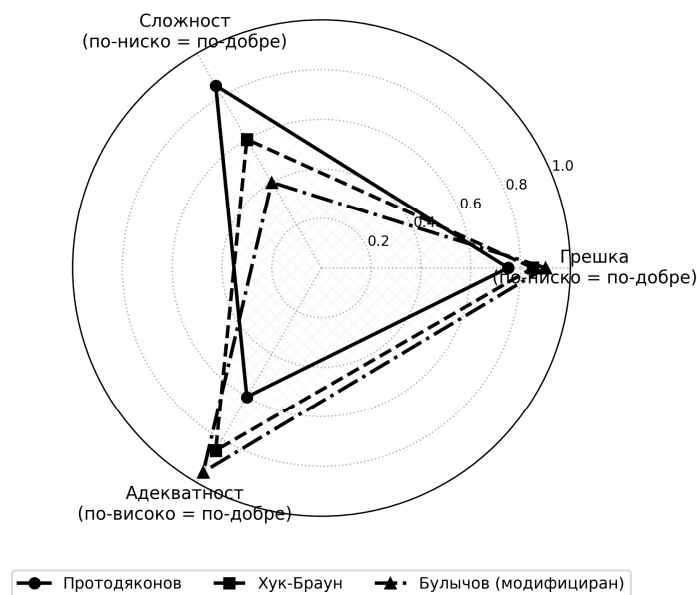
Перспективи за интеграция

Съвременните тенденции водят към разработването на хибридни модели, които комбинират предимствата на различните подходи (Singh & Rao, 2005):

$$F_{hybrid} = w_{HB} F_{HB} + w_P F_P + w_B F_B \quad (3)$$

$$\sum w_i = 1, \quad w_i \geq 0 \quad (4)$$

където w_{HB} , w_P , w_B са тегловни коефициенти, определяни чрез обратен анализ или машинно обучение.



Фигура 1. Сравнителен анализ на моделите по критерии — радарна диаграма за Протодяконов, Хук-Браун и модифициран Бульчов модел – по три критерия: грешка спрямо експериментални данни, сложност на прилагане и адекватност за дълбоки условия

При всички критерии по-високата стойност означава по-благоприятно поведение, а по-голямата площ на радарната диаграма показва по-добро съвкупно представяне. Моделът на Протодяконов се отличава с ниска сложност на приложение, но с по-ограничена адекватност за екстремни дълбочини. Моделът на Хук-Браун заема междинна позиция и осигурява баланс между точност, приложимост и сложност. Модифицираният модел на Бульчов има най-голяма съвкупна площ, което визуално обосновава неговото използване като база за анализ на напрегнато-деформираното състояние при големи дълбочини.

3. Модифицирана теория на Бульчов за екстремни дълбочини (4000 m)

Предложената модификация представлява инженерно обоснован синтез на класическата теория с утвърдени физични механизми, наблюдавани при големи дълбочини, и следва да се разглежда като разширение, а не като заместване на оригиналния модел.

За приложение при дълбочина 4000 m класическата теория се допълва с термични напрежения, времезависимо поведение (пъзене) и тектонска анизотропия. Модификациите са изведени от утвърдени физични механизми (термоеластичност, реология на Максвел, тектонски модели) и са подчертани в уравненията по-долу.

3.1. Отчитане на тектонска анизотропия

При дълбочина 4000 m хоризонталните напрежения значително превишават вертикалните поради тектонски процеси. Този подход се основава на общоприети концепции в геотехниката за моделиране на анизотропни начални полета на напрежение. Те са широко застъпени в стандартни ръководства за софтуерни пакети (като DIANA) и в научната литература (Amadei, B., 1996). Въвежда се коефициент на страничен натиск K_0 и анизотропия на началното напрегнато състояние: $\sigma_{h1} = K_{01}\sigma_v$, $K_0, \sigma_{h2} = K_{02}\sigma_v$, където $\sigma_v = \gamma H$, а K_{01} и K_{02} са коефициентите в две хоризонтални направления. Ефективното начално напрежение за изчисление на радиуса на пластичната зона се определя като средно хидростатично:

$$p_0^{eff} = \frac{\sigma_v + \sigma_{h1} + \sigma_{h2}}{3} = \frac{108 + 194,4 + 129,6}{3} = 144 \text{ MPa} \quad (5)$$

За рудник Таутона (TauTona, Южна Африка) се приема $\sigma_v = 108 \text{ MPa}$, $\sigma_{h1} = 194,4 \text{ MPa}$ ($K_{01} = 1,8$), $\sigma_{h2} = 129,6 \text{ MPa}$ ($K_{02} = 1,2$).

Формулата (5) представлява опростен инженерен подход, който трансформира сложното анизотропно поле на напреженията в еквивалентно хидростатично (средно) напрежение. Това позволява използването на класическата, аксиално-симетрична аналитична формула на Булычов, като същевременно се отчита реалната анизотропия, причинена от тектонски процеси.

3.2. Включване на термични напрежения

Температурният градиент между скалата и охлаждащата вентилация създава допълнителни напрежения. За стационарен топлинен поток в кръгла изработка термичните напрежения се определят по формулата:

$$\sigma_{thermal} = \frac{E\alpha\Delta T}{1-\nu} \quad (6)$$

където ΔT е температурната разлика между дълбочината и повърхността. За Таутона $\Delta T \approx 40^\circ\text{C}$, $E = 70 \text{ GPa}$, $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\nu = 0,25$, получава се $\sigma_{thermal} = 44,8 \text{ MPa}$.

Това е класическа формула от теорията на топлопроводността и термоеластичността, която се прилага в механиката на скалите (Wu, Z. et al., 2024). Температурният градиент между горещата скала на дълбочина и въздуха в изработката създава допълнителни напрежения. Модификацията чрез добавяне на $\sigma_{thermal}$ към числителя на формулата за радиуса на пластичната зона увеличава ефективното поле на напреженията, което води до разширяване на зоната на необратими деформации.

Включването на термичния компонент е особено важно при дълбоки рудници, където температурните градиенти са съпоставими по ефект с механичните напрежения

3.3. Времевазависимо поведение (пълзене)

Скалите на голяма дълбочина проявяват пълзене, което води до увеличаване на пластичната зона с времето. Въвежда се времеви фактор $f(t)$, изведен от реологичния модел на Максвел (Dong, H. и Gao, Q., 2019), (Tran, M.-N. et al., 2020):

$$f(t) = 1 + k \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) \quad (7)$$

където $k \approx 0,1 \div 0,2$ (параметър на пълзене), t_0 – характерно време (напр. 1 година). За 10 години експлоатация $f(t) \approx 1,25$.

Функцията (7) (логаритмична зависимост) е опростен реологичен модел, често използван за описание на затихващата фаза на пълзене. Тя показва, че с течение на времето пластичната зона

продължава да нараства (макар и с намаляваща скорост), което е от решаващо значение за дългосрочната стабилност на изработките.

Пренебрегването на времезависимите ефекти може да доведе до съществено подценяване на деформациите и съответно до неадекватно оразмеряване на крепежните системи.

3.4. Модифициран радиус на пластичната зона

Това е крайната, интегрирана формула, която съчетава класическия модел на Булычов с горните три модификации. Тя не е директно цитирана, а представлява синтез от съвременни изследвания, които надграждат класическата теория (Wu, Z. et al. , 2024), (Dong, H. и Gao, Q. , 2019) .

Комбинирайки горните фактори, радиусът на пластичната зона се изчислява по:

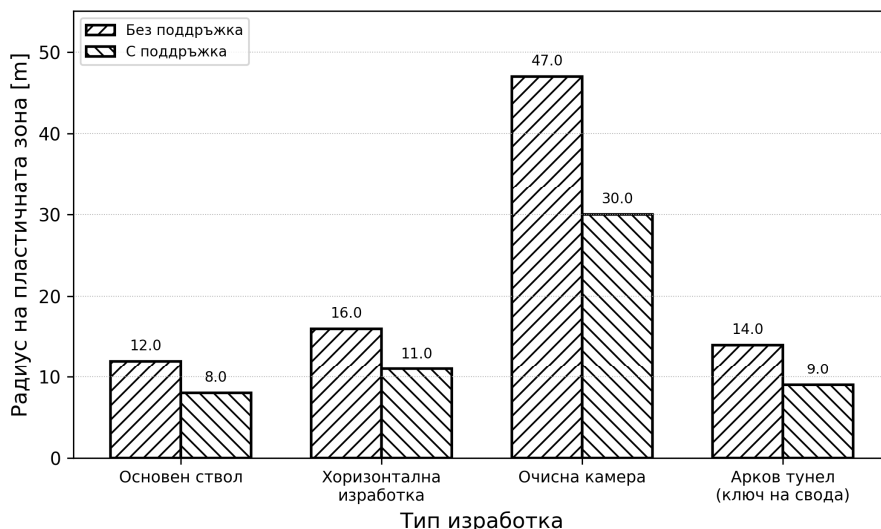
$$R_p^{mod} = r_0 \left[\frac{2(p_0^{eff} K_\phi + C \cot \phi + \sigma_{thermal})}{(K_\phi + 1)(p_i + C \cot \phi)} \right]^{\frac{1}{K_\phi - 1}} \cdot f(t) \quad (8)$$

Модифицираната формула (8) замества първоначалното хидростатично напрежение P_0 с комбинация от средното анизотропно напрежение p_0^{eff} и топлинното напрежение $\sigma_{thermal}$. Освен това добавя множител $f(t)$, който скалира резултата във времето. По този начин тя дава по-точна и реалистична оценка за радиуса на необратимите деформации при комплексните условия на дълбокия рудник.

4. Интерпретация за най-дълбокия рудник в света (4000 m) по модифицираната теория на Булычов

4.1. Основни характеристики и радиуси на пластична зона

Рудник Таутона (TauTona), Южна Африка: Дълбочина: 3900–4000 m под повърхността; Температура на скалата: 55–60 °C на дъното; Вертикално напрежение: ~108 МПа; Хоризонтално напрежение: 1,5–2,5 пъти вертикалното (тектоничен стрес).



Фигура 2. Радиус на пластичната зона за различни типове изработки

Фигура 2 показва радиусите на пластичната зона за четири типа изработки в рудник Таутона (дълбочина 4000 m) – основен ствол, хоризонтална изработка, очисна камера и хоризонтален тунел с аркова форма (в ключа на свода). Най-голяма пластична зона се наблюдава при очисната камера – 47 m без поддръжка и 30 m с поддръжка. Основният ствол има радиус 12 m без поддръжка и 8 m с

поддръжка. При арковия тунел концентрацията на напрежения в ключа на свода води до локално разширяване на пластичната зона до 14 m без поддръжка. Числата над стълбовете показват точните стойности в метри. Този анализ подчертава критичната роля на поддръжката за ограничаване на необратимите деформации.

4.2. Разпределение на напреженията (основен ствол) – модифицирано

Със стойностите от модифицирания модел се преизчисляват напреженията. При $r=7$ m в пластичната зона:

$$\sigma_r = (0 + 23,836) \left(\frac{7}{5} \right)^{3,60} - 23,836 = 53,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_\theta = 4,60 \cdot 53,9 + (4,60 - 1) \cdot 23,836 = 333,8 \text{ MPa}$$

Тези стойности остават близки до класическите, тъй като модификациите влияят основно на радиуса на пластичната зона, а не на локалното разпределение. При $r=15$ m в еластичната зона:

$$\sigma_{r_p} = 23,836 \left(\frac{2,15}{5} \right)^{3,60} - 23,836 \approx 295,5 \text{ MPa}$$

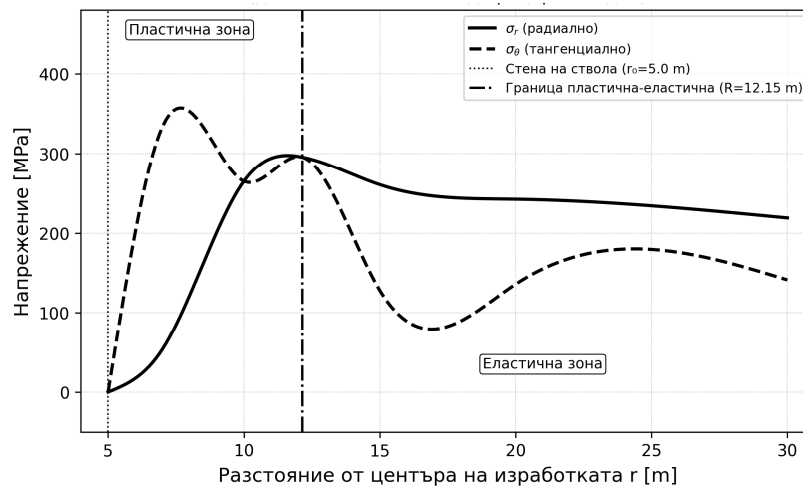
$$\sigma_r = 194,4 - (194,4 - 295,5) \left(\frac{12,15}{15} \right)^2 = 260,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_\theta = 194,4 + (194,4 - 295,5) \cdot 0,656 = 128,0 \text{ MPa}$$

Таблица 1. Сравнение на разпределението на напреженията (класически и модифициран модел)

r [m]	Зона	σ_r (клас.) [MPa]	σ_θ (клас.) [MPa]	σ_r (мод.) [MPa]	σ_θ (мод.) [MPa]
5	Граница	0	0	0	0
7	Пластична	53,9	333,8	53,9	333,8
10	Граница	265,2	265,2	–	–
12,15	Граница	–	–	295,5	295,5
15	Еластична	225,8	163	260,8	128
20	Еластична	209,8	146,6	242,5	135,9
30	Еластична	199,5	136,9	219	141,3

Фигура 3 представя разпределението на радиалните (плътна линия) и тангенциалните (пунктирна линия) напрежения около основния ствол на дълбочина 4000 m, изчислени по модифицирания модел. Вертикалната пунктирна линия при $r_0 = 5$ m маркира стената на ствола, а вертикалната точка-тире при $R = 12,15$ m – границата между пластичната и еластичната зона. В пластичната зона (5–12,15 m) тангенциалното напрежение нараства рязко, докато радиалното напрежение е ниско и нараства плавно. На границата пластична–еластична двете напрежения се изравняват (≈ 295 MPa). В еластичната зона ($r > 12,15$ m) тангенциалното напрежение спада и се стабилизира, а радиалното напрежение постепенно намалява. Това разпределение потвърждава концентрацията на напрежения в близост до изработката и необходимостта от поддръжка за поемане на високите тангенциални напрежения.



Фигура 3. Разпределение на радиалните и тангенциалните напрежения около основния ствол на дълбочина 4000 m (модифициран модел).

4.3. Конвергенция и скални изтласквания

Конвергенцията на стената на ствола ($r = r_0$) се изчислява по:

$$u_r = \frac{(R_p^{mod})^2}{2Gr_0} (\sigma_\theta^{elastic} - \sigma_\theta^{plastic})$$

При $G=30$ GPa, $r_0=5$ m, $\sigma_\theta^{elastic} \approx 128$ MPa, $\sigma_\theta^{plastic} \approx 333,8$ MPa, $R_p^{mod}=12,15$ m:

$$u_r = \frac{(12,15)^2}{2 \cdot 30000 \cdot 5} (128 - 333,8) \approx -0,101 \text{ m} = 101 \text{ mm}$$

Резултат: Конвергенцията се увеличава от 57 mm (класически) до 101 mm (модифициран), което е в горната граница на наблюдаваните стойности (50–80 mm).

Скално изтласкване: Енергия, съхранена в пластичната зона:

$$U \approx \frac{1}{2E} \int_{r_0}^{R_p} (\sigma_\theta^2 + \sigma_r^2 - 2\nu\sigma_\theta\sigma_r) 2\pi r dr \approx 100 \div 150 \text{ MJ / m}$$

4.4. Сравнение с реални данни от рудник Таутона – Таблица 2

Параметър	Класическа теория (Bulychev, 1982)	Модифицирана теория (с терм. напр., пълзене, анизотропия)	Наблюдавано в Таутона	Разлика (мод. – набл.)
Радиус на пластична зона, m	10	12,2	8–12	+0,2 (горна граница)
Конвергенция на ствола, mm	57	101	50–80	+21 (над горна граница)
Напрежение в анкери, kN	200–300	280–420	250–350	Приемливо
Честота на скални изтласквания	Висока	Много висока	Много висока	Съответства

Забележка: По-високата изчислена конвергенция (101 mm) надхвърля наблюдавания диапазон (50–80 mm). Това може да се дължи на консервативни предположения (напр. $f(t)=1,25$ за 10 години, докато

реалното пълзене може да е по-слабо). При $f(t)=1,15$ (средно) конвергенцията става около 85 mm, което е в границите. Въпреки това модифицираният модел дава по-добра качествена картина.

5. Практически изводи и препоръки

Основни проблеми на дълбочина 4000 m: Разширена пластична зона (до 12–16 m); Голяма конвергенция (до 100 mm), изискваща многократно прекрепване; Висок риск от скални изгласквания (енергия > 100 MJ/m); Термични напрежения от порядъка на 45 MPa.

Стратегии за управление: Използване на комбинирана поддръжка: анкери (300–400 kN) + стоманобетонна заливка; Стъпаловидно изкопаване с междинна поддръжка; Мониторинг в реално време (екстензометри, микросеизмика).

Предложеният модел следва да се прилага с повишено внимание при силно хетерогенни масиви, динамични натоварвания и наличие на разломни структури, където локалните ефекти могат да доминират над разглежданите механизми.

Въпреки доброто съответствие с наблюдаваните данни, пълна валидация на модела изисква систематичен анализ на мониторингови данни от множество дълбоки рудници.

Библиография

- [1] Bulychev, N. S., *Mechanics of Underground Structures*, Mir Publishers, 1982.
- [2] Bulychev, N. S., *Mechanics of Underground Structures*, 2nd ed., Nedra, 1994.
- [3] Goodman, R. E., *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1989.
- [4] Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., "Hoek–Brown Failure Criterion – 2002 Edition", Proc. NARMS, 2002.
- [5] Brown, E. T., "Estimating the Mechanical Properties of Rock Masses", Proc. SHIRMS, 2008.
- [6] Amadei, B., *Rock Anisotropy and the Theory of Stress Measurements*, Springer, 1996.
- [7] Wriggers, P., *Computational Contact Mechanics*, Springer, 2006.
- [8] Bowles, J. E., *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., McGraw-Hill, 1996.
- [9] Singh, M., Rao, K. S., "Empirical Methods to Estimate the Strength of Jointed Rock Masses", *Engineering Geology*, 77, 2005, 127–137.
- [10] Dong, H., Gao, Q., "Plastic Zone of Roadway Considering Rheology", *Journal of China Coal Society*, 2019.
- [11] Tran, M.-N. et al., "Plastic Zone Range Considering Creep Effect", *Scientific Reports*, 2020.
- [12] Wu, Z. et al., "Thermal–Mechanical Coupling in Deep Rock", *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024.
- [13] Eurocode 7, *Geotechnical Design – Part 1*, EN 1997-1, 2004.



TOPIC C

Measurements in geomechanics. Contact and remote methods. Monitoring

Измервания в геомеханиката. Контактни и дистанционни методи. Мониторинг

MODERN GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF SOILS

Wojciech Sas^{1*}

¹Institute of Civil Engineering, Warsaw University of Life Sciences – WULS, Warsaw, Poland

*Corresponding author: wojciech_sas@sggw.edu.pl

ABSTRACT

The increasing complexity of modern civil engineering projects requires reliable characterization of subsurface conditions to ensure safe, economical, and sustainable geotechnical design. This review presents recent developments in geotechnical site investigations, focusing on the integration of field exploration, soil sampling, advanced in-situ testing, laboratory characterization, and engineering interpretation. Particular attention is given to soil sampling procedures and specimen quality, as these directly influence the reliability of laboratory-derived engineering parameters. Modern in-situ investigation techniques, including Cone Penetration Testing (CPT/CPTu), Seismic Cone Penetration Testing (SCPTu), Flat Dilatometer Testing (DMT/SDMT), pressuremeter testing, geophysical surveys, and continuous monitoring systems, are discussed with emphasis on their complementary roles in site characterization. The review further summarizes recent advances in laboratory testing, highlighting the application of resonant column devices, bender elements, advanced triaxial apparatus, and cyclic testing for evaluating soil behaviour under static and dynamic loading conditions. Finally, the paper discusses the growing importance of integrating geological interpretation, field measurements, laboratory investigations, numerical modelling, and digital technologies to reduce uncertainty in geotechnical design. The review demonstrates that modern geotechnical investigations increasingly rely on multidisciplinary and integrated approaches rather than individual testing methods, providing more reliable engineering parameters for contemporary infrastructure projects.

Keywords: geotechnical investigations, soil sampling, in-situ testing, laboratory testing, CPTu, triaxial testing, soil characterization, geotechnical engineering.

1. Introduction

Reliable geotechnical design begins with reliable ground characterization. Regardless of the sophistication of analytical methods or numerical models, the quality of engineering decisions cannot exceed the quality of the geological and geotechnical information on which they are based. Consequently, geotechnical site investigation constitutes one of the most important stages of every civil engineering project, providing the information required for the safe design, construction, and long-term performance of geotechnical structures. Insufficient site characterization remains a significant source of uncertainty, frequently contributing to construction delays, unexpected ground conditions, increased project costs, and engineering failures. Comprehensive investigation programmes therefore play a fundamental role in reducing geotechnical risk and improving design reliability.

The rapid development of urban infrastructure, transportation systems, underground construction, offshore engineering, and renewable energy facilities has substantially increased the demands placed on geotechnical investigations. Modern projects require considerably more than the identification of soil layers and groundwater conditions. Contemporary geotechnical engineering relies on the determination of representative mechanical, hydraulic, and dynamic soil properties that accurately describe soil behaviour under various loading conditions. Achieving this objective requires an integrated investigation strategy combining geological interpretation, field exploration, laboratory testing, and engineering judgement rather than relying on isolated testing methods.

During the last decades, remarkable progress has been achieved in both field and laboratory investigations. Conventional borehole exploration has been complemented by advanced in-situ techniques such as Cone Penetration Testing (CPT/CPTu), Seismic Cone Penetration Testing (SCPTu), Flat Dilatometer Testing (DMT/SDMT), pressuremeter testing, and modern geophysical surveys, providing continuous information on soil stratigraphy and engineering properties. At the same time, laboratory investigations have evolved towards

advanced testing systems capable of reproducing complex stress paths, cyclic loading, and dynamic soil behaviour with high precision. These developments have significantly improved the determination of constitutive parameters used in numerical modelling and performance-based geotechnical design [1, 2].

Despite these technological advances, no individual investigation technique is capable of providing a complete description of subsurface conditions. High-quality geotechnical characterization depends on the integration of reliable sampling procedures, complementary in-situ testing, representative laboratory investigations, and appropriate engineering interpretation. Recent developments in digital technologies, automated monitoring, and data-driven analysis further support this integrated approach by improving data management and reducing uncertainty associated with engineering decision-making. However, these technologies complement rather than replace engineering expertise [3].

This review presents a concise overview of contemporary geotechnical investigation methods with particular emphasis on their complementary roles in modern site characterization. The paper discusses recent developments in soil sampling, advanced field investigations, laboratory testing, and integrated geotechnical interpretation while highlighting future directions towards more reliable and sustainable geotechnical engineering.

2. Modern Geotechnical Site Investigation

The primary objective of a geotechnical site investigation is to establish a reliable ground model that accurately represents subsurface conditions and provides representative engineering parameters for design. Since soils are naturally heterogeneous and their properties vary spatially due to geological history, depositional processes, and environmental conditions, uncertainty cannot be completely eliminated. Modern site investigations therefore seek to minimise this uncertainty through systematic planning, appropriate selection of investigation techniques, and integrated interpretation of geological and geotechnical information. A well-designed investigation programme not only improves the reliability of engineering analyses but also reduces construction risks and project costs [1, 4, 5].

A contemporary investigation programme begins with a detailed desk study, during which available geological maps, hydrogeological information, historical site records, previous investigation reports, and remote sensing data are analysed. This preliminary stage provides the basis for selecting appropriate field methods, determining the number and depth of boreholes, and identifying areas requiring more detailed exploration. Such a risk-based approach has become increasingly important for large transportation projects, underground structures, offshore developments, and urban construction, where ground variability may significantly influence design decisions [4].

Borehole investigations continue to represent the fundamental component of geotechnical exploration because they provide direct information on soil stratigraphy, groundwater conditions, and geological features while enabling soil sampling and field testing. However, boreholes describe only discrete locations and may not adequately capture the spatial variability of complex geological formations. Consequently, modern investigation programmes increasingly combine conventional drilling with advanced in-situ testing and geophysical methods to improve the continuity and reliability of subsurface characterization [4, 5, 6].

The scope of site investigation should always reflect the complexity of the engineering project and the potential consequences of geotechnical failure. Projects involving deep excavations, high-rise buildings, tunnels, offshore foundations, or critical infrastructure require substantially more detailed investigations than conventional structures because of the higher demands placed on soil characterisation and numerical modelling. In recent years, adaptive investigation strategies have gained increasing attention. Rather than defining the entire investigation programme at the beginning of a project, additional field exploration is performed whenever newly acquired information indicates greater geological complexity than initially anticipated. Such an approach improves both technical reliability and economic efficiency [5, 7].

An important feature of contemporary geotechnical investigations is the integration of complementary techniques within a single site characterisation programme. Boreholes provide geological verification and enable specimen collection, penetration tests supply continuous mechanical profiles, geophysical surveys improve spatial interpretation, and monitoring systems verify the behaviour of the ground during construction. The value of an investigation programme therefore depends not on the number of individual tests but on the ability to combine multiple sources of information into a consistent engineering ground model [8].

The evolution of modern geotechnical investigations reflects a transition from descriptive site exploration towards quantitative ground characterisation. The emphasis has shifted from identifying soil layers to understanding soil behaviour under anticipated loading conditions. Consequently, field investigations are increasingly designed not as isolated measurements but as the first stage of an integrated process that continues through laboratory testing, engineering interpretation, and numerical modelling.

Engineering implications. A successful geotechnical investigation is achieved through appropriate planning rather than the application of a single advanced testing method. The integration of geological knowledge, borehole observations, field testing, and engineering interpretation provides a reliable basis for design while reducing uncertainty associated with subsurface variability. This integrated philosophy also establishes the framework for obtaining representative soil samples and selecting laboratory investigations appropriate for the engineering problem under consideration [9].

3. Soil Sampling and Advanced In-situ Investigations

The reliability of geotechnical parameters depends not only on the selection of appropriate investigation techniques but also on the quality of soil specimens and the representativeness of field measurements. Consequently, soil sampling and advanced in-situ testing should be regarded as complementary components of a unified site investigation programme rather than independent activities. Their combined application enables the development of reliable ground models while reducing the uncertainty associated with subsurface variability [6, 10].

Obtaining representative soil samples remains one of the greatest challenges in geotechnical engineering. During sampling, soils experience stress relief, mechanical disturbance, and changes in moisture conditions, all of which may modify their natural structure and engineering properties. These effects are particularly pronounced in soft clays, organic soils, and highly sensitive deposits, where even minor disturbance may significantly reduce measured stiffness and undrained shear strength. Therefore, preserving the in-situ structure of the soil is essential for obtaining reliable laboratory parameters [2, 5, 11].

The choice of sampling technique depends on soil conditions and the intended laboratory programme. Thin-walled Shelby tubes continue to be widely used in cohesive soils because they provide satisfactory specimen quality for routine engineering investigations. For advanced laboratory testing requiring minimal disturbance, piston samplers offer significant advantages by reducing stress redistribution during penetration and sample retrieval. Block sampling remains the preferred technique for research applications and high-quality constitutive testing, whereas artificial ground freezing provides one of the few effective solutions for recovering undisturbed specimens from loose sands and gravels. Regardless of the sampling method, careful transportation, storage, and specimen preparation are equally important for preserving sample quality [6, 7, 12].

While sampling provides material for laboratory investigations, modern in-situ testing delivers continuous information on the spatial variability of soil properties. Among available techniques, Cone Penetration Testing (CPT) [23] and the piezocone test (CPTu) have become reference methods for subsurface profiling owing to their repeatability, high resolution, and extensive empirical database. Continuous measurements of cone resistance, sleeve friction, and pore-water pressure enable rapid identification of soil stratigraphy and support the estimation of strength, stress history, and deformation characteristics [2, 13].

The introduction of seismic measurements into penetration testing has further expanded the capabilities of field investigations. Seismic Cone Penetration Testing (SCPTu) combines conventional CPT measurements with shear-wave velocity profiling, providing valuable information on small-strain stiffness and dynamic soil behaviour. Because shear-wave velocity is largely unaffected by sampling disturbance, SCPTu represents an important link between field investigations and advanced laboratory testing [14].

Flat Dilatometer Testing (DMT/SDMT) [24] and pressuremeter testing provide additional information regarding in-situ stiffness, horizontal stress conditions, and deformation characteristics. These techniques are particularly valuable for settlement analyses, foundation design, and the calibration of constitutive models. Rather than replacing CPTu, they provide complementary information describing different aspects of soil behaviour. Consequently, contemporary investigation programmes increasingly combine several field techniques to improve the reliability of engineering interpretation [15, 16].

Geophysical investigations have become an integral part of modern geotechnical exploration. Methods such as seismic surveys and electrical resistivity tomography enable rapid assessment of subsurface continuity and facilitate interpolation between boreholes and penetration tests. Their greatest value lies in improving geological interpretation and identifying spatial variability over large investigation areas. When integrated with conventional geotechnical methods, geophysical surveys significantly enhance confidence in the resulting ground model [17].

Recent developments increasingly combine borehole investigations, advanced in-situ testing, geophysical surveys, and continuous monitoring within a single investigation programme. Such an integrated approach enables engineers to optimise field exploration, verify geological interpretation, and identify zones requiring more detailed laboratory investigation. Rather than maximising the number of performed tests, modern geotechnical practice focuses on obtaining complementary information that improves engineering interpretation while reducing uncertainty associated with design [18].

Engineering implications. Representative soil samples and high-quality field investigations constitute the foundation of reliable laboratory characterisation. Modern site investigations therefore emphasise the complementary use of sampling, penetration testing, geophysical methods, and geological interpretation, ensuring that laboratory testing is performed on representative materials and that field observations are correctly interpreted within the geological framework [2, 7].

4. Advanced Laboratory Characterization of Soils

Laboratory investigations remain indispensable in modern geotechnical engineering because they provide constitutive parameters that cannot be obtained directly from field measurements. While in-situ investigations characterize the spatial distribution of soil properties, laboratory testing enables the evaluation of soil behaviour under controlled stress paths and boundary conditions. Consequently, laboratory investigations play a fundamental role in calibrating constitutive models, verifying empirical correlations, and supporting numerical analyses used in contemporary geotechnical design [15].

The increasing demands of modern infrastructure have considerably expanded the scope of laboratory investigations. In addition to conventional strength, compressibility, and permeability parameters, engineers increasingly require information describing stiffness degradation [25], stress dependency, cyclic response [26], damping characteristics, and pore-pressure generation under repeated loading [27]. Such parameters are essential for the design of transportation infrastructure, offshore foundations, earthquake-resistant structures, energy geostructures, and other facilities subjected to complex loading conditions [8, 16].

The determination of soil stiffness at very small strains [28] has become one of the most important developments in laboratory testing during recent decades. Although serviceability problems are generally associated with small deformations, conventional laboratory equipment often lacks sufficient resolution to determine the corresponding stiffness accurately. Resonant column apparatus and bender element techniques have therefore become standard tools for evaluating the initial shear modulus and wave propagation characteristics of soils. These methods provide parameters that are fundamental for seismic analyses, dynamic foundation design, and advanced constitutive modelling [1, 14].

As deformation increases, advanced triaxial testing [29] becomes the principal laboratory technique for investigating stress–strain relationships. Modern computer-controlled systems allow accurate simulation of drained and undrained loading paths while continuously monitoring pore-water pressure, volumetric strain, and stress evolution. Such capabilities enable the determination of effective strength parameters, deformation characteristics, stress dependency, and critical state behaviour. Compared with conventional testing procedures, advanced triaxial systems provide considerably greater flexibility and allow laboratory conditions to more closely reproduce field loading scenarios [2, 5, 7].

The growing importance of cyclic loading has further stimulated the development of specialised laboratory investigations. Cyclic triaxial and cyclic direct simple shear tests enable the assessment of stiffness degradation, accumulation of permanent deformation, excess pore-water pressure generation, and liquefaction susceptibility under repeated loading. These investigations are particularly important for railways, highways,

offshore structures, machine foundations, and seismic engineering, where long-term performance depends on the response of soils subjected to thousands or millions of loading cycles [16].

Recent laboratory developments also address coupled hydro-mechanical, thermo-mechanical, and unsaturated soil behaviour. Advanced testing systems equipped with suction control, temperature regulation, and automated loading programmes enable investigation of processes associated with energy geostructures, climate change, deep geological repositories, and environmental geotechnics. Such equipment considerably expands the ability of laboratory investigations to reproduce complex field conditions and improves the reliability of engineering predictions [14].

Despite the remarkable progress achieved in laboratory technology, the reliability of measured parameters remains strongly dependent on specimen quality and appropriate testing procedures. Advanced laboratory equipment cannot compensate for disturbances introduced during sampling or inadequate stress reconstruction before testing. Consequently, laboratory investigations should never be interpreted independently but rather as one component of an integrated geotechnical investigation programme combining field observations, high-quality sampling, and engineering judgement.

Engineering implications. Modern laboratory testing has evolved from routine parameter determination towards comprehensive characterization of soil behaviour across a wide range of strain levels. The selection of laboratory methods should therefore be governed by the engineering problem under consideration rather than by the availability of testing equipment. Integrating advanced laboratory investigations with representative sampling and high-quality field measurements provides the reliable parameters required for modern constitutive modelling and performance-based geotechnical design.

5. Integrated Geotechnical Characterization and Future Perspectives

The evolution of geotechnical investigations over recent decades has demonstrated that reliable site characterization cannot be achieved through the application of a single investigation technique. Instead, contemporary geotechnical engineering increasingly adopts integrated investigation strategies in which geological interpretation, field observations, laboratory testing, monitoring, and numerical analyses are treated as complementary components of a unified engineering process. This integrated philosophy significantly improves the reliability of engineering parameters and reduces uncertainties associated with spatial variability and soil behaviour [19].

The development of a representative ground model constitutes the principal objective of modern site investigations. Such models combine information obtained from desk studies, borehole investigations, advanced in-situ testing, laboratory experiments, groundwater observations, and geophysical surveys into a consistent interpretation of subsurface conditions. Rather than considering individual datasets independently, engineers increasingly integrate complementary sources of information to verify geological interpretation, improve parameter estimation, and support engineering judgement. This multidisciplinary approach provides a substantially more reliable basis for geotechnical design than any individual investigation technique alone [20]. The rapid development of digital technologies has further enhanced the efficiency of integrated site characterization. Three-dimensional geological modelling, geostatistical interpolation, automated data acquisition, continuous field monitoring, and machine learning algorithms increasingly assist engineers in processing large and complex datasets [30]. These technologies improve the consistency of engineering interpretation, facilitate uncertainty assessment, and support the optimisation of investigation programmes. Nevertheless, digital tools should be regarded as decision-support systems rather than replacements for engineering expertise, as reliable interpretation still requires a thorough understanding of geological processes and soil mechanics [19, 21].

Future developments in geotechnical investigations are expected to focus on further integration of field observations, laboratory testing, numerical modelling, and continuous monitoring within unified digital workflows. Such approaches will facilitate real-time updating of geotechnical models during construction and operation, improving both the safety and sustainability of civil engineering infrastructure. At the same time, the growing complexity of engineering projects will require closer cooperation between geotechnical engineers, engineering geologists, geophysicists, structural engineers, and data scientists. The future of geotechnical

investigations therefore lies not in replacing established methods, but in integrating complementary techniques into coherent engineering decision-making frameworks [22].

Engineering implications. The principal objective of modern geotechnical investigations is no longer the collection of individual test results but the development of a reliable engineering ground model. The integration of high-quality sampling, advanced field investigations, laboratory characterization, monitoring systems, and engineering interpretation provides the most effective strategy for reducing uncertainty and supporting safe, economical, and sustainable geotechnical design.

6. Conclusions

Modern geotechnical investigations have evolved from conventional subsurface exploration towards integrated site characterisation combining geological interpretation, advanced field investigations, laboratory testing, monitoring systems, and numerical modelling. This evolution reflects the increasing complexity of contemporary infrastructure projects and the growing demand for reliable engineering parameters [31].

The review demonstrates that the quality of geotechnical design depends primarily on the quality of the investigation programme rather than on the application of any single testing technique. High-quality soil sampling, complementary in-situ investigations, and advanced laboratory testing each provide unique information regarding soil behaviour and should therefore be interpreted collectively within a consistent geological and engineering framework.

Recent advances in digital technologies, automated monitoring, and data-driven interpretation have considerably improved the efficiency of geotechnical investigations. However, engineering judgement remains essential for the interpretation of field and laboratory data, and digital tools should be regarded as supporting rather than replacing professional expertise.

Future progress in geotechnical engineering will increasingly rely on integrated investigation strategies capable of combining multiple sources of information into representative ground models that improve the reliability of engineering analyses and contribute to safer, more resilient, and more sustainable infrastructure.

References

- [1] Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system—An updated overview. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(10), 1910–1927.
- [2] Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic & Professional.
- [3] Mayne, P. W., Christopher, B. R., & DeJong, J. (2002). Subsurface investigations. *Geotechnical Special Publication*, 108, 1–25.
- [4] Marchetti, S. (1980). In situ tests by flat dilatometer. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(GT3), 299–321.
- [5] Schmertmann, J. H. (1986). Dilatometer to compute settlement and bearing capacity. In *Proceedings of the In Situ '86 Conference*.
- [6] Burland, J. B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40(3), 329–378.
- [7] Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., & Lo Presti, D. C. F. (1994). Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays. In *Proceedings of the 8th ECSMFE*.
- [8] Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89–107.
- [9] Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612–624.
- [10] Hight, D. W., Bond, A. J., & Legge, J. D. (2013). Characterisation of the natural variability of soils and the implications for geotechnical design. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, 166(2), 117–132.
- [11] Konkol, J., et al. (2023). Influence of soft soil samples quality on compressibility parameters and undrained shear strength. [source article].

- [12] Fanelli, S., Reiffsteck, P., Pilnière, F., Jadé, F., Mauxion, J., & Rebour, J. (2023). Laboratory evaluation of sampling quality of a new A+ sampler for natural fine soils. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*.
- [13] Lai, F., et al. (2024). Integrating CPTU and SDMT to calibrate soil constitutive model. *[journal article]*.
- [14] Oberhollenzer, S., Lande, E. J., & Ritter, S. (2024). The influence of soil structure on CPTu and SDMT results. In *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*.
- [15] Chapman, M., & McConnell, A. (2024). In situ testing of a very soft and soft marine soil deposit in Sydney Harbour using latest CPTu, Medusa DMT and down-the-hole vane shear devices. In *Australian Geomechanics Society Sydney Chapter Symposium*.
- [16] Chiaradonna, A., & Monaco, P. (2024). Estimation of the soil cyclic resistance by flat dilatometer accounting for the fines content effect. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 10, 1013–1018.
- [17] Młynarek, Z., et al. (2023). The use of CPTU and DMT methods to determine soil parameters. *[journal article]*.
- [18] Agustian, Y., Komarudin, U., & Ardiansyah, N. P. (2024). Gangguan sampel i jejego wpływ na właściwości gruntów w badaniach laboratoryjnych: Literature review. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 30(1), 36–46.
- [19] Wang, Y., Tian, Y., et al. (2024). *Digital geotechnics: from data-driven site characterisation towards digital transformation and intelligence in geotechnical engineering*. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*.
- [20] Yousefpour, N., Liu, Z., & Zhao, C. (2025). Machine learning methods for geotechnical site characterization and scour assessment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- [21] Shi, J., Wang, Y., et al. (2021). Three-dimensional geological modeling and spatial visualization of urban geotechnical drilling data. *Engineering Geology*, 284, 106047.
- [22] Yuan, B., Choo, C. S., Yeo, L. Y., Wang, Y., Yang, Z., Guan, Q., Suryasentana, S., Choo, J., Shen, H., Megia, M., Zhang, J., Liu, Z., Song, Y., Wang, H., & Chen, X. (2025). Physics-informed machine learning in geotechnical engineering: A direction paper. *Geomechanics and Geoengineering*.
- [23] Bajda Marek, Lech Mariusz, Osiński Piotr, Koda Eugeniusz. (2025). The CPT-Based Investigation of Mechanical Parameters of Waste Disposed on Restored Landfill Adopted for Green Energy Development. *Environmental Geotechnics and Pollution Control. Proceedings of EGRWSE 2024*, 1. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 1, Springer, 379-388.
- [24] Rabarijoely Simon, Markowska-Lech Katarzyna, Bajda Marek, Lech Mariusz, Seta Małgorzata Wioleta. (2025). Assessment of geotechnical conditions of the building based on dilatometer tests. *Inżynieria i Budownictwo*, LXXXI, 5, 590-596.
- [25] Gabryś Katarzyna, Emil Soból, Wojciech Sas, Alojzy Szymański. (2018). Material damping ratio from free-vibration method. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, 50, 83-97.
- [26] Gluchowski Andrzej, Šadzevičius Raimondas, Varnas Nerijus, Wojciech Sas (2024). Cohesive soil behavior under cyclic loading in undrained conditions. *International Journal of GEOMATE*, 27, 19, 70-77.
- [27] Gluchowski Andrzej, Soból Emil, Szymański Alojzy, Wojciech Sas. (2019). Undrained pore pressure development on cohesive soil in triaxial cyclic loading. *Applied Sciences-Basel*, 9, 18, 1-23.
- [28] Markowska-Lech Katarzyna, Sas Wojciech, Lech Mariusz, Katarzyna Gabryś, Alojzy Szymański. (2018). The small strain stiffness from bender elements tests for clayey soils. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, 50 (4), 353-371.
- [29] Gabryś Katarzyna, Dołyż-Szypcio Katarzyna, Szypcio Zenon, Wojciech Sas. (2023). Stress–strain behavior of crushed concrete as a special anthropogenic soil. *Materials*, 16, 23, 1-16.
- [30] Olga Szlachetka Olga, Dziecioł Justyna, Witkowska-Dobrev Joanna, Nagirniak Mykola, Dohojda Marek, Sas Wojciech. (2026). Machine Learning as a Tool for Sustainable Material Evaluation: Predicting Tensile Strength in Recycled LDPE Films. *Sustainability*, 18, 2, 1-29.
- [31] BS EN 1997-1:2024 EUROCODE 7. Geotechnical Design. General Rules. *European Standards*.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ДИСТАНЦИОННО ГЕОТЕХНИЧЕСКО КАРТИРАНЕ ЧРЕЗ UAV-БАЗИРАНА ФОТОГРАМЕТРИЯ В РУДНИК ЕЛАЦИТЕ

Iv. Vasilev, Dipl. Eng. – i.vasilev@ellatzite-med.com

ABSTRACT

This paper presents a structured approach for performing remote geotechnical mapping in the Elatsite open pit mine using UAV-based photogrammetry. The study focuses on the applied hardware platforms, image acquisition techniques, and specialized software tools used for data processing and generation of high-resolution three-dimensional models. Particular emphasis is placed on the adopted workflow and methodology for extracting and interpreting geomechanical parameters of the rock mass. The advantages of the proposed remote mapping approach in terms of improved safety, data accuracy, and operational efficiency are discussed, demonstrating its applicability for geotechnical and geomechanical assessments in open pit mining operations.

Keywords: geomechanics, geotechnical mapping, photogrammetry, UAV, open pit mine, rock mass.

1. Въведение

Геотехническото (геомеханично) картиране е незаменим инструмент за систематична и подробна оценка на геоложките и физико-механичните характеристики на даден обект. Чрез него се получава важна информация, необходима за проектирането, изграждането и последващия мониторинг на инфраструктурни проекти в скалисти терени. То е и основен инструмент за характеризирание на геоложките условия в подземните и открити рудници.

В откритите рудници и кариери процесът на геотехническо картиране позволява да се извърши идентифициране и анализ на геоложките и геомеханичните характеристики на скалната маса с цел оценка на нейната стабилност и проектиране на рудничния борд с оптимални ъгли на откосите и широчини на стъпалата (берми).

В основата на процеса е геоложкото картиране. То се фокусира върху идентифицирането и описанието на литоложките единици и геоложките структури, присъстващи в района на изследване. При него геологът идентифицира наличните различни литоложки единици въз основа на техните характеристики, като петрографски тип, минераложки състав, цвят, текстура и структура.

Данните, събрани по време на геоложкото картиране, се използват за изготвяне на двумерни и тримерни геоложки модели, които представят разпределението на литоложките единици и геоложките структури в района на изследване. Това е от решаващо значение за разбирането на регионалната геология и установяването на геоложкия контекст на минните дейности.

Геотехническото картиране се фокусира върху характеризирането на скалните прекъсвания, които са равнини на счупване, разделящи скалната маса на отделни блокове. Допълнително се извършва оценка на скалните откоси съгласно препоръките на Международната асоциация по скална механика (ISRM) и международно приетите системи за класификация на скалите. Този тип картиране се извършва основно за оценка на стабилността на изкопите, тъй като прекъсванията могат да генерират склонова нестабилност като свличане или срутване на скални блокове.

Десетилетия наред класическата геотехническа картировка, базирана на директни теренни наблюдения, беше основният инструмент за идентифициране и характеризирание на структурните особености на скалния масив. Въпреки своята висока информативна стойност, този подход е ограничен от субективността на наблюдателя, невъзможността за пълно покритие на рудничната повърхност и високия риск за персонала при работа по стръмни и труднодостъпни откоси.

През последните 15÷16 години използването на безпилотни летателни апарати (Unmanned Aerial Vehicles – UAV) навлезе бързо в откритите рудници, като осигури гъвкав, икономически ефективен и лесно приложим метод за генериране на орторектифицирани изображения и плътни 3D модели.

Развитието на дистанционните методи за събиране на пространствена информация доведе до качествена промяна в начина, по който се събират и анализират структурни данни. В наши дни дистанционната геотехническа картировка е от голямо значение, особено в мащабни открити рудници с високи откоси и сложна структурна геология, като значително намалява риска за персонала и увеличава пространственото покритие на наблюденията.

2. Ретроспекция на развитието и приложението на UAV в рудник Елаците

Първите приложения на UAV в рудник Елаците (2000÷2010 г.) са епизодични и насочени основно към топографски заснемания. През периода 2012÷2015 технологията започва да се използва за изчисляване на обеми и контрол на взривните дейности.

При геотехническите мероприятия приложението на UAV стартира през 2015 год. с визуална инспекция на рудничните площадки и откоси. Постепенно се пристъпи към картиране на големи структури, при което с помощта на ръчни или полуавтоматични инструменти се дигитализират и измерват геоложки граници, гънки, тектонски нарушения и др. по-големи структури. Геотехническата интерпретация през този период остава ограничена поради недостатъчната точност на камерите и липсата на устойчиви алгоритми за фотограметрична реконструкция.

С развитието на Structure from Motion (SfM) и Multi View Stereo (MVS) алгоритмите (2018÷2023 г.) UAV-базираната фотограметрия започва да намира широко приложение във виртуалната структурна картировка. Появяването на автоматизирани алгоритми за извличане на структурна информация позволява извличане на ориентации и геометрични параметри на скалните прекъснатости със сравнима или по-висока статистическа надеждност спрямо теренните измервания. Бързото развитие на UAV технологиите през този период позволи извършването на бързо и мащабно заснемане на цели бордове и руднични пространства, включително зони, недостъпни или опасни за класически теренни измервания, като улесни прехода от кампанийни измервания към почти непрекъснат мониторинг. Понастоящем UAV-фотограметрията вече осигурява изключително висока пространствена резолюция, подходяща за детайлна структурна картировка и кинематичен анализ.

В момента в рудник Елаците UAV се използва като пълноценен геотехнически инструмент, а дистанционната геотехническа картировка е неразделна част от интегрираните системи за управление на геотехническия риск и се използва целенасочено за:

- Топографско заснемане;
- Визуална инспекция на труднодостъпни зони;
- Виртуална структурно-геоложка картировка;
- Автоматично извличане на 3D ориентации и др. параметри на скалните прекъснатости;
- Класификация на скалните прекъснатости и определяне на статистическите им параметри;
- Обективно определяне на доминиращи структурни системи;
- Количествена оценка и анализ на кинематичната устойчивост;
- Идентифициране и интерпретиране на геотехническите домейни;
- Калибриране на геотехническите модели за стабилност на откосите;
- Мултitemпорален деформационен мониторинг и ранно идентифициране на потенциално нестабилни зони;
- Анализ на деформационни процеси и прогресивни разрушения.

3. Използвано оборудване

Дистанционната геотехническа картировка в рудник Елаците се извършва по метода на въздушната фотограметрия, като се използва индустриален дрон DJI Matrice 350 RTK с камера DJI Zenmuse P1, имаща DL 35mm F2.8 LS ASPH обектив.

Дронът се характеризира с висока устойчивост и здрава конструкция, което позволява ежедневна експлоатация. Той може да носи различни сензори, една или повече камери с висока разделителна способност или LiDAR. Системите му осигуряват стабилност и сигурност по време на полет, като

подпомагат избягването на препятствия и дават възможност за следене (при нужда) на движещи се обекти. Чрез тях могат да се отчитат климатични фактори като температура, атмосферно налягане, влажност, електрическо и магнитно поле и други.

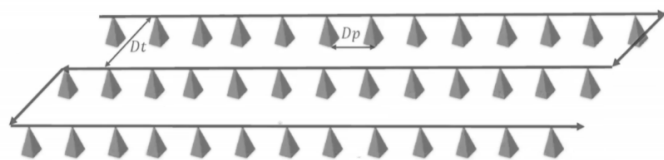
Дронът е създаден специално за извършване на дистанционно картографиране, поради което допълнително е оборудван с:

- Съвременен GNSS (глобална сателитна навигационна система) приемник, помагач за точното локализиране на дрона във въздуха във всеки един момент от полета;
- Възможност за обработка на данните с технологиите RTK (Real Time Kinematic) и PPK (Post-Processing Kinematics), чрез които могат да се коригират често срещаните грешки на системите за сателитна навигация, за да се подобри точността на позиционирането на дрона (до 1 cm), а оттам и на изследваните и картирани данни;
- Инерционна навигационна система за изчисляване на относителната позиция, ориентация и скорост на дрона.

Всички специалисти на отдел „Геотехнически“ на рудника са преминали обучение за дистанционно управляващи пилоти (подкатегории A1/A3) и специализирано обучение за работа с дрона.

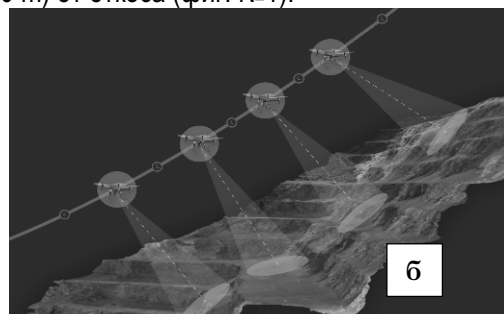
4. Методика на извършването аеро-фото заснемане

За разлика от земната фотограмметрия, при въздушната не се правят т.нар. стереодвойки, а се извършва последователно заснемане с множество снимки на картираната площ със 70÷80 % застъпване между тях. Поради това дронът лети автономно на ивици (изпълнявайки предварително разработен план на мисията) с постоянна скорост по предварително определена траектория, поддържайки постоянно разстояние (в повечето случаи $50 \div 100$ m) от откоса (фиг. №1).



- D_p ... Interphoto distance
- D_t ... Intertrack distance

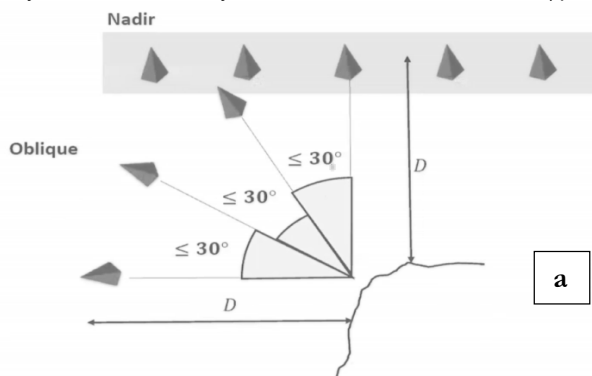
a



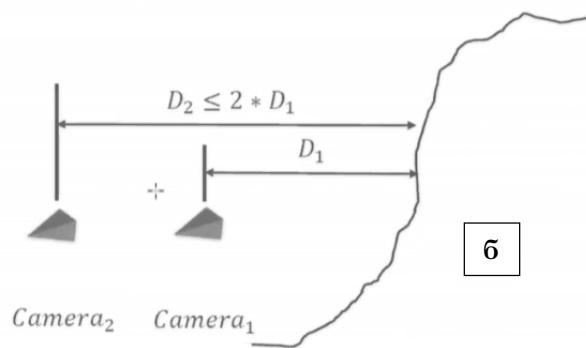
b

Фиг. №1. а – план на вертикалните снимки с предварително зададени разстояния между отделните снимки в редовете и между отделните редове в полета; б – илюстриране на отделните ивици (редове) изпълнявани от дрона, поддържайки постоянно разстояние от скалния откос.

Изображенията се заснемат автоматично с вертикален, наклонен и хоризонтален ъгъл на камерата. В повечето случаи ъгълът между отделните снимки е $30^\circ \div 40^\circ$ (фиг. №2).



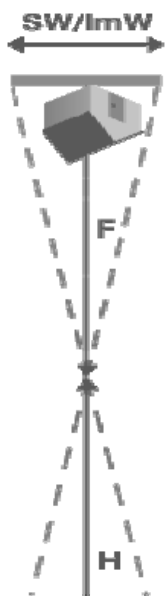
a



b

Фиг. №2. а – илюстриране на положението на камерата спрямо откоса при прелитането на дрона в отделните ивици; б – максимално допустимо разстояние на отделните снимки до откоса.

Преди започване на полета за извършване на картировка с въздушна фотограметрия се определя необходимата стойност на GSD (Ground Sampling Distance), за да се коригира височината на полета в зависимост от спецификациите на камерата и изискванията на проекта.



Фиг. №3.

Например: GSD от 5 cm означава, че един пиксел в изображението представлява линейно 5 cm на земята ($5 * 5 = 25 \text{ cm}^2$), а GSD от 30 cm, че един пиксел в изображението е 30 cm на земята ($30 * 30 = 900 \text{ cm}^2$).

Стойността на GSD се изчислява (фиг. №3) въз основа на:

- Височината на полета/разстоянието от фотокамерата до терена или обекта (H).
- Спецификациите на камерата: Ширина на изображението (ImW); Ширина на сензора (SW); Фокусно разстояние (F).

Колкото по-голяма е стойността на GSD, толкова по-ниска е пространствената разделителна способност на изображението и по-малко са видимите детайли в него. Когато е необходима подробна реконструкция на района, е необходимо да се лети по-близо (ниска стойност на GSD) до обекта, който представлява интерес. GSD оказва влияние и на точността на крайния модел, като точността в хоризонтална посока е приблизително $\leq 1 \text{ GSD}$, а точността във вертикална посока - приблизително $1 \div 2 \text{ GSD}$.

Стойността на GSD при извършваната в рудник Елаците геотехническа картировка е 1 cm.

5. Реконструкция на 3D модели

За реконструкцията на 3D моделите се използва софтуерният продукт DJI Terra. Това е цялостно приложно решение за геодезия и картографиране, с приложение в множество индустрии, като пренос на електроенергия, строителство, транспорт, селско стопанство и аварийни ситуации.

Софтуерът прецизно анализира всяка снимка, за да изчисли нейната точна позиция и ориентация в триизмерното пространство. С помощта на позиционните данни, той изгражда подробен и точен 3D модел на рудничните откоси. Създават се геореферирани цифрови изображения, ортомозайки (TDOM) и подробни 3D модели: детайлни повърхнини (mesh), цифрови повърхностни модели (DSM), 3D облаци от точки (point cloud). След класификация на земната повърхност, той може да изведе цифров модел на релефа (DEM).

Чрез използване на мултиспектрални данни могат да се изготвят индексни карти на растителността, включително NDVI и NDRE, за да се осигури представа за растежа и здравето на растенията. Поддържа се радиометрична корекция и могат да се генерират карти на отражението за изследвания с дистанционно наблюдение.

Алгоритъмът му е оптимизиран, за да подобри значително ефективността на обработката, ефективно да избегне изкривяването и деформацията на изображението и да получи подробни и точни резултати от измерването за всички целеви обекти и зони на изследване.

За подобряване на качеството на 3D моделите и за оценка на точността софтуерът използва автоматични свързващи точки (ATP), наземни контролни точки (GCP) и контролни точки (CP). GCP и ATP се използват за подобряване на абсолютната и относителната точност на фотограметричния модел, докато CP се използват за оценка на качеството. ATP се извличат автоматично от изображенията в началната стъпка на обработка.

За GCP и CP се изчисляват следните показатели за грешка:

- Средната грешка във всяка посока (x, y, z);
- Стандартното отклонение на грешката във всяка посока (x, y, z);
- Средно квадратична грешка във всяка посока (x, y, z).

6. Методика на извършване на геотехническата картировка

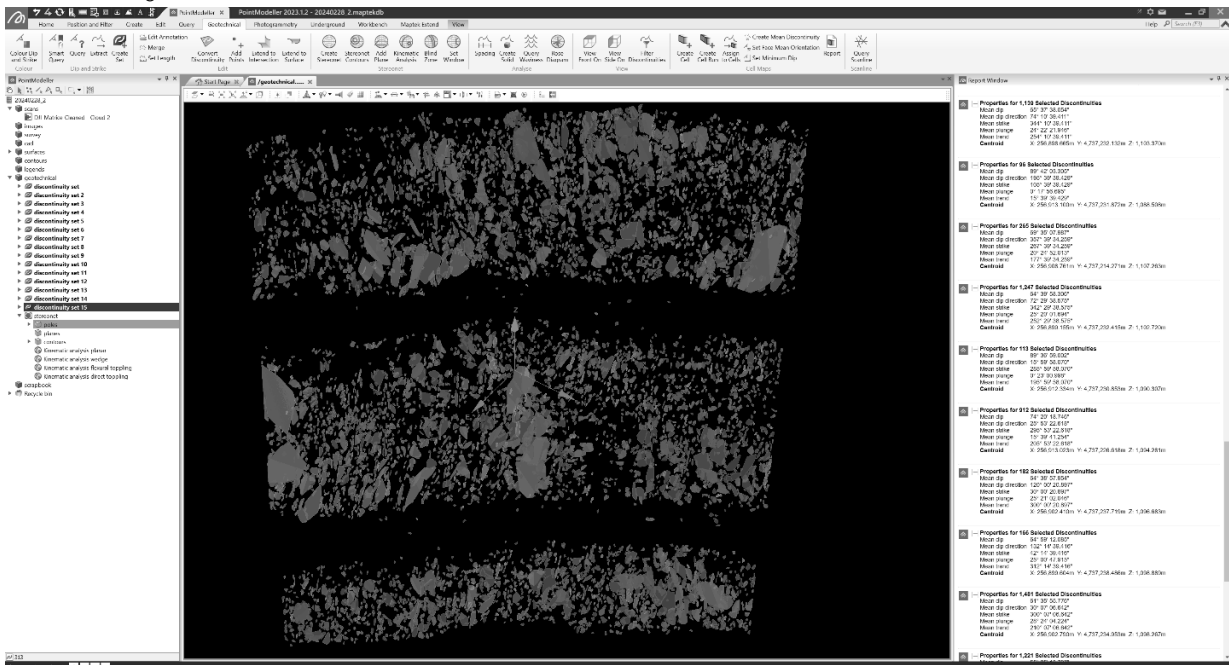
При извършването на дистанционната геотехническа картировка в рудник Елаците се използва основно софтуерът PointStudio на австралийската компания MAPTEK. Това е интуитивен пакет за обработка и моделиране на облаци от точки за минни, граждански, геоложки и геодезични приложения. Той притежава интуитивни инструменти за обработка и комбиниране на данни от облаци от точки, получени от лазерни скенери, фотограмметрия, UAV или други сензори.

PointStudio притежава CAD интерфейс и предоставя инструменти за георефериране, моделиране, анализ, точно измерване, количествено определяне и анализ на съответствието с дизайна. Той поддържа множество формати на данни и с негова помощ могат да се изготвят професионални доклади.

Софтуерният пакет се състои от следните модули:

- **Photogrammetry** – за обработка и георефериране на изображения от дрон, извличане на детайлни облаци от точки, генериране на текстурирани повърхнини и експортиране на ортомозайки;
- **Position and Filter** - съдържа общи опции, свързани с позициониране на облаци от точки в реалните координати, опции за манипулиране и филтриране за почистване на данни;
- **Maptek Workbench** - за лесно настройване на автоматични и стандартизирани работни процеси, и за оперативна съвместимост с други софтуерни решения на Maptek;
- **Underground Tools** - предназначен за приложение при подземни проучвания;
- **Query** - предлага инструменти за анализ, изчисляване и генериране на пълни отчети за резултатите. В модула са включени няколко полезни инструменти за анализ, като:
 - **Design Conformance** – за сравнение на фактически изпълнената повърхност на рудничния котлован с проектната или други повърхности;
 - **Inter-Ramp Compliance Reporting** - за анализ на постигнатите ширини на бермите, ъгли на единичните откоси, пакети от стъпала, общия ъгъл на наклона и широчина на участъците;
 - **Fragmentation Analysis** – за пространствено анализиране и класификация на фрагментацията на скалната маса след взривяване;
 - **Haul Road Tools** - интуитивни инструменти за анализ и отчитане на съответствието на транспортните пътища, подобряващ процесите на проектиране и помагач за намаляването на оперативните разходи;
 - **Rock Bolt Analysis** – предназначен основно за подземни мини, за анализ на разпределението на скалните болтове и подобряване на безопасността;
- **Geotechnical Tools** - инструменти за картиране, геотехнически анализ на структури и извършване на кинематичен анализ. Те позволяват работа както директно върху облак от точки, така и върху триангулирана повърхнина (mesh). С инструментите в модула може:
 - Да се направи автоматично (фиг. №4), полуавтоматично или ръчно измерване на примерната ориентация в пространството на различни геоложки структури (разломи, пукнатини, граници, фолиация и др.);
 - Да се удължат равнините на прекъсване (например с цел пресичането им с рудничната повърхнина или други скални структури);
 - Да се генерират твърди тела, ограничени от отделните скални прекъсвания;
 - Статистически да се изчисли вариацията и средното разстояние на групите скални прекъсвания;
 - Да се определи показателя за качеството на скалите (RQD);
 - Да се измери макро грапавостта на скалните плоскости и статистически да се изчисли вариацията и средната ѝ стойност;
 - Да се направи вероятностен кинематичен анализ на стабилността на откосите за клиновидно и плоско свличане, както и за прекатурване;
 - Да се направи автоматично картиране по сканираща линия или в клетъчна мрежа;

- Да се изготвят автоматични професионални отчети с персонализирани шаблони, в които да се прикачват карти, снимки и документи.



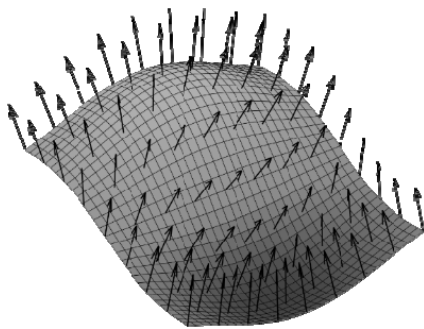
Фиг. №4. Автоматично извлечените скални прекъснатости, класифицирани по групи. В Report Window (панела в дясната част на екрана) са изписани основните статистически характеристики за всяка една от групите.

По време на софтуерната обработка на структурните данни, придобити от дистанционното геотехническо картиране, в рудник Елаците се използват следните специализирани техники:

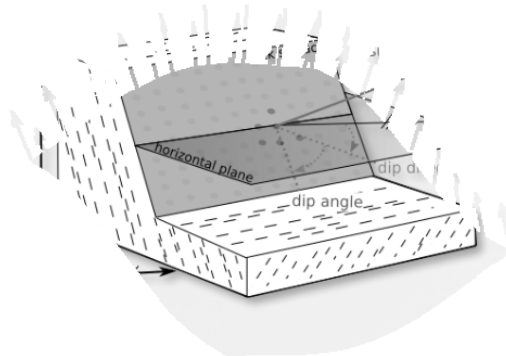
- **Картиране на големи структури.** С помощта на ръчни или полуавтоматични инструменти се дигитализират, картират и измерват геоложки граници, гънки, тектонски нарушения и други големи структури. Това се извършва на принципа на ръчното очертаване, аналогично на работа с молив и хартия.
- **Картиране и количествено определяне на характеристиките на пукнатинните групи.** Т.е. полуконтролирана идентификация, клъстеризиране и класификация на скалните прекъснатости, групирането им в пукнатинни групи, и последващ статистически анализ на техните характеристики: 3D ориентация, дължина, размер на блоковете между тях, дебелина и грапавост. Измерването на ориентацията на равнинните структури (като повърхности на пукнатини или плоскости) се извършва чрез определяне на нормални вектори за всяка една точка от 3D облака (фиг. №5) или триъгълен елемент (фасета) от повърхнината. Целта е да се открият групи от равнинни прекъсвания в скални склонове с подобна ориентация между равнините във всяка група (фиг. №6). Този подход се основава на предпоставката, че равнините се определят от точки, заобиколени от други точки с нормали с подобна ориентация (в определени диапазони). Следователно, за да се идентифицират точки или площи, образуващи равнини, е необходимо да се изчислят нормалите за всяка една от тях. Разбира се, прекъсванията в скалните маси не са напълно плоски, но в повечето случаи те се доближават до равнини. Освен това повърхностите показват неравности, различни по отношение на грапавост и вълнообразност.
- **Картиране по сканираща линия.** Тази техника позволява количествено картиране на структурните прекъсвания и определяне на някои от геотехническите им характеристики. При нея върху лицето на откоса се изчертава измервателна линия (сканираща) и всяка структура,

която я пресича се характеризира чрез измерване на нейната ориентация, разстояние, отвор, и т.н. Сканиращите линии обикновено са с дължина от около 30 m и данните по тях да се събират от множество места в единичен откос, след което да се обработят статистически.

- **Клетъчно картиране.** Картирането на клетка се извършва във въображаем правоъгълник (често квадрат) върху скалния откос и изследва структурите, попадащи в него. Обикновено вертикалният размер на прозореца съответства на височината на скалния откос. Клетките могат да бъдат ръчно или автоматично генерирани върху лицето на откоса, като картиране може да се извършва в непрекъсната линия по всяко картирано стъпало или в правилна или шахматна мрежа, с клетки на определено разстояние една от друга.



Фиг. №5.



Фиг. №6.

От съществено значение при извършването на дистанционната картировка е използването на плътен облак от точки. По-плътните 3D облаци от точки водят до по-висока резолюция, по-подробни текстури и подобрена прецизност.

Заклучение

Съвременното развитие на техниката и технологиите изискват и в мините да бъдат използвани все по-високоэффективни, точни и надеждни средства и системи за наблюдение, контрол и управление на технологични процеси. През последните двадесетина години за тази цел все по-често започват да се използват безпилотните летателни апарати. С тяхна помощ минните специалисти изпълняват множество дейности, свързани с проучването, подготовката и експлоатацията на находищата и тяхната рекултивация. Използването на тези иновативни технологии води до отключване на неизползван потенциал, оптимизиране на оперативните процеси и намаляване на експлоатационните разходи (установено е, че за някои дейности икономии могат да достигнат до 90% от разходите на час) при добива на полезни изкопаеми. От особено важно значение е и използването на дрони за превенция на риска от аварии и злополуки, както и за осигуряването на здравословна и безопасна работна среда. Използването на БЛС и последващата обработка със специализирани фотограметрични технологии, при извършването на дистанционна геотехническа картировка в откритите рудници има следните важни предимства:

- По-малка цена в сравнение с други инструменти и методи;
- По-висока мобилност;
- Позволява улавянето на висококачествени визуални детайли, включително текстури и цветове, което прави технологията предпочитана за приложения, при които визуално реалистичното представяне на околната среда е основно изискване при геотехническата картировка;
- Повишава безопасността при работа, тъй като редуцира времето за престой на персонала на терен под скалните откоси и др. Полевите дейности се извършват бързо и от безопасно разстояние, като не е нужно геолозите да стоят в близост до машини или непосредствено под високи откоси, както и да се катерят по просипите под тях;



- Не е задължително персоналът да има достъп до обекта на картировка;
- Едновременно със скалните откоси могат да бъдат картирани и площадките на рудничните стъпала, което позволява по-доброто идентифициране и оконтуряване на зони с прояви на деформационни процеси (чрез точно измерване на слягане, разривни пукнатини на опън и срязване и др.) в рудничните бордове, дори в недостъпни райони;
- Възможни са измервания на геоложки структури (като зони на срязване, разломи, пукнатини, геоложки граници, гънки, фолиации и др.), намиращи се на по-голяма височина по лицето на скалния откос (недостъпни за специалиста, извършващ конвенционална картировка);
- Извършват се по-точни метрични измервания (3D ориентация, наклони, дължини, разстояния, площи, обеми, грапавост и др.). Върху измерванията не оказва влияние магнитната деклинация, наличието на магнитни минерали (което е нормално в рудниците за добив на метални полезни изкопаеми), размера на капака на геоложкия компас (определящ минимална площ на измерване) или мястото на поставянето му. От значение в случая е фактът, че скалните прекъсвания не са напълно плоски и софтуерите за геотехническа картировка определят техните равнини на базата на множество измервания с използването на МНМК;
- Позволява автоматична идентификация, клъстеризиране и класификация на скалните прекъснатости (определяне на основните пукнатинни групи), и последващ надежден математико-статистически анализ на техните характеристики;
- Условиата и характеристиките на скалния масив се определят обективно и възпроизводимо.
- Получените 3D модели представляват своеобразен геотехнически екзекутив на скалните откоси, който винаги може впоследствие допълнително да бъде отново анализиран, включително и от други специалисти.

Въпреки изброените по-горе предимства, трябва да се има предвид, че засега с дистанционните методи не е възможно да бъдат определени микро-неравностите на геоложките структури, наличието на стриации, вида на пълнежа на разломните зони, количеството вода, изтичаща от пукнатините в скалния откос, вида на минерализацията и др. Това налага успоредно с дистанционната картировка, където това е възможно, да се извършват (макар и за кратко и с по-малка честота) и огледи и картировки на място.

**ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРИ НАЗЕМНОТО ЛАЗЕРНО СКАНИРАНЕ В ПОДЗЕМНОТО МИННО
СТРОИТЕЛСТВО И ПРАКТИЧЕСКИ ПОДХОДИ ЗА ТЯХНОТО ПРЕОДОЛЯВАНЕ**

Марко Марков

Университет по архитектура, строителство и геодезия, София, България, markomarkov8@abv.bg

**CHALLENGES OF TERRESTRIAL LASER SCANNING IN UNDERGROUND MINING CONSTRUCTION
AND PRACTICAL APPROACHES TO THEIR MITIGATION**

Marko Markov

ABSTRACT

This paper examines the application of terrestrial laser scanning (TLS) for the generation of three-dimensional models and the analysis of the geometric characteristics of mining infrastructure within underground construction environments. The technology provides highly detailed spatial information in the form of high-resolution point clouds, enabling the development of Digital Terrain Models. The study discusses the principal stages of data acquisition and processing, as well as the specific challenges associated with operating in underground environments. Drawing upon practical field experience, a set of recommendations and best-practice guidelines is proposed to support the effective implementation of TLS in the mining sector.

Keywords: Terrestrial Laser Scanning, point cloud, Underground construction, Digital Terrain Models

1. Въведение

В класическата геодезическа практика мониторингът на деформации на инженерни съоръжения се основава предимно на периодични измервания на дискретни контролни точки, реализирани чрез високоточни тотални станции и/или прецизни нивелири [8]. Този подход позволява получаването на надеждни резултати предпоставка за анализ на поведението на съоръженията във времето. Включително, могат да бъдат направени анализи на зависимости между преместванията и външни фактори като натоварване на стената вследствие на водното ниво или климатични условия [14].

Независимо от високата си точност, измерванията на единични точки представлява съществено ограничение, тъй като не осигурява пълна пространствена информация за изследвания обект. Това е особено важно при сложни инженерни съоръжения и минни изработки, където локални деформации могат да останат нерегистрирани при недостатъчна гъстота на точките от контролно измервателната система (КИС).

В тази връзка, през последните години все по-широко приложение в световен мащаб намират технологиите за наземно лазерно сканиране, които позволяват бързо и детайлно заснемане на обекти под формата на облаци от точки с висока разделителна способност. Тези данни създават предпоставки за изграждане на високодетайлни тримерни модели и за извършване на пространствен анализ с висока степен на изчерпателност [2].

Приложението на наземното лазерно сканиране в подземното минно строителство поставя обаче редица специфични предизвикателства, свързани с особеностите на средата, ограничената видимост и трудностите при геореферирание. Това налага разработването и прилагането на адаптирани подходи за ефективно използване на технологията.

2. Методологични аспекти на наземното лазерно сканиране при моделиране на минни обекти

Наземното лазерно сканиране се утвърждава като високоефективен инструмент за пространствено моделиране на сложни инженерни обекти, като неговата основна стойност произтича

не толкова от точността на самото измерване, колкото от възможността за получаване на пространствени данни с висока резолюция, предполагаща една детайлна последваща интерпретация. В този контекст, облаците от точки следва да се разглеждат не просто като резултат от измерване, а като носител на информация, подлежаща на трансформация в аналитични модели. Те съдържат набори от данни, описващи координатите на множеството от точки, допълнени с атрибути като цвят (RGB), интензитет на отражението и др. В този смисъл, ефективното приложение на наземното лазерно сканиране в минното дело изисква не само познаване на измервателната технология, но и специфичен подход към обработката и интерпретацията на получените пространствени данни [1].

Методологично процесът на създаване на примерен модел може да бъде структуриран като последователност от етапи, включващи планиране на измерванията, акумулиране на данни, регистрация, обработка и анализиране [6].

Етапът на планиране има за цел да дефинира обхвата на изследването, необходимата степен на изчерпателност на модела и конфигурацията на сканиращите позиции. Основен принцип е осигуряването на достатъчно припокриване между отделните „сканове“ (регистрирани облаци от точки, при всяка отделна позиция на лазерния скенер), което е предпоставка за последващата им успешна интеграция.

Същинските измервания се осъществяват чрез избор на подходящи параметри на сканиране, включително резолюция, обхват и плътност на точките. Тези параметри се определят в зависимост от целите на анализа и изискваната точност на крайния модел.

Регистрацията представлява процес на привеждане на отделните облаци от точки в единна координатна система. Този етап осигурява геометричната съгласуваност на данните и формира основата за създаване на цялостен пространствен модел.

След регистрацията се извършва обработка на данните, включваща структуриране, класификация и подготовка на облаците от точки за моделиране. В този етап се създава връзката между първичните измервания и тяхното използване за аналитични приложения. Създаването на примерен модел може да бъде реализирано чрез различни подходи, като изборът на конкретен метод зависи от целите на изследването [9]. Сред най-често използваните са триангулационни нерегулярни мрежи (TIN), регулярни решетки (Grid-based) и директна работа с облаци от точки. Всеки от тези подходи предлага различна степен на детайлност и възможности за последващ анализ.

Заключителният етап включва извличане на информация от създадения модел, като генериране на профили, определяне на геометрични параметри и извършване на количествени оценки. Тези резултати формират основата за интерпретация и вземане на инженерни решения.

В този контекст наземното лазерно сканиране следва да се разглежда като интегриран процес, при който качеството на крайния резултат зависи от изпълнение на всички етапи.

3. Предизвикателства при приложението на наземното лазерно сканиране в минни обекти и практически решения

Приложението на наземното лазерно сканиране в минната индустрия, и в частност в подземни условия, е свързано с редица специфични предизвикателства, които оказват пряко влияние върху качеството на получените данни и надеждността на изградените модели. Тези ограничения произтичат най-вече от особеностите на измервателната среда.

Един от основните проблеми е свързан с процеса на регистрация на отделните сканирания. Използването на алгоритми, като тези за съвпадение на геометрията (cloud-to-cloud) оказва съществено влияние върху крайната точност на модела. В условията на ограничена геометрична разнообразност, характерна за подземни изработки (например тунели с приблизително еднакво напречно сечение), този подход може да доведе до натрупване на грешки. Едно от възможните практически решения на този проблем е използването на изкуствени елементи – ясно разпознаваеми маркери (laser scanner targets), разположени на подходящи места, в обекта. Те могат да бъдат определени в локална координатна система и използвани като контролни точки при регистрацията, което значително повишава устойчивостта и точността на крайния модел.

Друг съществен фактор е отсъствието на GNSS сигнал в подземната среда, което ограничава възможностите за директно геореферирание на данните в реално време. В тези случаи се използват стабилизирани геодезически точки (геодезически марки), определени чрез класически геодезически методи [10], които реализират локална координатна система в подземната среда и служат като основа за извършваните измервания. В зависимост от конкретната цел на работа, тези точки могат да бъдат предварително привързани към глобална координатна система или да осигурят връзка впоследствие чрез точки, разположени на повърхността.

Ограничената видимост и наличието на препятствия водят до появата на „сенчести“ или още „мъртви“ зони, които остават незаснети [3]. Това налага внимателно планиране на позициите на сканиране с цел минимизиране на пропуските, както и увеличаване на броя на станциите при сложна геометрия.

Неблагоприятните фактори на средата, като прах и влага оказват негативно влияние върху качеството на данните, водейки до увеличаване на „шума“ в облаците от точки. Практическият подход за справяне с този проблем включва комбиниране на подходящи параметри на сканиране (резолюция, скорост) с последващо прилагане на филтриращи алгоритми за редуциране на паразитните точки.

В обобщение, ефективното приложение на наземното лазерно сканиране в минното дело изисква не само познаване на технологичните възможности, но и адаптиране на методологията към конкретните условия на средата. Комбинирането на различни подходи за регистрация, внимателното планиране на измерванията и прилагането на адекватни стратегии за обработка са ключови за постигане на надеждни резултати.

4. Крайни резултати от наземното лазерно сканиране и тяхната инженерна приложимост в рамките на дигитални двойници

Крайният резултат от наземното лазерно сканиране представлява георефериран облак от точки, който съдържа детайлна пространствена информация за изследвания обект. В зависимост от степента на обработка, този първичен резултат може да бъде трансформиран в различни производни продукти, включително дигитални модели на терена (DTM), напречни и надлъжни профили, количествени оценки на геометрични параметри и обеми [12].

Стойността на тези продукти се определя от възможността за извличане на целева информация, която може да бъде използвана за нуждите на специалистите в областта. При минни изработки това включва определяне на геометрията на изработките, контрол на сеченията и оценка на отклонения от проектните параметри. В този контекст облаците от точки и производните им модели осигуряват цялостно и детайлно пространствено пресъздаване, което значително превъзхожда дискретния характер на класическите измервания.

Особено значение има възможността за сравнение на модели, получени в различни времеви моменти. Този подход позволява извършване на анализ на измененията [5], чрез които могат да бъдат идентифицирани локални деформации, зони на обрушване или натрупване на материал. По този начин данните от лазерно сканиране се превръщат в инструмент не само за документиране, но и за откриване на процеси, протичащи в минните обекти.

Интегрирането на тези продукти в обща геоинформационна среда създава предпоставки за изграждане на дигитални двойници. В този случай тримерният модел не се разглежда като статичен резултат, а като динамичен, който се актуализира чрез периодични измервания. Това позволява проследяване на състоянието на обекта във времето и подпомага вземането на инженерни решения на база актуална и детайлна информация.

В този контекст дигиталните двойници могат да бъдат разглеждани и като основа за системи за подпомагане на вземането на решения (decision-support systems), които използват актуализирани пространствени данни за оценка на риска и оптимизиране на инженерните дейности.

Като едно ефективно допълнение към разгледаните приложения, подобен подход може да бъде използван и при мониторинг на надземни инженерни съоръжения, свързани с минното производство, каквито са хвостохранилищата [4, 7]. Създаването на тримерни модели на техните

конструктивни елементи позволява анализ на геометрични изменения, генериране на профили и оценка на обемни изменения. При многократно заснемане тези модели могат да бъдат използвани за проследяване на деформационни процеси, което ги прави подходяща основа за изграждане на дигитален двойник и при този тип обекти [11,13].

5. Заключение

Наземното лазерно сканиране се утвърждава като ефективна технология за получаване на детайлна пространствена информация, която значително разширява възможностите за анализ и интерпретация на геометрията на минните обекти. В сравнение с класическите геодезически методи, базирани на дискретни измервания, технологията осигурява по-изчерпателно и надеждно изследване на състоянието на инженерните съоръжения

Предложената методологична рамка и анализ на приложението на наземното лазерно сканиране в минни обекти могат да бъдат директно използвани в практиката за подобряване на процесите по измерване, моделиране и мониторинг. Систематизирането на работния процес подпомага по-ефективното планиране на измерванията и оптимизира обработката на данните, което води до повишаване на надеждността на крайните резултати.

Разгледаният подход е приложим не само за подземни минни изработки, но и за свързани инфраструктурни съоръжения, включително хвостохранилища, където може да бъде използван за анализ на геометрични изменения и оценка на състоянието в дългосрочен план.

Интеграцията на резултатите от лазерното сканиране в рамките на дигитални двойници позволява преминаване от статично към динамично представяне на минните обекти. Това създава условия за по-ефективен мониторинг, оценка на риска и подпомагане на инженерните решения както в подземни изработки, така и при свързаните с тях инфраструктурни съоръжения.

В този смисъл, внедряването на технологии за наземно лазерно сканиране и дигитални двойници има потенциал да се превърне в стандартен подход при управлението и мониторинга на съвременни минни обекти.

Представените изводи и насоки са с обзорен и практико-методологичен характер и са базирани на натрупан опит от приложение на наземно лазерно сканиране при различни обекти, без да се разглежда конкретен индивидуален случай.

Литература

- [1] **Господинов, С., Вълканов, Н., Щерева К., /2014 г./** - Наземно лазерно сканиране – една нова реалност при експлоатацията на каменни кариери, Четвърта национална научно-техническа конференция с международно участие, Девин, България;
- [2] **Господинов, С. Джорова, С., Симеонова, Я., Митрев, Г., /2012 г./** - Приложение на технологията "Air Borne Laser Scanning (ABLS)" за заснемане на линейни обекти от енергийната инфраструктура, Доклад и публикация на международна юбилейна научно-приложна конференция УАСГ 2012 „Наука и практика“, 15-17 ноември 2012, том 1, стр. 493 - 499, ISSN 1310-814X, ISSN 2534-9759;
- [3] **Господинов., С., Марков, М., Хаджиева, Б., /2024 г./** - Применение лазерного сканирования для обследования объектов, имеющие отношение к безопасности дорожного движения, Современные информационные технологии. Сборник научных статей по материалам 10-й Международной научно-технической конференции, стр. 337-346, Москва 2024г.;
- [4] **Димитров, М., Марков, М., Хаджиева, Б. /2021г./** - Създаване на 3D модел на стена на хвостохранилище по резултати от наземно лазерно сканиране, Национална научнотехническа конференция, стр. 85-90;
- [5] **Марков, М., Митев, И., /2024 г./** - Применение лазерного сканирования для картографирования картирования горных образований, Современные информационные технологии. Сборник научных статей по материалам 10-й Международной научно-технической конференции, стр. 453-464, Москва 2024г.;

- [6] **Марков, М., /2024 г./** - Приложение на наземното лазерно сканиране за структурно-геолошко картиране на скални откоси, дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен „ДОКТОР“, София;
- [7] **Наануа Ю., Ознамец В., Цветков В., /2024 г./** - Геотехническият геодезически мониторинг гидротехническо сооружения, ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, Сборник научных статей 10-й Международной научно-технической конференции. Бургас, 2024, Издательство: Институт за хуманитарни науки, икономика и информационни технологии
- [8] **Пенев, П., /2018 г./** - Инженерна геодезия, Военно-географска служба, София, ISBN:978-619-90832-2-2
- [9] **Петрова, М., /2021 г./** - Изследване на деформациите на инженерните съоръжения посредством технологията “Terrestrial laser scanning“. Автореферат на дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен „ДОКТОР“, УАСГ, София, 2021г.;
- [10] **Постоловски, А., Димитров, М., Марков, М. /2021г./** - Приложение на MTLs – технология при одит на тунелното строителство, XVI международна конференция по открит и подводен добив на полезни изкопаеми, стр. 279-285, Варна 2021г.;
- [11] **Славова, Т. /2025 г./** - Визуализирай света: пътеводител в геопространствените технологии. София: ИК „Св. Иван Рилски“ към МГУ, 2025. ISBN 978-954-353-502-6.
- [12] **Хаджиева, Б., /2025 г./** - Приложение на мобилно лазерно сканиране при поддръжка, основен ремонт и строителство на пътища, дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен „ДОКТОР“, София, 2025г.;
- [13] **Шайтура С.В., Господинов, С.Г., Васкина М.Ю. /2020 г./** - Комплексная цифровая модель мониторинга района – В сборнике: Методы и программные средства информационного сервиса в информационных и пространственных полях. Сборник научных трудов. Бургас, 2020. С. 51-57.;
- [14] **Щерева, К., Пеев, И., Марков, М., /2022 г./** - Анализ на времево обусловените премествания на дискретни точки от стената на яз. „Златоград“, Осма национална научнотехническа конференция с международно участие, стр. 81-87, Девин 2022г.

ANALYSIS OF OUTLIER DETECTION METHODS IN RTK-GNSS DEFORMATION MONITORING

Roumen A. Ivanov¹, Nevena I. Babunska-Ivanova²
158 Geo Milev Str., Sofia, 1574
Higher School of Transport “T. Kableskov”
Assos. Prof., PhD¹, Chief Assistant, PhD²
rang75@hotmail.com¹, babunska@vtu.bg²

ABSTRACT

A deformation monitoring survey involves performing several epoch measurements on a network of reference and object points positioned across the structure or area under investigation. The main purpose of the research is to determine whether any significant displacements have occurred between observation epochs using statistical testing. This study investigates the minimal detectable displacements that can be reliably identified using RTK-GNSS and examines methods for assessing point stability. The results demonstrate that real-time GNSS provides effective deformation monitoring for early warning.

Keywords: GNSS, deformation analysis, deformation surveys, deformation monitoring, outlier

Introduction

Understanding the condition of the structure or terrains and the ongoing processes within it is crucial in making informed decisions about its maintenance and secure functioning. We use our knowledge of the structure's possible behavior throughout the design process to select suitable objects and monitor reference points. We also consider critical displacement values to ascertain the required level of precision. In engineering surveying deformation surveys the minimal detectable displacement defines the smallest movement magnitude that can be distinguished from measurements. Using survey data collected at two epochs, a confidence ellipsoid for the deformation vector of a single point in a three-dimensional Cartesian coordinate system is computed, allowing for the detection of deformations and the estimation of their covariance matrix.

Deformation monitoring plays an important role in surveying engineering because it helps detect and evaluate displacements (geometric changes) in terrains and structures. Such changes may result from tectonic activity, unstable soil conditions, structural loads, temperature variations, or the long-term behavior of construction materials. Accurately identifying these deformations is essential for maintaining structural safety, reducing risks, and developing effective early-warning systems for potential failures. In recent years, Global Navigation Satellite Systems (GNSS) have become one of the most reliable technologies for deformation monitoring. They provide continuous, automated, and highly precise measurements, which makes them especially useful for tracking even small movements. Since displacements often appear before more serious structural damage, they serve as valuable early indicators. This is particularly important in landslide monitoring, embankment and dam surveillance, and the observation of various engineering structures.

Principles of deformation monitoring surveys

A deformation monitoring survey involves performing repeated measurements on a network of points distributed across the structure or area under investigation. The main objective is to determine whether any statistically significant displacements have occurred. These displacements may be vertical, horizontal, or 3D movements. The minimum detectable displacement in engineering surveying is a crucial measure that depends on the direction of the displacements. The precision of GNSS results is influenced by a lot of factors, including the length of the observation period, the satellite geometry, atmospheric conditions, and the processing strategy applied. Extending the duration of observations typically enhances accuracy by reducing random noise and mitigating multipath effects. By using a network of reference stations, we can apply positioning techniques that make our measurements much more precise. Advancements in real-time kinematic (RTK) and network RTK technologies have made it possible to perform GNSS-based deformation monitoring

in real time. Modern communication networks now connect remote monitoring systems and instruments, enabling information exchange [8]. Different communication and data-transfer protocols (NMEA 0183, RTCM, and NTRIP) are used in RTK-GNSS measurements [9]. To assess the risk of dangerous landslide activity, the terrains must be examined in detail with geodetic and geotechnical instrumentation. The stability of mining areas depends on the use of GNSS technology for deformation monitoring. Reliable identification of the main causes of slope instability is achieved by combining GNSS measurements with photogrammetric data collected by unmanned aerial vehicles [7]. Several studies also explore how GNSS and InSAR technologies can be integrated for effective landslide detection. Laser scanning is widely applied in urbanized areas [11]. The paper [1] investigates the principles and potential of creating 3D building models and evaluating their quality using terrestrial laser scanning. Knowledge of three-dimensional models provides the opportunity to analyze deformations. A scanner's advantage is the ability to capture spatial data with extremely high point density. In practical applications for deformation monitoring surveys, the authors [4] present geotechnical monitoring techniques for dams. In [3] the authors propose an approach for analyzing deformation observations obtained during mine surveying. The paper [10] presents a monitoring system composed of multiple sensor nodes equipped with inertial modules, which provide direct calculations of Euler angles and quaternions. These nodes are connected through a Zigbee wireless network and deployed in an area susceptible to landslides. A high-precision navigation system that integrates an inertial measurement unit with a multiband GNSS module achieves high accuracy by employing dead reckoning (DR) and RTK algorithms [12]. This study [2] analyzes the landslide along the northern Bulgarian Black Sea coast using a combination of ground-based GNSS measurements and satellite InSAR interferometry. Due to the complex terrain, GNSS results were complemented by DInSAR processing of Sentinel-1 data to ensure a more accurate interpretation of the movements. The research [13] evaluates the real-world accuracy and noise characteristics of RTK-GNSS technology for structural monitoring across four different environments: grass, concrete, water, and an obstructed balcony. To improve data quality, the authors suggest using adaptive filtering and multipath correction techniques to denoise the signals. GNSS technology is used for monitoring the structural health of bridges [18]. The authors propose a new approach using the monitoring station located on the bridge tower as a moving-base reference station and applies moving-base RTK-GNSS.

On October 21, 1966, after days of rain, a massive spoil tip of coal waste accumulated on a hill directly above the Aberfan village collapsed. The primary engineering failure mechanism involves water accumulation at the base, resulting in increased pore pressure and partial liquefaction of the waste material. In this case, there is a lack of detailed engineering-geological and hydrological reports, stability analyses, landslide models and how much water the material can retain. Furthermore, a monitoring system is missing. This process triggers a rapid transition from a solid state to a liquid mass. The article [5] focuses on the modelling of fluidised geomaterials, specifically the Aberfan. The article [14] is useful because it provides a methodology for detailed physicochemical analysis of mine waste, including its reaction to water and temperature. This knowledge would help specialists assess the risk of instability.

Experiment

The research [16] explored the potential contribution of low-cost high-rate GNSS receivers for Structural Health Monitoring (SHM) applications. In our experiment, RTK-GNSS monitoring of horizontal displacements involves establishing a stable reference station and a mobile station. By comparing the changes in distance between these two stations, displacements can be derived. This is particularly important for long-term observation programs, where continuous, reliable, and cost-effective measurements are essential for assessing structural stability and detecting subtle deformation trends. In our experiment, the distance between the base antennas and the mobile receiver is 1.105 m in the initial state. The values of the horizontal displacements of the deformation are presented (Fig.1), where every step reflects a 10 mm decrease (till about 18000-22000 measurements) and then increase in the measured distances. Determining the GNSS sensitivity in detecting displacements is based on the 3-sigma rule. If a value lies more than three standard deviations away from the mean, it is identified and classified as a displacement. Relying only on the three-sigma rule assumes a perfect normal distribution.

Example:

1. first set of 30 distance measurements - from number 0 to 30 (Fig.1)

X1=(1.108;1.111;1.111;1.108;1.108;1.108;1.108;1.090;1.111;1.108;1.090;1.108;1.108;1.108;
1.108;1.108;1.090;1.108;1.090;1.108;1.108;1.108;1.108;1.090;1.108;1.108;1.090;1.090;1.108)

2. second set of 30 distance measurements – from number 8044 to 8074 (Fig.1)

X2=(1.069; 1.069; 1.069; 1.069; 1.069; 1.087; 1.069; 1.069; 1.087; 1.072; 1.069; 1.072; 1.069; 1.072; 1.087;
1.072; 1.069; 1.069; 1.069; 1.069; 1.072; 1.069; 1.072; 1.069; 1.072; 1.072; 1.072; 1.072; 1.072)

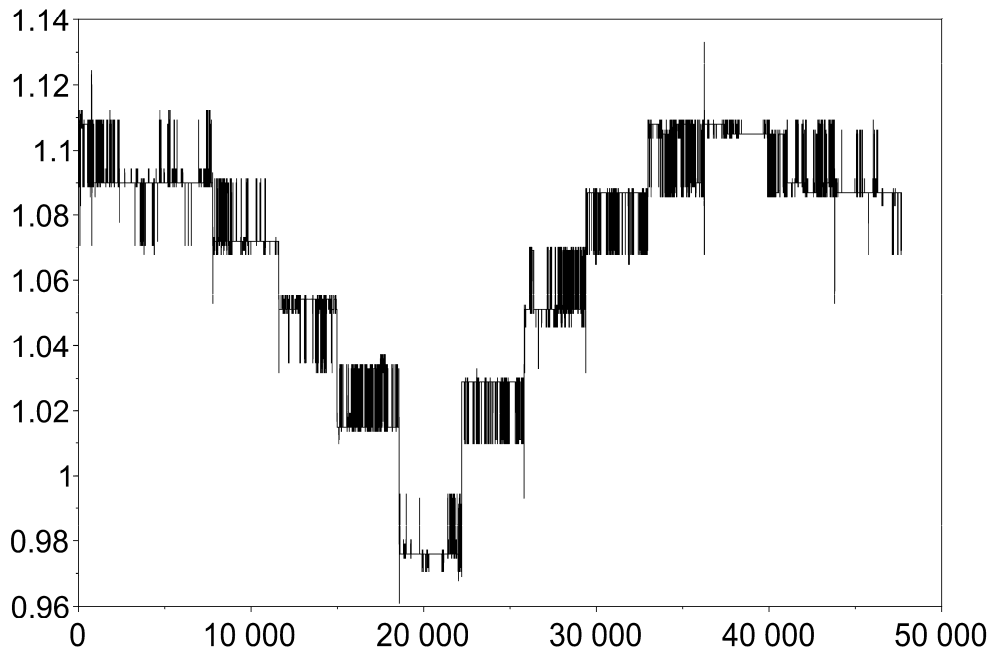


Fig.1 Distances in meters (ordinate) and number of measurements (abscissa)

For datasets like this, it is appropriate to apply complex outlier detection tests. Outlier tests applied to our dataset are:

1. Grubbs' test
2. Generalized Extreme Studentized Deviate (GESD)
3. Dixon's Q-test
4. Iglewicz-Hoaglin test
5. Boxplot (IQR method)
6. 3-sigma rule
7. Romanovsky's criterion

The listed tests are divided into:

1. Tests for normally distributed data

- a) Grubbs' test
- b) Generalized Extreme Studentized Deviate (GESD)
- c) Dixon's Q test
- d) 3-Sigma Rule

e) Romanovsky's criterion

2. Tests for non-normally distributed data

a) Boxplot Rule (IQR Method)

b) Iglewicz-Hoaglin test

The check of whether our specific distribution is normal using the Shapiro-Wilk test shows that it is not normally distributed. The first observation of the second epoch X2 (1.069) is added to the observations of the first epoch X1. Then the second observation of the second epoch X2 (1.072) is added to the observations of the first epoch X1. The analysed measurements from the second epoch of deformation monitoring X2 show the following values: 1.069 m (appearing 14 times), 1.072 m (appearing 13 times), and 1.087 m (appearing only 3 times). The value 1.069 shows the greatest variance from the initial value of 1.105 and also has the highest frequency, making it the subject of our study.

a) Boxplot Rule (IQR Method)

The first step is to sort the dataset in ascending order. The first quartile (Q1), the second quartile (the median), and the third quartile (Q3) are calculated. The interquartile range (IQR) is difference between the Q3 and Q1.

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (1)$$

With Q1, Q3 and IQR the Lower Fence (LF) and Upper Fence (UF) are calculated.

$$LF = Q_1 - 1,5 \cdot IQR \quad (2)$$

$$UF = Q_3 + 1,5 \cdot IQR \quad (3)$$

Statistically, according to the IQR method, the value 1.069 is classified as an outlier.

b) Iglewicz-Hoaglin Test

The dataset contains 31 observations, and the median corresponds to the 16th value when the data are sorted, which is 1.108. After determining the median, the next step is to compute the absolute deviations of each observation from the median. For example, for the analyzed dataset the Boxplot Rule (IQR Method) and the Iglewicz-Hoaglin test identify the value 1.069 as an outlier. For completeness, the other tests (Grubbs' test, Generalized Extreme Studentized Deviate (GESD), Dixon's Q test and 3-sigma rule) also give 1.069 for the outlier.

Romanovsky's criterion is a parametric statistical goodness of fit test used to assess how well empirical data correspond to a theoretically expected distribution. Compared with other statistical criteria, Romanovsky's criterion assesses the agreement between observed and expected frequencies and helps identify gross errors. For the analyzed data set, Romanovsky's criterion identifies 1.069 as an outlier. The authors [6] analyze Minimum Detectable Displacements (MDD) in deformation networks with theoretical MDD and empirical MDD. In our experiment the MDD are investigated by outlier detection methods. The research [17] demonstrated that the RTK-GPS system achieved a positioning precision of approximately 1.5 cm, confirming its suitability for high-rise structural deformation monitoring. The article by [15] examines the same combination of tests and shows that, in small univariate datasets, the different methods often identify the same outlier. Every significant shift visible in Fig.1 corresponds to a displacement of 10 mm. That is, from 0 to the value about 20,000 the distance decreases by one 10 mm step, and after that it increases by 10 mm. The conclusion we can draw is that the detected displacement of 30 mm, according to the outlier detection tests, corresponds to an actual displacement of 10 mm.

Conclusion

The research has shown that GNSS receivers can achieve the accuracy required for horizontal deformation monitoring. These methods enable displacement information to be produced almost immediately, making them highly suitable for applications such as dam surveillance or landslide early-warning systems. Real-time GNSS monitoring can be linked with automated processing software and alert systems. When displacement values exceed predefined thresholds, notifications can be sent directly to engineers. Compared with traditional displacement monitoring, this method has significant economic, efficiency, and data integrity advantages. By employing the monitoring approach described for the analysis of outlier detection methods, it is possible to improve the detection of movements and to enhance the evaluation of structural health in constructions or terrain assessments.

References

- [1] Antova, G., Simeonova, G., Mickrenska, C. (2024). Terrestrial laser scanning-Challenges and opportunities in 3D building model creation. *Inżynieria Mineralna*, 1(1). <https://doi.org/10.29227/IM-2024-01-45>.
- [2] Atanasova, M., Nikolov, H., Georgiev, I., Ivanov, A. (2022). Deformation analysis in landslides NE Bulgaria using GNSS data complemented by InSAR for better interpretation results. In: *Proceedings of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, Valencia, Spain, 20–22 June 2022.
- [3] Begnovska, M., Sirakov, R. (2022). Accuracy of mine surveying measurements in the research of geomechanical processes. In: *Proceedings of the X International Geomechanics Conference*, Varna, Bulgaria, 19–23 September 2022.
- [4] Belhadj, A., Chouicha, K., Kahlouche, S., Bachir, G. (2023). Multi-sensor data fusion with AI-RBFN in settlement surveillance of embankment dams: Application to a rockfill dam in Algeria. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 13, 845–862. <https://doi.org/10.1007/s13349-023-00691-8>.
- [5] Dutto, P., Stickle, M.M., Pastor, M., Manzanal, D., Yague, A., Moussavi Tayyebi, S., Lin, C., Elizalde, M.D. (2017). Modelling of fluidised geomaterials: The case of the Aberfan and the gypsum tailings impoundment flowslides. *Materials*, 10, 562. <https://doi.org/10.3390/ma10050562>.
- [6] Erdogan, B., Hekimoglu, S., Durdag, U.M. (2017). Theoretical and empirical minimum detectable displacements for deformation networks. In: *FIG Working Week 2017*, Helsinki, Finland, 29 May–2 June 2017.
- [7] Gül, Y., Hastaoglu, K., Poyraz, F. (2020). Using the GNSS method assisted with UAV photogrammetry to monitor and determine deformations of a dump site of three open-pit marble mines in Eliktekké region, Amasya province, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 79, 296. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08959-8>.
- [8] Hristova, T., Mitev, I., Balev, V. (2022). Monitoring of geotechnical facilities through DLT solution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970, 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012011>.
- [9] Ilieva, T. (2013). Communication protocols and formats for data transfer used for real-time kinematic GNSS measurements (in Bulgarian). *Annual of the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy*, Sofia, XLV.
- [10] Iontchev, E., Miletiev, R., Iordanov, R. (2022). Landslide monitoring based on inertial measurement units and Zigbee network. In: *Proceedings of the 29th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, Sofia, Bulgaria, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/iwSSIP55020.2022.9854454>.
- [11] Mickrenska-Cherneva, C., Alexandrov, A. (2020). Mobile laser scanning in highly urbanized area-a case study in Sofia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-4/W2-2020, 147–152.
- [12] Miletiev, R., Iontchev, E., Yordanov, R. (2021). Design of navigation system with multiband GNSS receiver with RTK and DR algorithms. In: *Proceedings of the 56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*, Sozopol, Bulgaria, pp. 115–117. <https://doi.org/10.1109/ICEST52640.2021.9483562>.



- [13] Qi, W., Li, F., Yu, L., Fan, L., Zhang, K. (2025). Analysis of GNSS-RTK monitoring background noise characteristics based on stability tests. *Sensors*, 25, 379.
- [14] Serafimova, E., Dedelyanova, K. (2024). Thermal analysis of mine remediation soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1427, 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1427/1/012004>.
- [15] Shimizu, Y. (2022). Multiple desirable methods in outlier detection of univariate data with R source codes. *Frontiers in Psychology*, 12, 819854. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.819854>.
- [16] Vazquez-Ontiveros, J., Cabanillas, J., Vazquez Becerra, G., Alvarez, L., Gaxiola-Camacho, J.R. (2025). Performance evaluation of low-cost high-rate GNSS receivers for detection of horizontal and vertical displacements in real time: An opportunity in structural health monitoring. *Applied Geomatics*, 17, 1. <https://doi.org/10.1007/s12518-025-00660-4>.
- [17] Wan Aziz, W.A., Zulkarnaini, M.A., Shu, K.K. (2005). The deformation study of high building using RTK-GPS: A first experience in Malaysia. In: *FIG Working Week 2005 and GSDI-8*, Cairo, Egypt, 16–21 April 2005.
- [18] Xi, R., Jiang, W., Xuan, W., Xu, D., Yang, J., He, L., Ma, J. (2023). Performance assessment of structural monitoring of a dedicated high-speed railway bridge using a moving-base RTK-GNSS method. *Remote Sensing*, 15, 3132. <https://doi.org/10.3390/rs15123132>.

ГЕОТЕХНИЧЕСКИ И КОНСТРУКТИВЕН МОНИТОРИНГ В ПОДЗЕМНОТО ГРАДСКО СТРОИТЕЛСТВО

Борислав Борисов, b.borisov@mgu.bg
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София

ABSTRACT

This paper treats geotechnical and structural monitoring as an active risk-management process in urban underground construction. The Observational Method provides the framework that links baseline measurements, data reliability, engineering interpretation and predefined actions. Conventional instruments are considered alongside DFOS, InSAR, DAS, automated total stations and wireless sensor networks. Particular attention is given to TBM-induced ground movements, deep excavations, instrument placement, adaptive monitoring frequency and hierarchical alert levels. The review shows that monitoring is effective only when design assumptions, construction parameters, verified data and decision-making responsibilities are connected through a clear and traceable procedure.

Keywords: geotechnical monitoring, Observational Method, TBM, DFOS, InSAR

ВЪВЕДЕНИЕ

Подземното строителство в плътно застроена градска среда неизбежно е свързано с геотехническа неопределеност. Дори при подробно проучване действителното поведение на масива, подземните води, съществуващите сгради и новоизгражданата конструкция се изяснява постепенно с напредването на работите. Затова мониторингът не е просто регистриране на отделни премествания. Неговата задача е да свърже проектните допускания с наблюдаваното поведение и да осигури навременна, обоснована инженерна реакция.

Именно тази роля е заложена в Наблюдателния метод по EN 1997-1. Методът изисква предварително да бъдат определени допустимото поведение, възможните отклонения, планът за наблюдение и мерките при надвишаване на приетите граници. В EN 1997-1:2004 той е уреден в т. 2.7, а в БДС EN 1997-1:2024 - в т. 4.7 (CEN, 2004; BIS, 2024). Ключовият принцип е решенията да не се формулират едва след възникване на проблема, а да бъдат подготвени предварително и задействани въз основа на потвърдени измервания и ясно определени отговорности (Peck, 1969; Moritz & Schubert, 2009).

Същата логика стои и в основата на НАТМ, при който носещият потенциал на масива се използва чрез контролирано развитие на деформациите и своевременно адаптиране на укрепването. При механизирани прокопаване с ТПМ този подход се реализира чрез постоянна съпоставка между налягането на забоя, скоростта на придвижване, задщитовото инжектиране и реакцията на терена и съществуващите обекти. Така мониторингът се превръща в неразделна част от строителната технология, а не остава последваща контролна дейност (Schubert & Lauffer, 2012). Практическото приложение на тунелно-пробивна машина при изграждането на втория метротунел на Софийския метрополитен е представено от Pavlov et al. (2012) и дава релевантен национален пример за механизирани прокопаване в сложна градска среда.

На практика Наблюдателният метод е предварително организирана процедура за управление на риска. За всяко съществено проектно допускане се определят наблюдавана величина, очакван диапазон, критерий за приемливост, начин за независимо потвърждаване и конкретно действие при отклонение. Измерването придобива инженерна стойност, когато е свързано с вероятен механизъм на поведение и с ясно разпределена отговорност за интерпретацията и решението (Peck, 1969; Moritz & Schubert, 2009; British Tunnelling Society, 2023).

Настоящият доклад предлага цялостна рамка за избор на измервателни направления и технологии, разполагане на инструментите, определяне на честотата, обработка на данните и преминаване от измерване към инженерно решение при градски тунели, метростанции и дълбоки изкопи.

КОНЦЕПЦИЯ И ОБХВАТ НА СИСТЕМАТА ЗА МОНИТОРИНГ

Мониторинговата система се проектира и започва да функционира още преди началото на строителството. Базовите серии определят началното състояние, естествените сезонни колебания и действителната повтораемост на измерванията. Едва върху тази основа могат надеждно да се разграничат изменението, предизвикани от строителния процес. Всяко последващо измерване преминава през контрол на качеството, съпоставка с проектния модел, анализ на тенденцията и, когато е необходимо, задействане на предварително определено действие. Тази затворена обратна връзка е същността на Наблюдателния метод.

Системата обединява четири взаимно допълващи се групи наблюдения. Първата проследява деформациите на повърхността и сградите чрез нивелачни репери, конвенционални и автоматизирани тотални станции и контрол на пукнатините. Втората оценява поведението на носещите конструкции и масива чрез инклинометри, многоточкови екстензометри, конвергентни измервания, клетки за натиск и разпределени оптични сензори. Третата следи подземните води и поровото налягане. Четвъртата включва оперативните параметри на ТПМ и ключови показатели на строителния процес. Интерпретацията на всяка група поотделно е недостатъчна, защото една и съща деформация може да бъде следствие от промяна в налягането на забоя, загуба на обем, консолидация или локален конструктивен механизъм.

Надеждността на системата не се измерва с броя на сензорите. Тя зависи от стабилните референтни точки, калибрираните инструменти, резервирането на критичните измервания, единната времева база, контрола на достъпа и проследимата процедура за потвърждаване на аномалии. Решаваща е и координацията между измервателния екип, проектанта, строителя и лицето, оправомощено да разпорежда промяна в технологията. Фигура 1 представя тази интегрирана логика.

Поради това четирите групи наблюдения не трябва да се водят като независими регистри. За всеки съществен риск е необходимо да се определят водещ показател, потвърждаващ показател и оперативен параметър на строителния процес. При риск от загуба на устойчивост пред забоя например се анализират съвместно налягането в работната камера, скоростта на придвижване, обемът на изнесен материал и развитието на повърхностните слягания. При понижаване на водното ниво се съпоставят пиезометричните стойности, сляганията, наклоните и деформациите на чувствителните сгради. Тази взаимна проверка намалява вероятността единична инструментална грешка да бъде приета за реално геотехническо събитие (Dunnicliff, 1993; British Tunnelling Society, 2023).

Оперативната логика на системата включва четири последователни стъпки: установяване на изменение, потвърждаване на достоверността, диагностициране на вероятния механизъм и вземане на решение. Преминаването между тях трябва да бъде документирано. Това е особено важно при автоматизирани системи, където високата честота на запис може да генерира множество сигнали, без всеки от тях да има инженерна значимост (Farrar & Worden, 2013).



Фиг. 1. Интегрирана мониторингова рамка за активно управление на геотехническия риск.

ИЗМЕРВАТЕЛНИ СРЕДСТВА И СЪВРЕМЕННИ ТЕХНОЛОГИИ

Конвенционалните геотехнически и геодезически инструменти остават основата на всяка мониторингова програма. Пиезометрите измерват поровото налягане и водните нива, инклинометрите проследяват разпределението на хоризонталните премествания по дълбочина, а многоточковите екстензометри отчитат относителните деформации между предварително определени точки в масива.

Геодезическите репери и призми допълват картината със сляганията, наклоните и конвергенциите. Техническите показатели на всеки инструмент трябва да се определят според конкретния модел, начина на монтаж и условията на експлоатация (Dunnicliff, 1993; Балев, 2024).

Разпределеното оптично сензориране значително увеличава пространствената плътност на наблюдението. Вместо данни от отделни точки DFOS предоставя непрекъснат профил по дължината на влакното и позволява да бъдат локализираны концентрации на деформации и ранно развитие на пукнатини. Rayleigh-OFDR системите са подходящи за детайлно наблюдение на станции и критични сечения, докато Brillouin-базираните решения намират приложение при дълги тунелни участъци. Опитът от Semmering Base Tunnel и други тунелни обекти потвърждава приложимостта на технологията както по време на строителството, така и при дългосрочно наблюдение на облицовките (Lienhart et al., 2019; Monsberger et al., 2022; Zhang et al., 2024).

InSAR допълва наземните измервания с регионална картина на деформациите по линията на видимост на сателита. Методът осигурява широк пространствен обхват и възможност за ретроспективен анализ, но има ограничения, свързани с геометрията на наблюдение, атмосферните ефекти, декорелацията и невъзможността от една LOS компонента да се определи пълното триизмерно преместване. Затова резултатите трябва да се потвърждават чрез наземни геодезически измервания и да се тълкуват спрямо строителната последователност (Hong et al., 2024).

DAS използва оптично влакно за регистриране на вибрационни и акустични събития и има потенциал при наблюдение на динамични въздействия, работата на машини и локализирането на аномалии (Lindsey & Martin, 2021). Безжичните мрежи улесняват събирането на данни на сложни строителни площадки, но поставят допълнителни изисквания към захранването, комуникационното покритие, киберсигурността и времевата синхронизация. Тези технологии не заместват утвърдените методи, а разширяват възможностите им. Най-голяма стойност имат, когато са свързани с надеждна референтна система и ясна логика за интерпретация.

Таблица 1. Основни характеристики на измервателните средства

Величина	Инструмент	Типичен показател	Разделителна способност	Основни ограничения	Източник
Порово налягане	VWP	$\pm 0,1\%$ FS	-	температурен дрейф, монтаж	ISO 18674-4:2020
Хоризонтално преместване	Инклинометър	около $\pm 0,2$ mm/m	-	натрупване на грешка по дълбочина	ISO 18674-3:2017
Деформация в масива	MPBX	около $\pm 0,1$ mm	-	сондаж и анкериране	ISO 18674-2:2016
Слягане и конвергенция	APTC	mm клас	ъглова и линейна	видимост и стабилност на референциите	Dunnicliff, 1993
Пукнатини и локални деформации	Rayleigh DFOS	-	около 10 mm	ограничена дължина, температурна компенсация	Zhang et al., 2024
Дълги тунелни участъци	Brillouin DFOS	-	0,5-1 m	по-груба локализация	Zhang et al., 2024
Регионални слягания	InSAR	mm по LOS	зависи от сцената	атмосфера, декорелация, LOS геометрия	Hong et al., 2024

ИЗМЕРВАТЕЛНА ЛОГИКА И НАДЕЖНОСТ НА ДАННИТЕ

Подборът на измервателни средства трябва да тръгва от граничните състояния и вероятните механизми на отказ, а не от наличния каталог на оборудването. За всяка величина се определят необходимият диапазон, точността, разделителната способност, повторяемостта, допустимият дрейф и

влиянието на монтажа. Тези характеристики не са взаимозаменяеми. Високата разделителна способност не компенсира нестабилната референтна система, а фабричната точност не обхваща непременно грешките от инсталацията, температурните въздействия и обработката на данните. Затова стойностите в Таблица 1 са ориентировъчни и не заместват техническата спецификация, калибрирането и приемното изпитване на конкретната измервателна система (Dunnicliff, 1993; British Tunnelling Society, 2023).

Надеждността се повишава чрез функционално резервиране, а не чрез механично дублиране на еднотипни сензори. Критичният механизъм трябва да се наблюдава с независими измервателни принципи. Повърхностното слягане например може да бъде проверено чрез нивелация и автоматизирана тотална станция, а причината за него да се изясни чрез пиезометрични данни, инклинометрични профили и параметри на ТПМ. За достоверна съпоставка са необходими обща координатна и времева база, стабилни опорни точки и синхронизирани записи. В противен случай привидната корелация между две времеви серии може да произтича от различни моменти на отчитане, промяна на референцията или общо температурно въздействие (Farrar & Worden, 2013; Hong et al., 2024).

Контролът на качеството обхваща целия жизнен цикъл на данните, от монтажа и базовите серии до архивирането и инженерната интерпретация. Първичните записи трябва да се съхраняват непроменени, а всяка корекция, филтриране или отхвърляне на стойност да остава проследимо. Когато автоматизираната система генерира сигнал, е необходимо да се разграничат инструментална аномалия, локално строително въздействие и устойчиво развитие на геотехнически процес. Само последното обосновава промяна на проектното или технологичното решение, освен когато е достигнат предварително определен праг, изискващ незабавни действия за безопасност.

ГЕОМЕХАНИЧНО ВЛИЯНИЕ НА ТПМ И РАЗПОЛАГАНЕ НА ИНСТРУМЕНТИТЕ

При механизирани прокопаване повърхностното слягане е крайна проява на няколко последователни механизма. Пред забоя промяната на напрегнатото състояние и недостатъчното опорно налягане могат да предизвикат начални деформации. В зоната на щита значение имат надработката, взаимодействието между почвата и корпуса и управлението на траекторията. Зад машината определящи са своевременното запълване на строителната хлабина, налягането и обемът на инжектирания разтвор и развитието на ранната му якост. При кохезионни почви допълнителни слягания могат да възникнат и по-късно вследствие на разсейване на поровото налягане и консолидация.

Общата загуба на обем не е еднократно явление, а натрупан резултат от деформациите пред забоя, надработката и триенето около щита, непълното или забавено запълване на задщитовата хлабина и последващата консолидация. Една и съща форма на слягане на повърхността може да бъде породена от различни комбинации на тези механизми. Затова геометрията на слягането сама по себе си не е достатъчна за определяне на причината. Необходима е съпоставка с налягането на забоя, баланса на изкопавания материал, параметрите на инжектирането, поровото налягане и деформациите по дълбочина (Mair, 2008; Mair & Taylor, 1997).

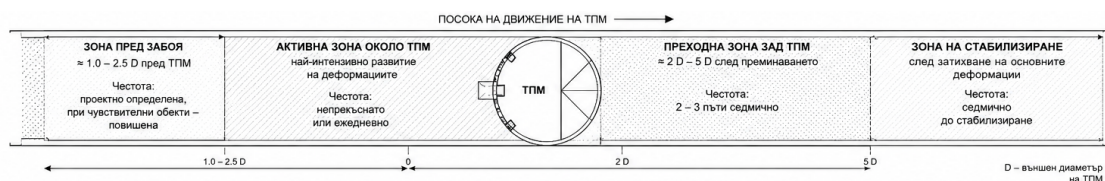
Според публикуваните наблюдения деформациите могат да започнат приблизително на 1,0 до 2,5D пред забоя и да се стабилизират между 3D и 5D зад машината, където D е диаметърът на тунела (Mair & Taylor, 1997). Тези разстояния са ориентировъчни, а не проектни константи. При плитко заложение, силно деформируеми почви, промяна на водния режим или наличие на чувствителна сграда зоната на активно наблюдение може да бъде значително по-голяма. Поради това честотата на измерване трябва да отчита не само разстоянието до забоя, но и скоростта на изменение и установената връзка между параметрите на ТПМ и наблюдаваните деформации.

Разполагането на инструментите трябва да следва прогнозния механизъм на поведение, а не стандартна каталожна схема. Инклинометрите се разполагат така, че да пресичат очакваните зони на срязване и да достигат стабилен пласт. Пиезометрите се инсталират в хидравлично значимите хоризонти, а не само на удобна за сондиране дълбочина. Геодезическите репери и призми трябва да обхващат както зоната на максимално влияние, така и стабилни референтни точки извън нея. В

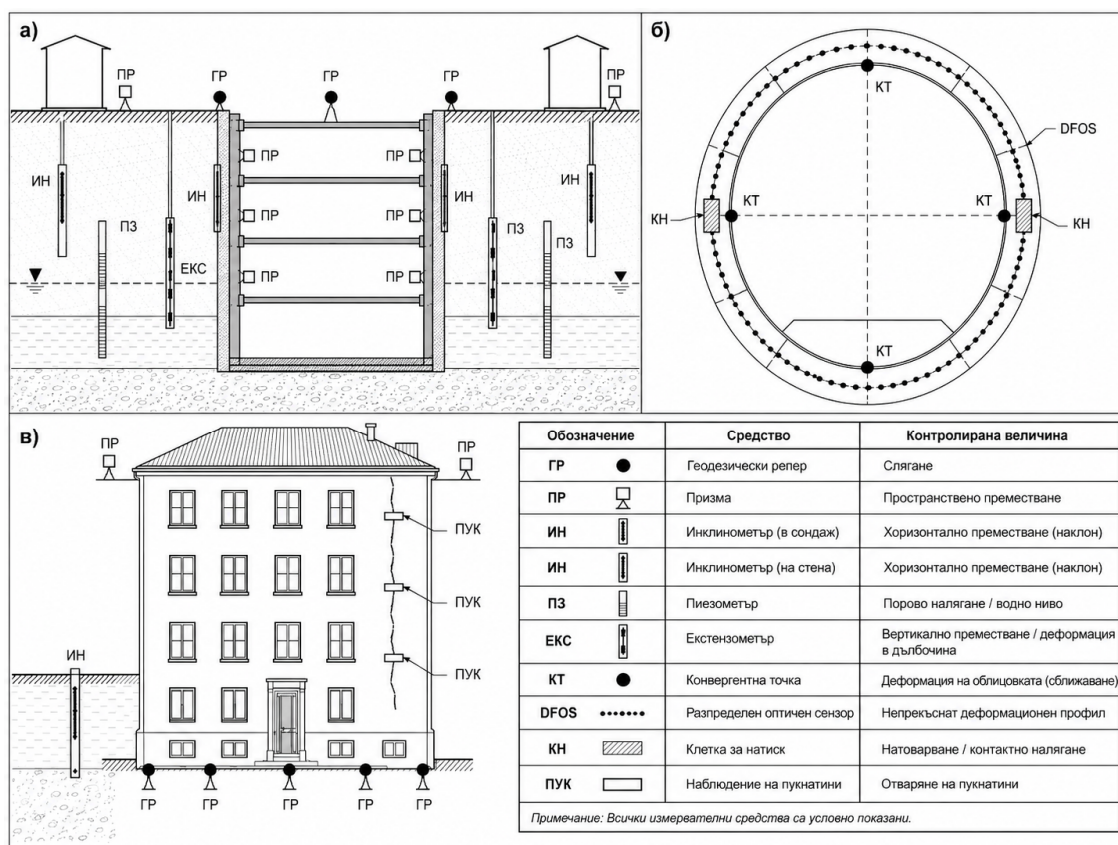
тунелите конвергентните точки, DFOS и клетките за натиск се концентрират в сечения с промяна на геоложките условия, геометрията или конструктивната схема. При сградите се проследяват абсолютните и диференциалните слягания, наклоните и развитието на пукнатини.

При метростанции и дълбоки изкопи интерпретационната логика е различна. Основните механизми включват огъване и преместване на ограждащите стени, деформации на подпорната система, повдигане или загуба на устойчивост на дъното, локално водочерпене и консолидация извън изкопа. Затова инклинометричният профил се разглежда съвместно с натоварванията в анкерите или разпънките, сляганията зад стената и пиезометричните нива. Ограниченото преместване на стената не изключва неблагоприятно въздействие върху съседни сгради, когато водният режим се изменя в по-широка зона. Измервателната система трябва да обхваща и елементи извън непосредствения контур на изкопа (Dunnicliff, 1993; British Tunnelling Society, 2023).

Предварителното укрепване на масива може съществено да измени очакваната деформационна картина и затова трябва да бъде отчетено в мониторинговата схема (Pavlov & Djorgov, 2014). Фигури 2 и 3 представят обобщени авторски схеми. Те не са универсални проектни решения, а илюстрират връзката между геомеханичната хипотеза, гъстотата на измервателните точки и честотата на наблюдение.



Фиг. 2. Ориентировъчни зони на влияние на ТПМ и проектно зависима адаптивна честота на измерванията.



Фиг. 3. Типово разполагане на инструменти при станция, тунелна облицовка и сграда в зоната на влияние.

ЧЕСТОТА, СИГНАЛНИ НИВА И УПРАВЛЕНИЕ НА ДАННИТЕ

Преди започване на работите се изпълняват базови серии, чрез които се определят референтните стойности и естествената изменчивост. Две серии могат да бъдат минимална отправна точка, но при сезонно изменчиви водни нива, температурни въздействия или нестабилни геодезически условия е необходим по-продължителен базов период. След началото на строителството честотата се адаптира към приближаването на забоя, текущата скорост на деформация, изменението на параметрите на ТПМ и достигнатото сигнално ниво. ITAtech препоръчва именно такъв адаптивен подход вместо еднакъв режим за всички точки и етапи (ITAtech, 2015).

Продължителността на базовия период се определя според динамиката на наблюдаваната величина. При геодезически измервания в стабилна среда няколко последователни серии могат да бъдат достатъчни. При сезонно изменчиви подземни води, температурно чувствителни сензори или съществуващи пукнатини е нужен по-дълъг период. По същата причина прекратяването на наблюдението не трябва да се обвързва само с изминал срок или с отдалечаването на забоя. Необходимо е да бъдат установени затихване на скоростта на деформация, устойчива тенденция и липса на забавена хидрогеоложка или консолидационна реакция (ITAtech, 2015).

Сигналните нива трябва да отразяват не само абсолютната стойност, но и скоростта на изменение, устойчивостта на тенденцията и съгласуваността между независимите измервания. Еднократно превишение може да се дължи на измервателна грешка. Последователна промяна в няколко системи обаче може да изисква реакция още преди достигането на абсолютния праг. Затова информационното, предупредителното и критичното ниво се обвързват с ясна процедура за потвърждаване, конкретни отговорни лица и предварително разработени технологични или конструктивни мерки.

За да имат оперативна стойност, сигналните нива трябва да бъдат свързани с матрица от действия. Тя определя кой потвърждава сигнала, в какъв срок се извършва повторното измерване, кои участници се уведомяват, какви допълнителни данни се изискват и кой има правомощие да разпорежи промяна или спиране на работите. При критични стойности, свързани с непосредствен риск, действието може да предхожда пълната диагностика. При предупредителни стойности първо се установява дали изменението е реално, устойчиво и съвместимо с геотехническият модел (Moritz & Schubert, 2009; British Tunnelling Society, 2023).

Таблица 2. Примерна рамка за честота, оценка и действие

Етап / ниво	Примерен режим	Основно действие
Базов етап	най-малко две серии, проектно определени	референтни стойности, оценка на шума и сезонността
Активна зона, <2D	непрекъснато или ежедневно	съпоставка с ТПМ и проверка на тенденцията
Преходна зона, 2D-5D	два-три пъти седмично	проследяване на затихването или вторична консолидация
След 5D	седмично до стабилизиране	потвърждаване на стабилизацията
Предупредително ниво	увеличена честота	проверка на данните и проектантски преглед
Критично ниво	непрекъснат контрол	предварително определени мерки и възможно спиране

Обработката на данните започва с автоматични проверки за липсващи записи, скокове, дрейф, промяна на референтната система и несъответствие между времевите серии. Филтрирането може да намали шума, но не бива да заличава реални краткотрайни събития. За всеки автоматично генериран сигнал трябва да се съхраняват първичната стойност, коригираният запис, основанието за корекцията и историята на предприетите действия. Само при такава проследимост данните запазват техническата и договорната си стойност.

Свързването на мониторинговите данни с BIM и числен модел създава основа за цифров близък, при който измереното поведение служи за текуща преоценка на проектния модел. Алгоритмите за машинно обучение могат да подпомагат откриването на аномалии и прогнозирането на краткосрочни тенденции. Приложимостта на дълбоки невронни мрежи при анализа на геоложки показатели е демонстрирана от Arsova-Borisova и Hristov (2021), а сходни подходи могат да бъдат използвани и при обработката на мониторингови данни. Те обаче не заменят инженерната интерпретация. При ограничен обем данни, промяна на строителната технология или силна геоложка нееднородност статистическият модел може погрешно да приеме временна корелация за причинна зависимост (Farrar & Worden, 2013).

Цифровият близък не е просто визуална платформа, а актуализиран инженерно-изчислителен модел. Неговата прогностична стойност зависи от качеството на входните данни, ясно определените гранични условия и способността да възпроизвежда наблюдаваното поведение. При промяна на геологията, технологията или подпорната схема моделът трябва да бъде оценен повторно. Без такава проверка автоматизираното обновяване може да създаде привидна точност, която не е подкрепена от реалния физически механизъм.

ДИСКУСИЯ

Броят на измервателните канали сам по себе си не е мярка за ефективността на мониторинговата система. Ограничен, но целенасочено подбран набор от независими измервания може да осигури надеждна основа за решение от гъста мрежа без стабилни референтни точки, контрол на качеството и предварително определена логика за интерпретация. Най-информативно е съвместното проследяване на различни проявления на един и същ геотехнически механизъм, например налягането на забоя, повърхностните слягания, поровото водно налягане и деформациите на близките конструкции.

Същият принцип се отнася и до избора на нови технологии. InSAR е особено полезен за регионален преглед и ретроспективен анализ, но не заменя локалните геодезически измервания. DFOS може да локализира деформационни аномалии, но изисква надеждно свързване със следения елемент и температурна компенсация. Безжичните мрежи улесняват автоматизацията, но увеличават зависимостта от комуникационното покритие и храненето. Технологичният избор трябва да произтича от информацията, необходима за конкретното инженерно решение, а не от стремеж към максимална сложност на системата.

Разстоянията спрямо тунелния забой и примерните честоти на измерване са ориентировъчни. За всеки проект те се определят според геоложките и хидрогеоложките условия, дълбочината и диаметъра на тунела, чувствителността на засегнатите конструкции и прилаганата строителна технология.

Настоящият обзор не включва количествен анализ на метрологичната неопределеност, взаимната зависимост между измервателните величини и отражението им върху надеждността на инженерната интерпретация. В реален проект тези въпроси се включват изрично в плана за качество чрез изисквания за калибриране, метрологична проследимост, оценка на неопределеността, контрол на качеството на данните и процедури за проверка на аномалии и сигнални събития.

Зависимостта между измерванията има двоен характер. Една част е физически обоснована, например връзката между понижаването на поровото налягане и консолидационното слягане. Друга може да произтича от обща референция, температура, хранене или алгоритъм за филтриране. Затова оценката на неопределеността не се изчерпва с точността на отделния сензор. Тя обхваща и общите източници на грешка, както и начина, по който те влияят върху заключението за поведението на системата. При решения с критично значение е необходима независима проверка, основана на различен измервателен принцип (Dunnicliff, 1993; Farrar & Worden, 2013).

В българската практика основният въпрос не е наличието на съвременни измервателни технологии, а последователното им свързване с проектните допускания, договорно определените отговорности и процедурите за вземане на решения. Съществено подобрене би донесло системното прилагане на БДС EN 1997-1:2024, общите правила на ISO 18674-1:2015, приложимите специализирани части на

серията ISO 18674 и предварително разработени процедури за базови измервания, потвърждаване на сигналите, оценка на тенденциите и документиране на предприетите действия. Данните могат да подпомогнат и техническото изясняване на договорни спорове, но само ако тяхната достоверност, времева последователност и произход са проследими и предварително е ясно кои проектни хипотези, гранични стойности и рискови механизми се проверяват чрез съответните измервания.

Мониторинговият план трябва да бъде управленски и договорен документ, а не само приложение към проекта. В него се определят собствеността върху данните, форматите и периодичността на обмен, правилата за архивиране, сроковете за реакция, отговорността за техническата интерпретация и връзката с инструкциите за изпълнение. Така мониторингът подпомага както безопасността, така и обективното установяване на причините при отклонения, претенции и спорове. Когато липсва проследима връзка между измерването, проектното допускане и предприетото действие, доказателствената стойност на данните остава ограничена, независимо от техническата им точност (British Tunnelling Society, 2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геотехническият и конструктивният мониторинг е неразделна част от активното управление на риска и от самата строителна технология. Той има реална стойност, когато базовите измервания, проектният модел, оперативните параметри и сигналните нива са свързани в последователна процедура за оценка и действие.

Конвенционалните инструменти, DFOS, InSAR, DAS и безжичните мрежи имат различни предимства и ограничения и трябва да се използват като взаимно допълващи се средства. Разполагането на инструментите и честотата на измерване произтичат от очаквания механизъм на поведение, уязвимостта на съществуващите обекти и реално наблюдаваната тенденция, а не от механично пренасяне на типови схеми.

Надеждната система се основава на проследимата връзка между измерването, интерпретацията и решението. Качеството на данните, независимата проверка, ясно разпределените отговорности и предварително разработените мерки са по-важни от броя на сензорите. Автоматизираният анализ и цифровите близнаци разширяват възможностите на инженерния екип, но окончателната оценка и отговорността за предприетите действия остават инженерни. Зрелостта на мониторинговата система се определя не от технологичната наситеност, а от способността да преобразува надеждно измерването в своевременно, обосновано и проследимо инженерно решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arsova-Borisova, K., & Hristov, V. (2021). Deep neural networks applications in the study of a geological indicator. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal*, 2, 25-28.
2. Балев, В. (2024). Съвременни методи за геотехнически анализ и мониторинг при тунелно и подземното строителство. Сборник с доклади от IX Национална научно-техническа конференция „Технологии и практики при подземен добив и минно строителство“, Девин, 88-95.
3. BIS. (2024). BDS EN 1997-1:2024. Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. Bulgarian Institute for Standardization.
4. British Tunnelling Society. (2023). Specification for Tunnelling (4th ed.). Thomas Telford.
5. CEN. (2004). EN 1997-1:2004. Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. European Committee for Standardization.
6. Dunnicliff, J. (1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. John Wiley & Sons.
7. Farrar, C. R., & Worden, K. (2013). *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons.
8. Hong, C., Zhang, J., Zhang, Y., Qin, X., Chen, X., Jia, K., Dai, J., Wu, C., Rao, W., & Guan, M. (2024). Multi-scale monitoring and safety assessment of a prefabricated subway station integrating space-borne

- InSAR, ground-based machine vision and internal distributed fiber optic sensors. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), 2433606. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2433606>
9. International Organization for Standardization. (2015). ISO 18674-1:2015. Geotechnical investigation and testing - Geotechnical monitoring by field instrumentation - Part 1: General rules. ISO.
 10. International Organization for Standardization. (2016). ISO 18674-2:2016. Geotechnical investigation and testing - Geotechnical monitoring by field instrumentation - Part 2: Measurement of displacements along a line: Extensometers. ISO.
 11. International Organization for Standardization. (2017). ISO 18674-3:2017. Geotechnical investigation and testing - Geotechnical monitoring by field instrumentation - Part 3: Measurement of displacements across a line: Inclinometers. ISO.
 12. International Organization for Standardization. (2020). ISO 18674-4:2020. Geotechnical investigation and testing - Geotechnical monitoring by field instrumentation - Part 4: Measurement of pore water pressure: Piezometers. ISO.
 13. ITAtech. (2015). Guidelines on Monitoring Frequencies in Urban Tunnelling. ITAtech Activity Group Monitoring.
 14. Lienhart, W., Buchmayer, F., Klug, F., & Monsberger, C. M. (2019). Distributed fibre-optic sensing applications at the Semmering Base Tunnel, Austria. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 172(4), 148-159. <https://doi.org/10.1680/jsmic.20.00006>
 15. Lindsey, N. J., & Martin, E. R. (2021). Fiber-optic seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49, 309-336. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-072420-065213>
 16. Mair, R. J. (2008). Tunnelling and geotechnics: new horizons. *Géotechnique*, 58(9), 695-736. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.9.695>
 17. Mair, R. J., & Taylor, R. N. (1997). Bored tunnelling in the urban environment. *Proceedings of the 14th ICSMFE, Hamburg*, 4, 2353-2385.
 18. Monsberger, C., Bauer, P., Buchmayer, F., & Lienhart, W. (2022). Large-scale distributed fiber optic sensing network for short- and long-term integrity monitoring of tunnel linings. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 12, 1317-1327. <https://doi.org/10.1007/s13349-022-00560-w>
 19. Moritz, B., & Schubert, W. (2009). Application of the observational method in geotechnical safety management. *Geomechanics and Tunnelling*, 2(3), 269-281. <https://doi.org/10.1002/geot.200900021>
 20. Pavlov, P., & Djorgov, A. (2014). Change of the stress state of the soil by strengthening before the tunnel boring machine crosses the ground under buildings facilities. *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"*, 57(II), 76-79.
 21. Pavlov, P., Totev, L., & Tondera, D. (2012). Einsatz einer Tunnel-Bohrmaschine bei der Auffahrung des zweiten U-Bahn-Tunnels der Sofioter Metro. *Scientific Reports on Resource Issues*, 2, 228-234. TU Bergakademie Freiberg. ISSN 2190-555X.
 22. Peck, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19(2), 171-187.
 23. Schubert, W., & Lauffer, H. (2012). NATM - from a construction method to a system. *Geomechanics and Tunnelling*, 5(5), 455-463. <https://doi.org/10.1002/geot.201200032>
 24. Zhang, X., Zhu, H., Jiang, X., & Broere, W. (2024). Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(9), 3841-3863. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.008>



TOPIC D

Stability assessment. Dynamic impacts. Manifestations of rock pressure. Probabilistic approach. Hazard and risk in geomechanics. Artificial intelligence

Оценка на устойчивото състояние. Динамични въздействия. Прояви на скалния натиск. Вероятностен подход. Опасност и риск в геомеханиката. Изкуствен интелект

MACHINE LEARNING-BASED PREDICTION OF PERMEABILITY IN ANTHROPOGENIC AGGREGATES: TOWARDS SIMPLIFIED ENGINEERING MODELS

Justyna Dzieciol^{1*}

¹ Institute of Civil Engineering, Warsaw University of Life Sciences – WULS, Warsaw, Poland

*e-mail: justyna_dzieciol@sggw.edu.pl

ABSTRACT

The increasing use of anthropogenic aggregates in sustainable geotechnical engineering creates a need for reliable and cost-effective permeability assessment. This paper proposes the TRIM (Test Reduction through Interpretable Machine Learning) framework for engineering-oriented optimization of laboratory characterization. The framework integrates ensemble-learning methods with explainable artificial intelligence (XAI) to support the identification of a Lean Parameter Set (LPS), representing the smallest practical set of laboratory parameters required for reliable permeability prediction. The proposed methodology provides a conceptual basis for reducing laboratory effort while supporting transparent, interpretable, and practically applicable machine-learning models for anthropogenic aggregates.

Keywords: anthropogenic aggregates, permeability coefficient, hydraulic conductivity, machine learning, ensemble learning, explainable artificial intelligence (XAI), TRIM framework, Lean Parameter Set (LPS), blast furnace slag, geotechnical engineering.

1. Introduction

The increasing implementation of circular economy principles has accelerated the use of anthropogenic aggregates in civil and geotechnical engineering. Recycled concrete aggregate (RCA), blast furnace slag (BFS), steel slag, and other industrial by-products are increasingly used in road embankments, pavement subbases, drainage systems, and earth structures as sustainable alternatives to natural aggregates. Their application reduces the consumption of primary mineral resources, limits landfill disposal, and supports environmentally responsible construction practices. Comprehensive reviews indicate that the long-term implementation of recycled geomaterials requires reliable characterization of their hydraulic, mechanical, and environmental properties, particularly in transportation and geotechnical infrastructure [1,2]. Among the engineering properties governing the performance of these materials, the permeability coefficient is of particular importance because it directly influences seepage, drainage efficiency, filtration capacity, frost susceptibility, and the long-term durability of geotechnical structures. Reliable permeability assessment is therefore essential during material selection and engineering design. However, laboratory determination of hydraulic conductivity remains laborious, expensive, and time-consuming, particularly for heterogeneous anthropogenic geomaterials whose hydraulic behavior depends on particle-size distribution, density, porosity, compaction conditions, and material origin. Similar challenges have also been reported for natural soils and porous geomaterials, motivating extensive research into data-driven prediction methods [3,4].

Initial investigations of anthropogenic aggregates focused on experimental characterization of hydraulic and environmental properties. Studies on recycled concrete aggregates confirmed their suitability for earth structures while highlighting the relationship between permeability and leaching behavior [5]. Similar investigations demonstrated the engineering potential of steel slags as alternative construction materials [6], and analytical approaches for estimating the permeability coefficient of recycled aggregates were subsequently proposed [7]. Comparable developments have been reported for porous rocks and carbonate reservoirs, where machine-learning and analytical models have progressively replaced conventional empirical permeability correlations [8,9]. The development of machine learning has created new opportunities for predicting the hydraulic properties of soils and porous materials. Recent studies consistently demonstrate that ensemble-learning algorithms, particularly Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost, and CatBoost, outperform many traditional empirical and analytical approaches in permeability and hydraulic conductivity

prediction [1,3]. Comparable conclusions have been reported for permeability prediction in porous media using neural networks and image-based learning [8], as well as for digital rock applications employing deep-learning techniques [9]. Subsequent investigations also confirmed the applicability of Random Forest and boosting algorithms to anthropogenic aggregates, showing that accurate prediction can be achieved using laboratory-derived physical and granulometric parameters [10,11]. More recently, machine-learning techniques have been extended beyond prediction itself to support the efficient management and engineering evaluation of anthropogenic materials [12]. Despite these advances, current research has largely focused on improving prediction accuracy by increasing model complexity or incorporating a growing number of laboratory variables. At the same time, recent developments in explainable artificial intelligence (XAI), physics-guided machine learning, and uncertainty-aware modeling indicate a gradual shift from purely accuracy-oriented prediction toward more reliable and physically interpretable engineering models [13,14]. Despite these advances, relatively little attention has been devoted to optimizing laboratory characterization itself, particularly with respect to identifying the minimum set of experimentally determined variables required to maintain reliable permeability prediction. From an engineering perspective, reducing laboratory testing while preserving predictive performance could substantially decrease experimental costs and facilitate the practical implementation of machine-learning methods. To address this research gap, the present paper proposes the Test Reduction through Interpretable Machine Learning (TRIM) framework as a conceptual engineering approach for optimizing laboratory characterization in permeability prediction of anthropogenic aggregates.

2. Evolution of Machine Learning-Based Permeability Prediction in Anthropogenic Aggregates

2.1 From Experimental Characterization to Predictive Models

Research on anthropogenic aggregates has traditionally focused on experimental investigations aimed at understanding their hydraulic, mechanical, and environmental behavior, with particular attention devoted to recycled concrete aggregate (RCA), blast furnace slag (BFS), and steel slag because of their growing application in sustainable road construction and geotechnical engineering. These studies demonstrated that anthropogenic aggregates exhibit hydraulic properties broadly comparable to those of conventional natural aggregates, while also showing considerably greater variability associated with production technology, particle morphology, residual mortar content, and internal pore structure [5,6]. Comparable observations have been reported for natural soils, granular geomaterials, and porous rocks, where permeability has repeatedly been shown to depend primarily on pore connectivity, particle-size distribution, porosity, tortuosity, and pore-network geometry rather than on total porosity alone [3,15]. More recent investigations employing X-ray CT and digital rock analysis have further confirmed that connected porosity and pore-throat architecture govern fluid transport in heterogeneous porous media [16]. To facilitate engineering applications, analytical models relating the permeability coefficient to selected physical properties were subsequently developed. An approach dedicated specifically to RCA was proposed by Sas et al. [7], who demonstrated that permeability could be estimated from experimentally determined physical parameters. Their applicability remained limited by simplifying assumptions and reduced flexibility when applied to highly heterogeneous anthropogenic materials. Analogous limitations of empirical permeability equations have also been reported in soil mechanics, motivating the search for more robust, data-driven prediction methods [4].

2.2 Emergence of Machine Learning Approaches

The rapid development of machine learning introduced a new paradigm for permeability prediction, replacing predefined analytical relationships with data-driven models capable of learning complex nonlinear interactions among laboratory variables. Over the past decade, machine learning methods have gained increasing popularity in geotechnical engineering, as they require fewer assumptions about material behavior while delivering substantially improved predictive performance. Early review studies highlighted the considerable potential of machine-learning algorithms for estimating flow parameters in recycled construction materials and identified ensemble-learning methods as particularly promising tools for civil engineering applications [1,17]. These conclusions are consistent with broader developments in hydraulic conductivity prediction, where

Random Forest, Gradient Boosting and XGBoost, have repeatedly outperformed conventional empirical equations [3,18,19].

Machine learning has likewise gained importance in rock physics and porous-media characterization. Neural networks, transformer-based architectures, and hybrid deep-learning models have demonstrated excellent predictive capability when permeability is estimated directly from pore-scale images or CT-derived structural descriptors [9,20]. Random Forest demonstrated excellent performance for permeability estimation of blast furnace slag while preserving satisfactory model robustness and interpretability [10]. Comparable conclusions were obtained using AdaBoost, confirming that ensemble-learning techniques constitute reliable tools for permeability prediction under heterogeneous laboratory conditions [21]. More recently, machine-learning methods have also been proposed as decision-support tools for the sustainable management of anthropogenic materials [12].

2.3 Current Challenges in Machine Learning-Based Permeability Prediction

Despite the substantial improvement in predictive accuracy achieved in recent years, several important challenges remain unresolved. Most published machine-learning models rely on relatively large laboratory datasets describing particle-size distribution, density, porosity, compaction characteristics, moisture conditions, and additional material descriptors. Increasing the number of input variables frequently improves prediction accuracy but also increases laboratory effort, experimental cost, and model complexity. At the same time, recent advances in Explainable Artificial Intelligence (XAI) indicate that only a limited subset of laboratory variables dominates model predictions. SHAP-based analyses consistently identify physically meaningful descriptors, such as characteristic particle diameters, porosity, dry density, void ratio, and particle-size distribution parameters, as the most influential predictors of permeability and hydraulic conductivity [22,23]. Recent advances in explainable artificial intelligence and uncertainty-aware machine learning have shifted the focus from prediction accuracy alone toward developing models that are more robust, interpretable, and suitable for engineering applications [13,14]. These observations suggest that future advances in permeability prediction should focus not only on developing increasingly sophisticated algorithms but also on optimizing laboratory characterization through systematic reduction of input variables while preserving engineering reliability.

2.4 Motivation for the TRIM Framework

The evolution of permeability prediction demonstrates a clear transition from laboratory characterization and analytical formulations toward advanced machine-learning models with increasing predictive capability. Despite this progress, the literature has focused predominantly on improving model performance, whereas comparatively little attention has been devoted to optimizing the laboratory information required for reliable prediction. Consequently, the next logical step is not necessarily the development of increasingly sophisticated prediction algorithms but the optimization of laboratory characterization itself. This observation motivates the proposed Test Reduction through Interpretable Machine Learning (TRIM) framework, which introduces an engineering-oriented perspective by considering predictive performance together with laboratory effort and practical applicability. Table 1 summarizes this evolution and highlights the research gap addressed in the present study.

Table 1. Evolution of permeability prediction in anthropogenic aggregates

Research stage	Main objective	Representative methods	Representative studies	Remaining challenge
Experimental characterization	Determine permeability through laboratory testing	Constant-head and falling-head tests; laboratory characterization	Gluchowski et al. [5]; Sas et al. [6]	Time-consuming and expensive laboratory investigations
Analytical prediction	Estimate permeability using empirical relationships	Analytical equations based on physical parameters	Sas et al. [7]	Limited applicability to heterogeneous materials

Research stage	Main objective	Representative methods	Representative studies	Remaining challenge
Machine-learning prediction	Improve prediction accuracy	ANN, Random Forest, AdaBoost, XGBoost, CatBoost	Dzięcioł & Sas [1]; Dzięcioł [17]; Dzięcioł & Sas [10]; Yaghoubi et al. [2]	Increasing number of laboratory input variables
Advanced machine learning	Improve robustness and predictive capability	CNN, Transformers, transfer learning	Zhong et al. [8]; Meng et al. [9]; Geng et al. [20]	High data requirements and limited interpretability
Interpretable and physics-guided AI	Improve transparency and engineering credibility	SHAP, XAI, Physics-Guided ML, Physics-Constrained ML	Zounemat-Kermani & Kheimi [13]; Zhang & Darilmaz [11]	Optimization of laboratory characterization remains largely unexplored

As illustrated in Table 1, previous developments have primarily focused on improving predictive capability, whereas engineering-oriented optimization of laboratory characterization remains largely unexplored. The proposed TRIM framework is intended to address this research gap.

3. Proposed Test Reduction via Interpretable Machine-learning (TRIM) Framework

Building upon the research gap identified in Section 2, this paper proposes the Test Reduction through Interpretable Machine Learning (TRIM) framework as a conceptual engineering approach for optimizing laboratory characterization in permeability prediction of anthropogenic aggregates. Rather than introducing another machine-learning algorithm, the proposed framework is intended to support the identification of a Lean Parameter Set (LPS), defined as the smallest practical subset of laboratory parameters expected to maintain reliable predictive performance while reducing laboratory effort.

The proposed framework is based on the assumption that laboratory variables do not contribute equally to permeability prediction. Previous studies have consistently demonstrated that a limited group of physically meaningful parameters, including particle-size distribution descriptors, dry density, porosity, and void ratio, often dominate prediction performance, whereas additional laboratory measurements may provide only marginal improvements despite increasing experimental effort [11,22].

Consequently, the proposed optimization strategy assumes that laboratory characterization may be simplified without substantially compromising predictive capability, provided that variable selection simultaneously considers predictive relevance, physical interpretation, measurement effort, and engineering applicability. Unlike conventional feature-selection procedures, which primarily optimize statistical performance, TRIM is intended to integrate engineering considerations directly into the optimization process. Instead of selecting variables solely because they improve prediction accuracy, each laboratory parameter would be evaluated according to four complementary criteria reflecting both machine-learning performance and practical engineering requirements (Table 2).

Table 2. Engineering-oriented criteria applied in TRIM.

Criterion	Objective	Engineering significance
Predictive importance	Maintain high prediction accuracy	Preserve model performance
Physical relevance	Retain physically meaningful variables	Improve engineering credibility
Laboratory effort	Minimize required laboratory measurements	Reduce testing time and costs
Practical applicability	Use parameters routinely determined in engineering laboratories	Facilitate practical implementation

The proposed TRIM process is shown in Figure 1. First, laboratory data would be collected, verified, and preprocessed using standard quality-control procedures. Second, baseline ensemble-learning models would be developed using the complete laboratory dataset. Third, Explainable Artificial Intelligence (XAI) techniques would be employed to quantify the contribution of individual laboratory parameters and establish their relative engineering relevance. Finally, laboratory variables would be progressively evaluated for elimination through an iterative optimization procedure in which predictive performance and laboratory effort are jointly assessed. The objective of this process would be to identify a candidate Lean Parameter Set (LPS) representing the smallest practical subset of laboratory variables expected to preserve satisfactory predictive performance.

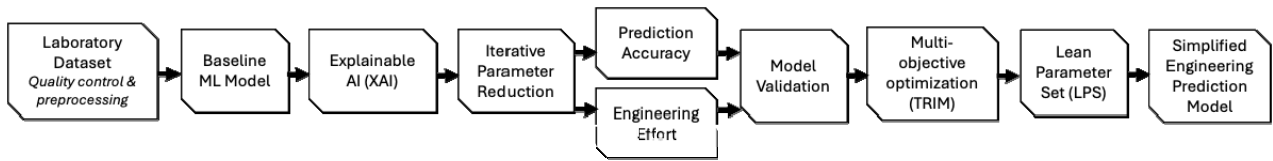


Figure 1. Workflow of the TRIM framework.

The proposed framework extends conventional machine-learning workflows by introducing an engineering-oriented optimization stage intended to identify a candidate Lean Parameter Set (LPS) for reliable permeability prediction with reduced laboratory characterization. TRIM is formulated as an algorithm-independent conceptual framework that may be implemented using various regression techniques.

4. Explainable Artificial Intelligence within the TRIM Framework

The proposed Test Reduction through Interpretable Machine Learning (TRIM) framework assumes that Explainable Artificial Intelligence (XAI) may provide the analytical basis for identifying the Lean Parameter Set (LPS). Rather than treating explainability solely as a post hoc model interpretation tool, the proposed framework considers XAI as a potential mechanism supporting engineering-oriented reduction of laboratory testing by identifying variables that contribute most significantly to reliable permeability prediction. Among currently available explainability techniques, SHapley Additive exPlanations (SHAP) appear particularly suitable for this purpose because they provide both global and local measures of feature importance while preserving physical interpretability through a theoretical foundation based on cooperative game theory [25]. Recent reviews indicate that SHAP has become one of the most widely adopted explainability techniques in hydrology and geotechnical machine learning [15]. SHAP may effectively identify laboratory variables governing permeability and hydraulic conductivity across different geomaterials. Studies involving compacted bentonite [23], polymer-amended soil-bentonite cutoff walls [24], and coarse-grained road materials [26] consistently indicate that only a limited subset of experimentally determined variables dominates model predictions. These findings provide the conceptual motivation for applying explainability-based feature optimization to anthropogenic aggregates. Within the proposed TRIM framework, laboratory variables would be ranked according to their contribution to predictive performance using SHAP and complementary explainability techniques. Variables exhibiting consistently low importance could subsequently be considered candidates for elimination, whereas variables demonstrating both high predictive contribution and clear engineering interpretation would form the proposed Lean Parameter Set (LPS). Consequently, feature selection would no longer depend exclusively on statistical performance but would additionally consider physical relevance and laboratory practicality. Although SHAP constitutes the principal explainability technique considered within TRIM, complementary methods may further strengthen the proposed optimization procedure. Partial Dependence Plots (PDP) may verify whether identified relationships remain physically meaningful, Individual Conditional Expectation (ICE) may support interpretation of sample-specific behavior, whereas permutation importance may provide independent validation of feature rankings (Table 3).

Table 3. Role of explainable artificial intelligence within the TRIM framework.

XAI technique	Primary purpose	Potential contribution to TRIM
SHAP	Global and local feature attribution	Identification of candidate variables for the Lean Parameter Set
Model-based feature importance	Initial ranking of predictor relevance	Preliminary feature screening
Permutation importance	Independent validation of feature relevance	Confirmation of variable ranking robustness
Partial Dependence Plots (PDP)	Analysis of nonlinear feature effects	Verification of engineering consistency
Individual Conditional Expectation (ICE)	Analysis of sample-specific responses	Identification of heterogeneous predictor behavior

The combined application of these explainability techniques is expected to increase confidence in the proposed optimization process by reducing the likelihood that variable selection is driven by statistical artefacts rather than genuine physical relationships. This aspect may be particularly important for anthropogenic aggregates, where heterogeneous material origin and relatively limited experimental datasets frequently complicate predictive modelling. It should be emphasized that the proposed role of XAI within TRIM remains conceptual. The present study does not demonstrate the effectiveness of explainability-based laboratory optimization but proposes a research framework integrating recent advances in ensemble learning, explainable artificial intelligence, and engineering-oriented feature selection. Experimental validation of the proposed Lean Parameter Set (LPS) using laboratory datasets representing different categories of anthropogenic aggregates constitutes the next stage of this research.

5. Conclusions

This paper proposes Test Reduction through Interpretable Machine Learning (TRIM) as a conceptual framework for engineering-oriented optimization of laboratory characterization in permeability prediction of anthropogenic aggregates. Unlike conventional machine-learning studies, which primarily focus on maximizing predictive accuracy, the proposed framework shifts the optimization objective toward reducing laboratory effort while maintaining reliable engineering predictions. The central concept of TRIM is the proposed Lean Parameter Set (LPS), defined as the smallest practical subset of laboratory variables expected to preserve satisfactory predictive performance. Within this framework, Explainable Artificial Intelligence (XAI) is proposed not only as a model interpretation tool but also as a potential mechanism supporting engineering-oriented feature selection by combining statistical importance with physical relevance and practical laboratory considerations. It should be emphasized that TRIM represents a conceptual engineering framework rather than a validated optimization methodology. The present study establishes its theoretical foundations by integrating current developments in ensemble learning, explainable artificial intelligence, and engineering-oriented feature selection into a unified approach for laboratory test reduction. Experimental verification of the framework, including validation of the proposed Lean Parameter Set using laboratory datasets representing different categories of anthropogenic aggregates, constitutes the next stage of this research.

If successfully validated, the proposed framework may contribute to the development of simplified, interpretable, and practically applicable machine-learning models requiring fewer laboratory measurements while maintaining reliable permeability prediction. Such an approach has the potential to improve the efficiency of laboratory investigations and support the broader implementation of anthropogenic aggregates in sustainable geotechnical engineering.

6. References

1. Dzięcioł, J.; Sas, W. Perspective on the Application of Machine Learning Algorithms for Flow Parameter Estimation in Recycled Concrete Aggregate. *Materials* 2023, Vol. 16, Page 1500 2023, 16, 1500, doi:10.3390/MA16041500.
2. Yaghoubi, E.; Yaghoubi, E.; Khamees, A.; Vakili, A.H. A Systematic Review and Meta-Analysis of Artificial Neural Network, Machine Learning, Deep Learning, and Ensemble Learning Approaches in Field of Geotechnical Engineering. *Neural Comput. Appl.* 2024, 36, 12655–12699, doi:10.1007/s00521-024-09893-7.
3. Araya, S.N.; Ghezzehei, T.A. Using Machine Learning for Prediction of Saturated Hydraulic Conductivity and Its Sensitivity to Soil Structural Perturbations. *Water Resour. Res.* 2019, 55, 5715–5737, doi:10.1029/2018WR024357.
4. Erofeev, A.; Orlov, D.; Ryzhov, A.; Koroteev, D. Prediction of Porosity and Permeability Alteration Based on Machine Learning Algorithms. *Transp. Porous Media* 2019, 128, 677–700, doi:10.1007/s11242-019-01265-3.

5. Głuchowski, A.; Sas, W.; Dziecioł, J.; Soból, E.; Szymański, A. Permeability and Leaching Properties of Recycled Concrete Aggregate as an Emerging Material in Civil Engineering. *Applied Sciences* (Switzerland) 2018, 9, 81, doi:10.3390/app9010081.
6. Sas, W.; Głuchowski, A.; Radziemska, M.; Dziecioł, J.; Szymański, A. Environmental and Geotechnical Assessment of the Steel Slags as a Material for Road Structure. *Materials* 2015, 8, 4857–4875, doi:10.3390/ma8084857.
7. Sas, W.; Dziecioł, J.; Głuchowski, A. Estimation of Recycled Concrete Aggregate's Water Permeability Coefficient as Earth Construction Material with the Application of an Analytical Method. *Materials* 2019, 12, 2920, doi:10.3390/ma12182920.
8. Al Khalifah, H.; Glover, P.W.J.; Lorinczi, P. Permeability Prediction and Diagenesis in Tight Carbonates Using Machine Learning Techniques. *Mar. Pet. Geol.* 2020, 112, 104096, doi:10.1016/j.marpetgeo.2019.104096.
9. Amini, K.; Jalalpour, M.; Delatte, N. Advancing Concrete Strength Prediction Using Non-Destructive Testing: Development and Verification of a Generalizable Model. *Constr. Build. Mater.* 2016, 102, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.131.
10. Zhong, Z.; Carr, T.R.; Wu, X.; Wang, G. Application of a Convolutional Neural Network in Permeability Prediction: A Case Study in the Jacksonburg-Stringtown Oil Field, West Virginia, USA. *Geophysics* 2019, 84, B363–B373, doi:10.1190/geo2018-0588.1.
11. Meng, Y.; Jiang, J.; Wu, J.; Wang, D. Transformer-Based Deep Learning Models for Predicting Permeability of Porous Media. *Adv. Water Resour.* 2023, 179, 104520, doi:10.1016/j.advwatres.2023.104520.
12. Dziecioł, J.; Sas, W. Estimation of the Coefficient of Permeability as an Example of the Application of the Random Forest Algorithm in Civil Engineering. *Archives of Civil Engineering* 2024, 119–134, doi:10.24425/ace.2024.149854.
13. Zhang, Y.; Darilmaz, A. Physics-Constrained Machine Learning Modeling for Geotechnical Data Prediction: Case Study on Site Soil Type and Bedrock Depth Datasets. *Geotechnics* 2026, 6, 20, doi:10.3390/geotechnics6010020.
14. Dziecioł, J.; Tracz, R.; Kowalski, J. Could Machine Learning Algorithms Affect the Efficient Management of Anthropogenic Materials? *Archives of Civil Engineering* 2026, 565–565, doi:10.24425/ace.2026.157492.
15. Zounemat-Kermani, M.; Kheimi, M. Explainable Artificial Intelligence in Hydrology: A Review. *Water Resources Management* 2026, 40, 106, doi:10.1007/s11269-025-04435-9.
16. Khassaf, A.K.; Al-hameed, Z.M.; Al-Mohammedawi, N.R.; Al-Mudhafar, W.J.; Wood, D.A.; Abbas, M.A.; Ameer-Zaimeche, O.; Alsubaih, A.A. Physics-Informed Machine Learning for Enhanced Permeability Prediction in Heterogeneous Carbonate Reservoirs. In *Proceedings of the Offshore Technology Conference; OTC*, April 28 2025.
17. Bagnall, D.; Morgan, C.L.S.; Molling, C.C.; Heilman, J.L.; Moore, G.W. Testing a Water Redistribution Model in a Cracked Vertisol at Two Scales. *Vadose Zone Journal* 2019, 18, 1–11, doi:10.2136/vzj2018.09.0173.
18. Ben Saleh, W.; Zhang, B. Modeling with Confidence: Leveraging Conformal Prediction for Calibrated Machine Learning Based Mechanical and Petrophysical Models. In *Proceedings of the 59th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium; ARMA*, June 8 2025.
19. Dziecioł, J. Machine Learning in Civil Engineering - on the Example of Prediction of the Coefficient of Permeability. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura* 2024, 22, doi:10.22630/aspa.2023.22.18.
20. Kotlar, A.M.; Iversen, B. V.; de Jong van Lier, Q. Evaluation of Parametric and Nonparametric Machine-Learning Techniques for Prediction of Saturated and Near-Saturated Hydraulic Conductivity. *Vadose Zone Journal* 2019, 18, 1–13, doi:10.2136/vzj2018.07.0141.
21. Geng, S.; Zhai, S.; Li, C. Swin Transformer Based Transfer Learning Model for Predicting Porous Media Permeability from 2D Images. *Comput. Geotech.* 2024, 168, 106177, doi:10.1016/j.compgeo.2024.106177.

22. Dzięcioł, J.; Sas, W. Estimation of the Permeability Coefficient of Recycled Concrete Aggregates Using Machine Learning Algorithms: AdaBoost and Artificial Neural Networks. *Soils and Rocks* 2025, 48, 1–10, doi:10.28927/SR.2025.002525.
23. Shi, X.; Zhang, P.; Feng, J.; Xu, K.; Fang, Z.; Tian, J.; Wu, T. Improving Hydraulic Conductivity Prediction of Bentonite Using Machine Learning with Generative Adversarial Network-Based Data Augmentation. *Constr. Build. Mater.* 2025, 462, 139962, doi:10.1016/j.conbuildmat.2025.139962.
24. Zhuang, H.; Fu, X.-L.; Ni, H.; Du, Y.-J. Prediction and Interpretability Analysis of Hydraulic Conductivity for Polymer-Amended Soil-Bentonite Cutoff Wall Backfills Using Machine Learning Methods. *Environ. Res.* 2025, 286, 122960, doi:10.1016/j.envres.2025.122960.
25. Hart, S. Shapley Value. *Game Theory* 1989, 210–216, doi:10.1007/978-1-349-20181-5_25.
26. Ghanizadeh, A.R.; Firouzanjbar, S.; Amlashi, A.T.; Eid, E.; Dessouky, S. Novel Integration of Forensic-Based Investigation Optimization Algorithm and Ensemble Learning for Estimating Hydraulic Conductivity of Coarse-Grained Road Materials. *Transportation Geotechnics* 2025, 54, 101624, doi:10.1016/j.trgeo.2025.101624.

IMPACT OF EXTREME RAINFALL RISKS ON OPENCAST MINES PLANNED DEWATERING AND-SLOPE STABILITY

Pavlovic N.^{1*}, Petrovic B.², Subaranovic T.³, Pavlovic V.⁴

^{1*} University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Associate researcher,
natalija.pavlovic@rgf.bg.ac.rs

² Joint Stock Company Elektroprivreda Srbije, MB Kolubara

³ University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Professor

⁴ Opencast Mining Centre, Belgrade, Director

ABSTRACT

Natural cyclical global climate change increases extreme rainfall and flooding in some regions, raising risks in opencast mining. These changes affect hydrogeological and hydrological conditions, requiring continuous redesign and optimization of dewatering systems aligned with geomechanical conditions and environmental standards. Evolving geotechnical properties of excavated materials demand careful monitoring of slope stability, including factors of safety and failure probabilities, especially for overburden dumps. This paper analyzes slope instability at the upper bench of an overburden dump at the opencast coal mine Field E, highlighting key risks and mitigation measures.

Introduction

Dewatering of opencast mines is conditioned by very dynamic mining processes that are influenced by many natural, geotechnical, technological, economic, climatic, ecological, and safety factors and restrictions throughout all periods of the life cycle. Dewatering is one of the key processes for slope stability and for providing technical support for the realization of the opening, planned development, production, and closure of an opencast mine, as well as the process of rehabilitation with reclamation.

Management of stochastic processes of opencast mine dewatering, geotechnical (slope stability), and hydrological subsystems, serially connected as a complex system (DGH), should continuously ensure unhindered, environmentally sustainable functioning in increasingly challenging climatic conditions. Extreme and increasingly frequent precipitation, stormwater, and the possibility of flooding due to climate change generate additional risks for surface water-related equipment, infrastructure, production, and slope stability, requiring an ever-increasing need for new decisions and adaptive dewatering measures in opencast mines [3, 6, 7, 9]. The current impacts and future anticipated risks associated with extreme climate events demand sustainable solutions for climate change adaptation and stormwater and flood disaster risk reduction, which are particularly pronounced in opencast mines. These solutions include flood insurance, forecasting, and early dewatering and slope stability monitoring and warning systems, constant designing and planning of the dynamics of DGH operation in accordance with reliability, costs, new return periods, and increasing the level of management, education, and responsibility. Quantitative analysis with calculation of the probabilities of occurrence of such stochastic events and assessment of the corresponding economic consequences enable the definition of risk and optimization of DGH parameters.

Increased requirements for the process of progressive and integrated dewatering in all phases of the development of opencast mines have led to a significant step forward in technical and technological research, and the improvement of equipment, which is accompanied by many papers, standards, and regulations in this area [1, 2, 10]. There is also a considerable amount of research worldwide in all water-related scientific fields regarding floods and hydrological and geotechnical conditions [4, 5, 6, 9, 11].

Catastrophic floods around the world have caused enormous consequences, including high costs for the rehabilitation of infrastructure facilities, equipment, the stabilization of landslides, and production [7, 8] (Figure 1). This has caused the need for serious changes in the approach to dewatering and the planning of DSH facilities for opencast mine construction, with respect to shortening the return periods of heavy rainfall and increasing DSH reliability, in accordance with life cycle risk and environmental management analyses and

procedures and the series of globally accepted standards ISO 14001:2026 and ISO 31000:2018, aligned with the Plan-Do-Check-Act cycle, which is a common model for management system design.

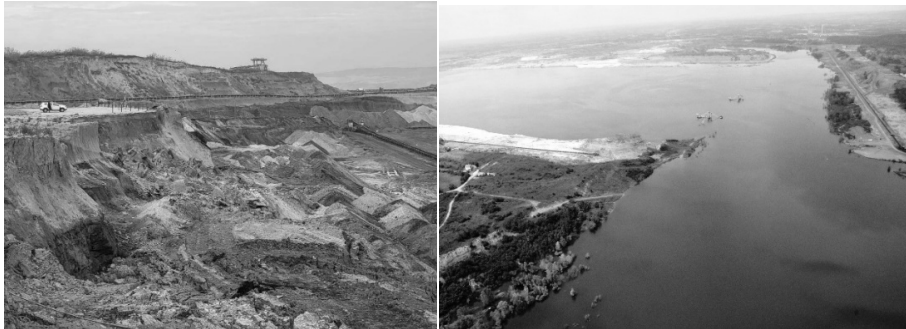


Figure 1 Landslide and flood on Serbian opencast mines

The dewatering systems play a key role in controlling the flow and accumulation of water in opencast mines. Effective systems maintain a balance of forces in the working environment and reduce the risk of opencast mine slope instability, which often geotechnically results in reduced shear strength and potentially catastrophic slope failure. Progressively correct dimensioning of dewatering facilities enables the reduction of pore water pressure in the working environment materials, the prevention of slope erosion, and the control of the inflow of large amounts of water, thereby mitigating the effects of flooding. Therefore, it is necessary to optimize the capacities of the elements of the surface and groundwater drainage subsystems in relation to the costs of increased risk.

A detailed study of the problem of flooding is mainly related to large cities, but these experiences and research can also be applied to opencast mines. The changes in the 21st century compared to the 20th century are significant. Thus, for the Tokyo area, it was determined that the return period of floods and storms of 50 years before global climate change now corresponds to a return period of 20 years (Figure 2) [4].

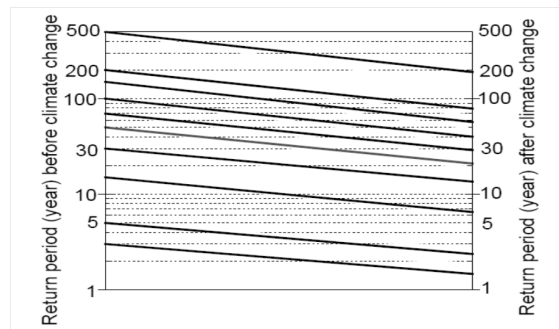


Figure 2 Return periods for the 20th and 21st centuries [4]

Increasing the reliability of the opencast mine dewatering system and slope stability, i.e. reducing the risk of catastrophic flooding, requires, in addition to the optimization of the facilities' parameters, an increase in dewatering and production costs.

1 Risks of the complex DGH system

According to the classic definition, the risk of DGH system failure is the probability of occurrence of a situation or event that can have negative consequences for the function and operation of the opencast mine. For multiple serially connected subsystems of the opencast mine DGH system, which have mutually exclusive failure causes, the risks associated with them are evaluated and accumulated into the total risk, which generally is:

$$R_{DGH} = P_{f1} \cdot C_1 + \dots + P_{fi} \cdot C_i = P_{f1} \cdot C_1 + \dots + P_{fi} \cdot C_i \quad (1)$$

Where: R_{DGH} - total risk of opencast mine system failure

P_{fi} - failure probability of the i -th element or subsystem ($i = 1, \dots, n$)

C_i - expected losses due to failure of the i -th DGH system subsystems

Any individual risk of failure $R_i = P_{fi} \cdot C_i$ could be acceptable, while the aggregate risk might be unacceptable. The total risk of opencast mine failure in serial systems consisting of subsystems or elements might be unacceptable because it may cause a high risk of system failure as a whole, even though the risk of failure of every individual subsystem or element is acceptable.

The basic losses resulting from failures due to hydrological storm water, dewatering, and geotechnical causes can be classified into several main categories [6, 9]: Loss of life or damage to health; losses associated with damage to the environment, mine contour slopes, equipment, and infrastructure of the opencast mine; financial losses, including loss of planned production, the cost of intervention and repair, social unrest, cost overruns, changes in capital costs, legal penalties, etc.; and loss of reputation, including mistrust in production stability and management, social changes, etc. Total dewatering failure losses in opencast mines are usually expressed in monetary units.

The cost of stormwater or flood risk in current known conditions C_0 and in conditions of future increases due to climate change C_1 is $P_{f0} \cdot C_0$ and $P_{f1} \cdot C_1$ respectively. The change in flood risk costs is the difference between these two values: $\Delta(P_f \cdot C) = P_{f1} \cdot C_1 - P_{f0} \cdot C_0$. The impact on flood and stormwater risk costs on opencast mining can be determined by the simple, worldwide adopted factor *FRIF* (*Flood Risk Impact Factor*) [4]. The value of this factor is:

$$FRIF = (P_{f1} \cdot C_1 - P_{f0} \cdot C_0) / P_{f0} \cdot C_0 \quad (2)$$

A positive value of the *FRIF* factor indicates an increased risk of flooding, while a negative value indicates a decrease in the effect of risk in case of changes in opencast mining dewatering and slope stability and other environmental conditions.

Complex DGH system failure probability of i -th elements or subsystems within a serial connection can be described by different distribution laws, depending on the characteristics of the system and its elements, operating conditions, failure characteristics, and so on. The simplest, in practice for systems with non-stationary processes, verified and most commonly used, is the exponential distribution law of the DSH system with n subsystems reliability:

$$P_{ri}(t) = \exp(-a_i \cdot t), i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Where: t - set operating time, a_i - distribution parameter (failure intensity).

For the given acceptable operation reliability, the necessary subsystems failure intensities are: $a_i = \ln(P_{oi})/t$. The average time to the first operation failure of the DGH system for each of the subsystems is:

$$T_{oi} = \int P_{oi}(t) dt = \int \exp(-a_i \cdot t) dt = 1/a_i \quad (3)$$

The structural schemas can define unambiguous operation or failure of the system. System elements are connected in series. If the DGH system consists of n elements connected in series, the DGH system reliability or probability of functional operation until failure, $P_{rDGH}(t)$ is:

$$P_{rDGH}(t) = \exp(-a_1 \cdot t) \exp(-a_2 \cdot t) \dots \exp(-a_n \cdot t) = \exp(-t \sum_{i=1}^n a_i) \quad (4)$$

Probability of the system failure is:

$$P_{fDGH} = 1 - P_{rDGH}(t) \quad (5)$$

In addition to the already shown probabilities of operation and failure of the dewatering system at time t , used in designing stormwater-related hydraulic structures, it is especially important to add the probabilities of failure that cannot be controlled in cases of extreme rainfall, with consequences such as stormwater floods or possible accompanying bench slope failures and severe erosion. They can cause extremely high costs for opencast mines, both due to remediation and due to the accompanying jeopardy to production. It is usual that, in addition to discrete geometric distributions, in these non-stationary cases, to obtain the probability of failure of the hydrological subsystem, a continuous exponential distribution is more suitable [9, 11], with a parameter

related to the return period or time to failure (T_r) of a rainfall event and catastrophic flooding events with intensity c , where $c = 1/T_r$, when this probability amounts to:

$$P_{pf} = 1 - \exp(-c \cdot t) \quad (6)$$

Geological, hydrogeological, geotechnical, and opencast mining dewatering risks with corresponding consequences due to slope sliding and floods are mostly associated with insufficiently defined models with a lower than expected level of confidence for the relevant project level, non-compliance with established procedures, insufficient monitoring, and human errors. Once the hazards have been identified, it is necessary to determine the associated risks in terms of what can happen, when and where, how events affect the objectives of the opencast mining operation, and why. For DGH system risk analysis, as a complex integral process, qualitative, semi-quantitative, or quantitative methods are used. From several engineering techniques, qualitative effects and criticality analysis (FMECA), or the developed modified quantitative analysis VFMECA [6], which is recommended by the ISO 31000 standard series, can be effectively used.

Integrated DSH system probabilities and risks

The basic determination of the **dewatering subsystem** reliability (P_{rd}) generally includes surface dewatering objects (canals, water collectors, pump stations, etc.) with pipelines and groundwater dewatering objects (dewatering wells, pipes, collectors, etc.). The **geotechnical subsystem** reliability (P_{rg}) is related to the influence of open-pit mine slope stability safety factor (FS) in connection with probability of failure (PF) and pore pressure (p_u) with reliability (P_{rf}), and also the **hydrological subsystem**, calculated on the basis of rainfall return period with reliability (P_{rh}), should be added to that in a total serial connection. Then, generally, the total failure probability of the complex DGH system (P_{fDGH}) is:

$$P_{fDGH} = 1 - (P_{rd} \cdot P_{rg} \cdot P_{rh}) \quad (7)$$

Acceptable DGH risk can be obtained by previously defining acceptable risk reliability criteria, which can also be presented as a percentage of the share of acceptable costs in relation to the total cost of remediation of consequences that are acceptable to the company. This also means that the probability of failure must be equal to or less than the maximum percentage share of costs acceptable for the company in relation to the total DGH system failure consequences rehabilitation costs. DGH system risk can be reduced either by reducing the loss given by a failure, or by reducing the probability of failure, or by reducing both. The DGH system's only protection against interconnected risks is integrated risk management, which includes the assessment of all individual subsystem risks and the overall risk after deciding on each risk reduction measure.

For a DGH serial system with mutually exclusive realizations of failure and estimated individual subsystems consequences (C_d , C_g , C_h) and risks of subsystems, the aggregated risk is determined from the expression:

$$R_{DGH} = P_{rd} \cdot C_d + P_{rs} \cdot C_r + P_{rh} \cdot C_h \quad (8)$$

2 Case study

The opencast mine Field E, which is in the opening phase, represents the future basis of coal production from the Kolubara basin. Moderately cohesive clay-sand overburden material dumping is realized according to the adopted mining project with two benches in the inner dump of the closed opencast mine Field C. With a spreader, the upper bench of the dump is realized with a height of 16 m with a natural slope angle of 38° with a legally permitted factor of stability $F_s = 1.1$ [3], predicted pore pressure $ru = 0.2$, reliability of slope stability $P_{rs} = 0.80$ and reliability of extreme hydrological storm water $P_{rh} = 0.90$ for a period of five years with a return period of RP = 50 years (Figure 3 and Table 1).



Figure 3 Internal dump of opencast mine Field E

Taking into account the frequent rainfall and the type of material of the working environment, signs of instability of the dump bench slope ($F_s < 1$) were observed (Figure 4). Additional hydrogeological data and monitoring show that the pore pressure has increased to $ru = 0.3$, that the reliability of hydrological extreme rainfall $P_{rh} = 0.85$ has decreased and that it is necessary to reduce the rainfall return period to 30 years, that the reliability of slope stability $P_{rs} = 0.75$ has decreased and that the planned efficiency of the dewatering system with reliability $P_{rd} = 0.7$ is insufficient for the observed changes with strict adherence to standard process procedures.

The intervention analysis shows that in the first rehabilitation phase it is necessary and urgent to supplement the dewatering system with six more wells in order to reduce the pore pressure to planned $ru = 0.2$. Also, it is necessary to change the spreader technological geometry of the dumping scheme with slightly reducing the width of the spreader block and with the formation of a supporting embankment (toe berm) with a height of 3.5 to 4 m, so that the acceptable legal factor of safety $F_s = 1.1$ is achieved (Figure 4). In this option, the slope stability reliability is increased to $P_{rg} = 0.90$, the probability of stormwater remains $P_{rh} = 0.85$ for a period of five years, within the legal validity of the project, with a return period of 30 years, the practically parallel dewatering system reliability increases to $P_{rd} = 0.85$ (Figure 4 and Table 1) and an acceptable reliability of the serial DGH system is achieved at 0.7 (4). Field experience shows that the consequences of a bench slope sliding of $C_g = 3$ M€, a drainage system failure of $C_d = 2$ M€ and stormwater and flooding failure in the amount of $C_h = 6$ M€ can be expected and include equipment and slope slide rehabilitation after the failure and production losses.

Table 1 Risk analysis of complex DSH with precipitation return periods of 50 and 30 years

States options	Dewatering failure probability (5) (P_{rd})	Hydrological failure probability (7) (P_{rh})	Geotechnical failure probability (5) (P_{rs})	DSH system risks (8) (M€) (R_{DGH})	FRIF (2)
Projected RP=50 y; $ru=0.2$	0.20	0.10	0.20	1.60	-
Existing RP=30 y; $ru=0.3$	0.30	0.15	0.25	2.25	+0.41
Proposed RP=30 y; $ru=0.2$	0.10	0.15	0.10	1.50	-0.33

After the realization of this crisis situation, it is necessary in the shortest possible period, depending on the implementation of complex technological changes, to reduce the height of the overburden bench to 10 m in order to achieve the minimum acceptable factor of safety $F_s = 1.2$ (Figure 4) [3], which also indicates the necessity of accelerating activities on amendments to the appropriate legal geotechnical-mining regulations in accordance with the consequences of climate change.

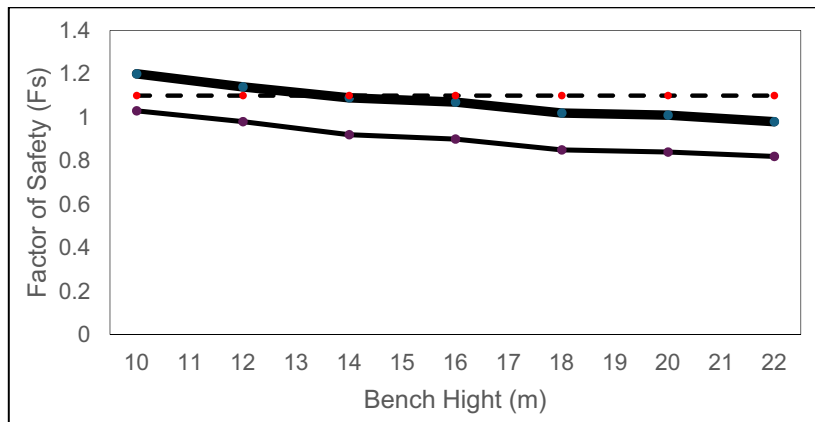


Figure 3 Factors of safety depending on the bench height ($H = 16$ m) and the coefficients of pore pressure $ru = 0.2$ (upper line) and $ru = 0.3$ (lower line) with the natural bench slope ($\alpha = 38^\circ$)

Proposed acceptable option with almost double increased capacity of pumping stations, canals, and water collectors, with an investment of 0.55 M€, has increased efficiency and achieves a reduction of the total complex DGH system failure probability by 55% compared to the previously unacceptable existing state. The risk reduction with the risk impact factor $FRIF = -0.33$ justifies the additional investment in increasing capacity and possible dewatering system water flow in the amount of 0.55 M€. This is also economically acceptable to the company, bearing in mind the increased dewatering costs of creating a more reliable system for the stability of all dump benches and the general slope, and that with the reduced risk by 33%, expressed in euros, the total costs are lower than the costs in the existing option risk scenario. Bearing in mind the constant development of the mine boundary, the dewatering facilities and geotechnical parameters are also being progressively upgraded in accordance with the Life Cycle Management system approach, so that the permissible risk check is practically carried out in accordance with the annual production plans. At the same time, it is necessary to maintain high technological discipline and monitoring in the implementation and maintenance of the progressive and integrated DGH system.

Conclusion

Growing climate changes accompanied by frequent heavy rainfall and flooding of opencast mines lead to significant necessary changes in dewatering system parameters, deterioration of hydrological conditions and geomechanical characteristics, especially when it comes to disposal of loose clay-sand overburden materials. These conditions impose certain changes in the integrated approach to the calculation of acceptable values of influential factors included in the processed example, such as the safety factor, return periods, failure probabilities, and technical parameters of the functioning of complex DGH systems. On the example of the opencast mine Field E dump, the possibility of applying the set specific model for risk assessment with a quantitative approach to the analysis of acceptable failure probabilities and accompanying increased consequences was demonstrated. Practice shows that for risk optimization, it is extremely important to perform progressive and integrated monitoring of the probability of failure of the DGH system along with constant technological, geotechnical, and hydrological research. In this way, improved characteristics of the DGH system are achieved with more accurate and time-efficient assessments of the minimum possible consequences in changed climatic conditions in accordance with globally accepted risk and environmental management standards.

References

- [1] ISO 14001:2026 - Environmental Management Systems (EMS)
- [2] ISO 31000:2018 Risk management - Guidelines (2018)



- [3] Macciotta R., A. Creighton A., C. D. Martin C D.: *Design acceptance criteria for operating open-pit slopes: An update*, Surface Mining, CIM Journal, Vol. 11, No. 4, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, DOI: 10.1080/19236026.2020.1826830 (2020)
- [4] Masaru M.: *Flood Risk Impact Factor for Comparatively Evaluating the Main Causes that Contribute to Flood Risk in Urban Drainage Areas*, Water 2014, 6, DOI:10.3390/w6020253 (2014)
- [5] Ozga-Zielinski B., Adamowski J., Ciupak M., *Applying the Theory of Reliability to the Assessment of Hazard, Risk and Safety in Hydrologic System: A Case Study in the Upper Sola River Catchment*. Water 2018, 10 (723) (2018)
- [6] Pavlovic N., Ignjatovic D., Djenadic S., Subaranovic T., Jakovljevic I.: *Risk assessment of Flooded Equipment Revitalization on Opencast Coal Mine Tamnava-West Field*, Thermal Science, Vol 26 (2022)
- [7] Pavlovic N., Petrovic B., Subaranovic T.: *Evaluation Methodology of Open Pit Mine Overall Slope Failure Risks*, MDPI, Mater. Proc. (2021)
- [8] Pavlovic N., Petrovic B., Subaranovic T., Pavlovic V.: *Opencast Mine Internal Dump Sanation Risks*, Varna (2024)
- [9] Pavlovic N., Subaranovic T., Ignjatovic D.: *Impact of extreme natural processes on opencast mining risks*, 15th International Conference OMC 2022, Proceedings, Zlatibor (2022)
- [10] Pavlovic V., Subaranovic T.: *Dewatering Systems Reliability, Optimization and Management*, Monography, ISBN: 978-86-7352-240-1, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Belgrade (2012)
- [11] Salas J., Obeysekera J.: *Revisiting the Concepts of Return Period and Risk for Nonstationary Hydrologic Extreme Events*, American Society of Civil Engineers, Journal of hydrologic engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820 (2014)

FORECASTING THE MANIFESTATIONS OF ROCK PRESSURE IN COAL-BEARING MASSIFS BASED ON CHANGES IN GAS MIXTURE PARAMETERS

Nataliia Vergelska^{1,2}, Victoriia Vergelska¹

¹State Institution «Scientific Center of Mining Geology, Geoecology and Infrastructure
Development of the National Academy of Sciences of Ukraine», 34 b Akademika Vernadskoho Blvd,
Kyiv, Ukraine, 03142, e-mail: vnata09@meta.ua

²State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of
Ukraine", 34 a, Akademika Palladina av., Kyiv, Ukraine, 03142, e-mail: vnata09@meta.ua

ABSTRACT

Rocks in the coal massif are in a stressed state caused by the influence of the mass of rocks located above the massif, as well as by the action of other forces of tectonic origin, which increase horizontal stresses. In the upper layers of the lithosphere, a change in rock pressure occurs not only due to technogenic influences, sometimes sharp changes are associated with the state of stress of the sedimentary layer. One of the manifestations of rock pressure in coal massifs is sudden emissions of coal and gas or rock and gas, which allowed us to develop a predictive criterion based on changes in the characteristics of gas mixtures. A generalization of geological materials and a comparison of gas mixtures at different states of rock pressure in coal mines were carried out.

Unstable rock pressure in the coal massif correlates with a temporary increase in the gas underflow and its redistribution in mining operations during the formation of modern technogenic sections of the lithosphere.

Introduction.

Under the influence of mineral deposits development, physical processes in the upper layers of the lithosphere are constantly changing. Geological processes activated by disturbances during the development of coal massifs determine the nature of their displacement and collapse in mining operations. Visible manifestations of rock pressure are observed in mining operations without precise tools - deformation and destruction of reinforcement, marginal zones of mining operations, pillars, extrusion of host rocks and coal, collapse and shooting of rocks, collapses into mining passages. To conduct safe work, it is necessary to have the maximum amount of not only geological data, but also the physical and deformation properties of the contact of coal seams and rocks, fracturing, and the ability to stratify them.

In the upper layers of the lithosphere, a change in rock pressure occurs not only caused by man-made influences, sometimes sharp changes are associated with the state of stress of the sedimentary layer. In such cases, when the rock pressure increases, there are no changes in the massif, and when it decreases, the zones of decompression and destruction of rocks are activated, which are poured into the workings. Invisible manifestations of rock pressure can be measured with precise instruments, provided that they are constantly monitored, which is not always possible during active coal mining [4].

A system of measures to determine changes in rock pressure in the directions necessary to ensure the safety of coal field development is a necessary condition.

One of the manifestations of rock pressure in coal-bearing massifs is sudden emissions of coal and gas or rock and gas, which allowed us to develop a predictive criterion based on changes in the characteristics of gas mixtures [1, 3, 6].

A significant contribution to the research and development of this area was made by A. Radziwill, V. Lukinov, I. Buchynska, D. Gunia, O. Pravotorova and others [1-6].

Purpose of the work: to develop a predictive criterion for changes in rock pressure based on the quantitative characteristics of the gas mixture of coal-bearing rock massifs.

Materials and methods of the study.

The study was based on materials obtained in 2022 in the Lviv-Volyn basin and in 2005-2021 in the Krasnoarmiyskiy district of Donbas. A generalization of geological materials and a comparison of gas mixtures at different rock pressure states in coal mines were carried out. Laboratory gas chromatography studies were performed in the laboratory of the State Enterprise "Ukrnaukageocenter" in Poltava, headed by the Integrated Laboratory, Candidate of Geological Sciences N. Sira.

Presentation of the main material.

Rocks in a coal massif are in a stressed state caused by the influence of the mass of rocks located above the rock massif, as well as by the action of other forces of tectonic origin, which increase horizontal stresses. The rock massif, before mining, is in equilibrium, which is disturbed after mining and bringing both coal and rocks to the surface [1]. When mining coal in the massif, the following rock pressures are distinguished: primary, permanent, non-permanent, vertical and lateral. Primary pressure is caused by the redistribution of stresses in the rock massif during mining. Permanent pressure does not change over time in mining. Non-permanent pressure changes over time due to mining, rock creep and other reasons. Vertical and lateral pressures can be defined as both permanent and non-permanent. The investigated workings of the Krasnolymanska Mining Company (-720 m) and the Vidrodzhennia Mine (-560 m) can be appropriately characterized as workings with unstable rock pressure.

The following processes occur in the coal massif, which are controlled by rock pressure:

1. The stress state of the rock massif is formed and the stress caused by the laying of mining works changes.

2. Coal and the rocks containing it shift in various forms.

3. Interaction of the fastening of mining works with rocks.

So, as a result of mining operations, forces arise, under the influence of which deformations and displacements of rocks occur. These processes proceed until the equilibrium is restored, it is advisable to indicate that the restored equilibrium may be disturbed by minor impacts on the coal massif. In such cases, rock pressure manifests itself (additionally) in the deflection of the roof rocks, the lifting of the sole, the formation of newly formed cracks in the rocks, deformation of the fastening, squeezing of coal from the surface of pillars and faces, and the destruction of the walls of the workings. Special forms of rock pressure include rock blows, sudden releases of coal and gas or rock and gas. Considering that sudden releases of coal, rock and gas occurred in the investigated workings without subsequent ignition, we propose a comparison of gas mixtures in the investigated workings (Tables 1, 2).

Table 1. Gas mixtures determined for sudden emissions, by individual control components, % vol.

Mine	CH ₄	CO+CO ₂	H ₂	N ₂	C ₅ H ₁₂ + C ₆ H ₁₄
SE VK "Krasnolymanska"	25,1 – 28,3	1,4 – 2,5	1,0	69,0 – 71,0	до 0,025
EP "Mine Vidrodzhennia"	8,0 – 12,0	0,6 – 1,5	0,0001	82,0 – 85,0	до 0,6

Table 2. Gas mixtures determined after sudden releases, by individual control components, % vol.

Mine	CH ₄	CO+CO ₂	H ₂	N ₂	C ₅ H ₁₂ -C ₆ H ₁₄
SE VK "Krasnolymanska"	22,5 – 25,6	2,5 – 3,1	1,0	70,0 – 77,0	до 0,0004
SE "Mine Vidrodzhennia"	6,0 – 8,0	3,5 – 4,0	0,0001	88,0 – 91,0	до 0,0005

We note the features of the Krasnolymanska coal mine: sudden release, coal, rock and combine thrown 200 and 100 m, respectively, along the preparatory work, the fastening is unsuitable for further use. A furrow sample was taken from two packs, where the gas indicators from the lower pack are somewhat higher. Given the powerful, in terms of force, release at a depth of about 720 m, coal and rock were not crushed to a powder state. In our opinion, it was the sharp increase in the rock pressure of the coal massif that caused the

sudden release. Given the insignificant changes in the indicators of gas mixtures and the amount of methane, it was methane that acted as a stabilizing gas and contributed to the non-flammable course of the situation.

Peculiarity of the SE "Mine Vidrodzhennia": a significant amount of medium-coarsely crushed coal and rock was carried out into the prepared working within the limits where a rupture without displacement was recorded. The fastening of the working was broken at the place of coal fallout. Given the increased nitrogen indicators, we believe that this situation occurred at the time of a sharp decrease in rock pressure and led to the destruction of the coal massif, which was calmer than in the first case considered.

Therefore, sudden emissions during the growth of rock pressure are characterized by powerful consequences and in most cases their development is stopped. The gas mixture contains more than 22.5% vol. Methane, with stable hydrogen and nitrogen.

Sudden emissions during a sudden decrease in rock pressure are characterized by significantly less destruction, and the gas mixture contains a significant amount of nitrogen (over 80% vol.) and carbon dioxide (up to 4% vol.). After eliminating the consequences of the emission, coal mining can be carried out.

Unstable rock pressure in the coal massif correlates with a temporary increase in the underflow of gas and its redistribution in mining operations during the formation of modern technogenic sections of the lithosphere [6]. The consequences of a sharp increase or decrease in rock pressure are observed in the zones of decompression of the rock massif.

Conclusions.

The rock pressure in the coal massif correlates with the underflow of gas and its redistribution in the mining operations during the formation of modern technogenic sections of the lithosphere. When the rock pressure increases, methane (22.5% vol. and more) is the control component in gas mixtures, and when it decreases, nitrogen (over 80% vol.). Considering that when studying the gas composition of the mine atmosphere in coal mining operations, both methane and nitrogen are common components, their use as a predictive criterion for safe work is relevant.

REFERENCES

1. Vergelska N. V. (2014). Geological prerequisites to evaluate gas-bearingness of the Krasnoarmiysk coalmine district, Donbass. Tectonics and stratigraphy. Vyp. 41. P. 41–46.
2. Vergelska N. V., Skopychenko I. M. (2022). Factors of formation of gas content of the Donetsk basin. Collection of scientific papers based on the materials of the XIII All-Ukrainian scientific conference "Problems of geology of Ukraine", Ukraine, Lviv, October 3–5, P. 64-67.
3. Vergelska N. V., Vergelska V. V. (2023). Regional and local systems of gas-methane distribution in coal massifs of the Donetsk basin. Mining geology and geoecology. No. 1 (6). P. 18-34. [https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2023.1\(6\).287847](https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2023.1(6).287847)
4. Vergelska N. V., Pymonenko L. I., Skopychenko I. M. (2022). Mining and geological features of forecasting dynamic phenomena in coal mines. Mining geology and geoecology. No. 1 (4). P. 5 - 15.
5. Vergelska N.V., Skopychenko I.M. (2019). Evolution of the formation of gas-bearing coal basins. Tectonics and stratigraphy. Issue 46. P. 31-39.
6. Vergelska N.V., Skopychenko I.M. (2021) Features of modern gas migration in coal massifs of the Donetsk basin. Scientific works of DonNTU. Mining and geological series. No. 1(25)-2(26). P. 94-103.



ENGINEERING-GEOLOGICAL ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE FINAL SLOPES IN MARL MINES

Radmila Karanakova Stefanovska¹, Zoran Panov¹, Risto Popovski¹, Blagica Doneva¹

¹University Goce Delcev, Faculty of natural and technical science, Stip, Republic of Macedonia,
radmila.karanakova@ugd.edu.mk

ABSTRACT

The stability of final slopes represents one of the key factors for the safe and economically sustainable exploitation of mineral resources in surface mines. This paper presents an analysis and assessment of the stability of final slopes in a mine of marl, with particular emphasis on the geomechanical properties of the material and the influence of hydrogeological conditions. Interactive limit equilibrium methods were applied using the student version of the GeoStudio (Slope/W) software, with the aim of determining the factor of safety and enabling more effective and reliable recultivation of final slopes of the open pit.

Keywords: marl, slope stability, Geostudio, engineering-geological analysis, final slopes

INTRODUCTION

Slope stability represents one of the key factors for the safe and economical operation of surface mines. Particular attention should be given to the analysis of final slopes, which remain as permanent geomorphological features after the completion of mining activities and may represent a potential source of geotechnical hazards. Their stability directly affects environmental safety, the protection of surrounding infrastructure, and the potential of land reclamation.

Marl, as a sedimentary rock composed of varying proportions of clay and carbonate materials, exhibits specific engineering-geological and geomechanical characteristics. Its pronounced sensitivity to water, susceptibility to weathering, and reduction of strength parameters under saturated conditions make this material particularly critical in the design and construction of mine slopes. Furthermore, the presence of discontinuities, bedding planes, and tectonic disturbances may significantly reduce the stability of slopes in marl deposits.

The formation of final slopes is influenced by numerous factors, including geological structure, hydrogeological conditions, slope geometry, mining technology, and various external influences. Therefore, the application of modern engineering-geological investigation methods and geomechanical modelling techniques is essential to obtain a realistic assessment of the factor of safety and to define appropriate stabilization measures.

The aim of this study is to perform an engineering-geological analysis of the stability of final slopes in marl surface mines by determining the relevant geological and geomechanical parameters and incorporating them into analytical and numerical models. The research examines the key factors affecting slope stability, evaluates the factor of safety through stability analyses, and proposes technical measures to improve the long-term stability of final mine slopes.

GEOLOGICAL AND ENGINEERING-GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MARL AS A GEOLOGICAL MEDIUM

Marl is most commonly found within sedimentary basins, where it forms stratified sequences of varying thickness and continuity. It consists of a mixture of clay minerals and calcite, and the proportion of these components determines its classification and engineering properties. An increase in the clay content makes the material less resistant and more plastic, whereas a higher carbonate content results in greater strength and brittleness.

From a stratigraphic perspective, marl occurs as layers of different thicknesses, frequently interbedded with clay, limestone, or sandstone. These interlayers create a heterogeneous geological environment, which represents an important factor in slope stability analyses. The marl rock mass is commonly affected by various tectonic structures, such as joints, faults, and bedding discontinuities. These discontinuities reduce the overall strength of the rock mass and may act as potential slip surfaces. Of particular importance are weak zones that

can be activated by external factors such as water infiltration, blasting-induced vibrations, and other dynamic loads.

In general, marl exhibits low to moderate permeability; however, its mechanical behaviour changes significantly when saturated with water. The presence of water leads to a reduction in shear strength parameters, an increase in plasticity, and progressive degradation of the marl structure. Infiltration of surface water, together with the presence of groundwater, may generate pore water pressure, which directly reduces the effective stress within the rock mass and consequently decreases the stability of mine slopes.

GEOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF MARL

In slope stability analyses, the most influential factors are the physical-mechanical parameters, strength parameters, and deformation characteristics of the rock mass. These parameters serve as input data for analytical and numerical models used to calculate the factor of safety.

Physical-mechanical parameters

The most important physical-mechanical parameters include natural density, unit weight, porosity, moisture content, degree of saturation, and permeability. These properties primarily depend on the relative proportions of the carbonate and clay components, as well as on the degree of compaction of the material.

Strength parameters

The **Mohr–Coulomb failure criterion** is most commonly used to define the shear strength of marl. According to this criterion, shear strength is determined by two fundamental parameters:

- Cohesion (c)
- internal friction angle (φ)- the component of shear strength generated by friction between particles.

In engineering practice, the following approximate values are commonly adopted for marl:

Parameter	Typical range
Cohesion (c)	50-300 kPa
Internal friction angle (φ)	20°-35°

Deformation characteristics

Deformation properties are essential for evaluating the displacements and stress distribution within a slope. The most important deformation parameters include:

- **Young's modulus (E);**
- **Poisson's ratio (ν);**
- **Deformation modulus;**
- **Compressibility.**

Young's modulus represents the stiffness of the material. The higher the value of Young's modulus, the smaller the deformations under the same loading conditions. In marl, Young's modulus may vary considerably, typically ranging from **0.5 to 10 GPa**, depending on the degree of fracturing and the compactness of the rock mass.

Poisson's ratio generally ranges between **0.20 and 0.35**, indicating a moderate degree of lateral deformation under loading. Due to the pronounced heterogeneity of marl, these parameters are usually determined through laboratory testing and in-situ geotechnical investigations. Accurate determination of these properties is essential for reliable numerical modelling and for obtaining realistic assessments of slope stability under various geological and hydrogeological conditions.

Factor of safety

Every slope stability analysis produces a single numerical value that indicates the degree of safety against slope failure or sliding under the specified conditions. This value is referred to as the **factor of safety (FoS)**, **safety coefficient**, or **safety factor**. The factor of safety can be expressed as the ratio of resisting forces to driving forces or, alternatively, as the ratio of resisting moments to driving moments.

In geotechnical engineering, the analysis of slope stability and bearing capacity begins with the assumption of a potential failure surface or slip surface, after which the resisting forces acting along that surface are calculated and compared with the forces promoting failure.

Table 1 presents the recommended ranges of the factor of safety for different types of geotechnical structures, as proposed by Jumikis, Terzaghi i Peck.

Table 1 Recommended Factors of safety

Type of structure	F
Cut slope	1.1-1.5
Dam	1.15-1.7
Waste dump	1.0-1.5
Surface mine slope	1.1-1.5

Several methods are available for the geotechnical analysis of slope stability, including the **Method of Slices**, the **Bishop method**, the **Janbu method**, and the **Spencer method**. Among these, the **Bishop simplified method** is one of the most widely used limit equilibrium methods due to its balance between computational efficiency and accuracy, making it particularly suitable for the analysis of circular failure surfaces in homogeneous and moderately heterogeneous slope conditions.

STABILITY ANALYSIS OF FINAL SLOPES IN A MARL SURFACE MINE

One of the primary objectives of this study is to evaluate the geotechnical stability of the final benches in a marl surface mine. A case study of a typical open-pit marl mine was considered, where the highest bench elevation is **450 m above sea level (a.s.l.)**, while the lowest bench is located at **390 m a.s.l.** The bench height was set at **10 m**, the working bench face angle was adopted as **42°**, whereas the overall final slope angle of the inactive slopes was designed to be **less than 30°**. During the formation of the final pit limits, **8 m wide safety berms** were incorporated to improve long-term slope stability. Temporary haul roads were designed with a maximum longitudinal gradient of **7%** and a minimum curve radius of **20 m**, in accordance with standard surface mining practice.

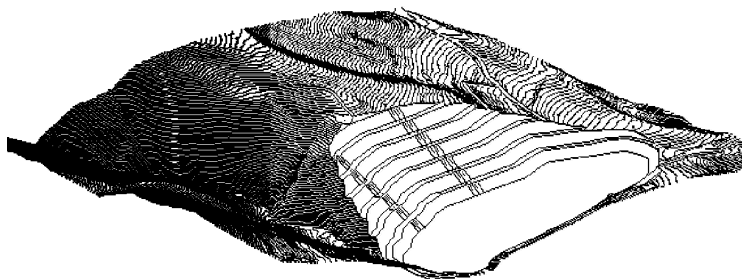


Fig.1 View of the surface mine slopes from southwest

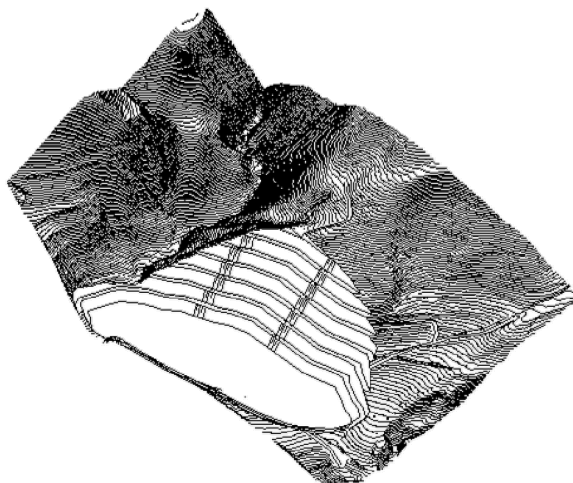


Fig.2 View of the surface mine slopes from the southeast

The geotechnical stability analysis of the final pit slopes was carried out using the **student version of the GeoStudio Slope/W** software package. The calculations were performed using the **Bishop simplified method**, one of the most widely applied limit equilibrium methods for circular slope stability analysis.

Two separate analyses were conducted to evaluate the stability of the final slope under different hydrogeological conditions. The first analysis considered a **dry slope condition**, assuming no groundwater influence and using the predefined geomechanical properties of the marl. The second analysis included a **hypothetical piezometric line**, representing groundwater conditions within the slope, in order to assess the influence of pore water pressure on slope stability. The geomechanical parameters adopted for the stability analyses were as follows:

$c=5\text{kPa}$, cohesion

$\varphi=49^\circ$, internal friction angle

$\gamma=18\text{ kN/m}^3$ Unit weight

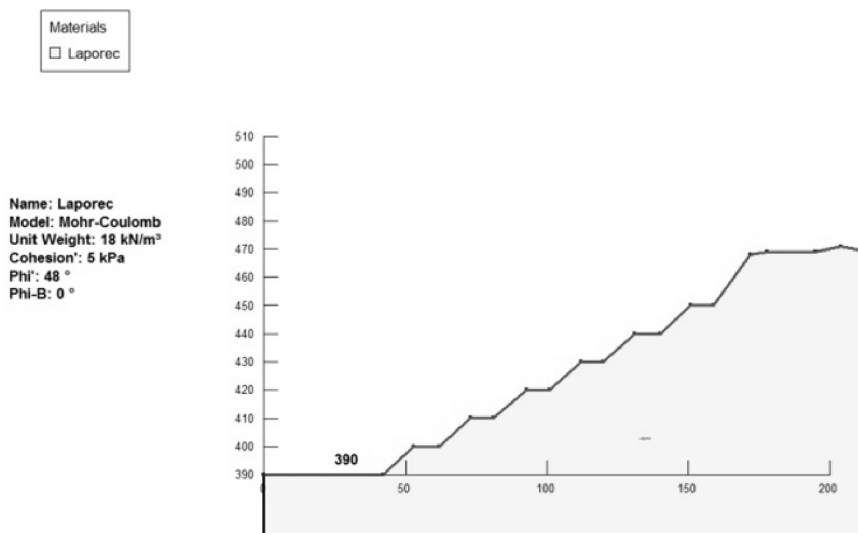


Fig.3 Geotechnical model of the final slope with defined geometry and physical-mechanical properties of marl

Figure 3 presents the geotechnical model of the final slope of the marl surface mine developed using the **GeoStudio Slope/W** software package. The model represents the actual geometry of the final slope, consisting of several benches with a height of **10 m**, resulting in a total elevation difference of approximately **80 m** (from elevation **390 m** to approximately **470 m**). The slope is composed of working benches and safety berms, with the geometry designed to ensure the long-term stability of the open pit after the completion of mining operations.

The analysis was performed using the **Mohr–Coulomb failure criterion**, one of the most widely applied constitutive models in engineering-geological and geotechnical analyses of rock masses. The model incorporates the physical and mechanical properties characteristic of marl, which define the shear strength of the rock mass and serve as the primary input parameters for calculating the factor of safety.

The model shows a continuous slope geometry without abrupt changes in inclination, contributing to a more uniform distribution of stresses within the rock mass. The incorporation of safety berms reduces the overall effective slope angle, provides storage for potential rockfall material, and facilitates surface water drainage, thereby reducing the likelihood of localized slope failures.

This model represents the initial stage of the geotechnical stability analysis, in which both the geometric configuration and the geomechanical properties of the open pit are defined.

Based on this model, the subsequent analysis involves the determination of the critical slip surface and the calculation of the factor of safety using the **Bishop simplified method**. The obtained results provide an

assessment of the stability of the final slope and serve as the basis for optimizing the slope geometry and defining appropriate measures to ensure the long-term safety and stability of the surface mine.

Figure 4 shows the computational mesh and the search radii used to generate the potential slip surfaces for which the factors of safety of the final slope will be calculated

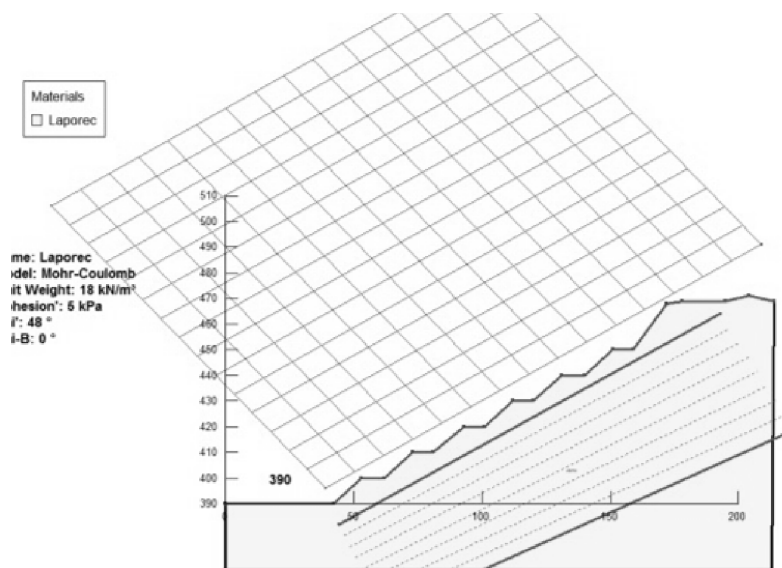


Fig.4 Geotechnical model with computational mesh and potential slip surfaces in GeoStudio Slope/W

Figure 4 presents the geotechnical model of the final slope prepared for stability analysis using the **GeoStudio Slope/W** software package. After defining the slope geometry and assigning the physical and mechanical properties of the marl, the model was discretized using a computational mesh, enabling a more accurate numerical evaluation of the stress distribution and potential failure mechanisms within the rock mass. The lines shown in the model represent the potential slip surfaces generated by the software during the search for the critical failure mechanism. By automatically generating a large number of possible slip surfaces, the program identifies the one associated with the lowest factor of safety, which represents the most critical stability condition. This approach provides a realistic assessment of the possible failure mechanisms and allows for reliable identification of the critical state of the rock mass.

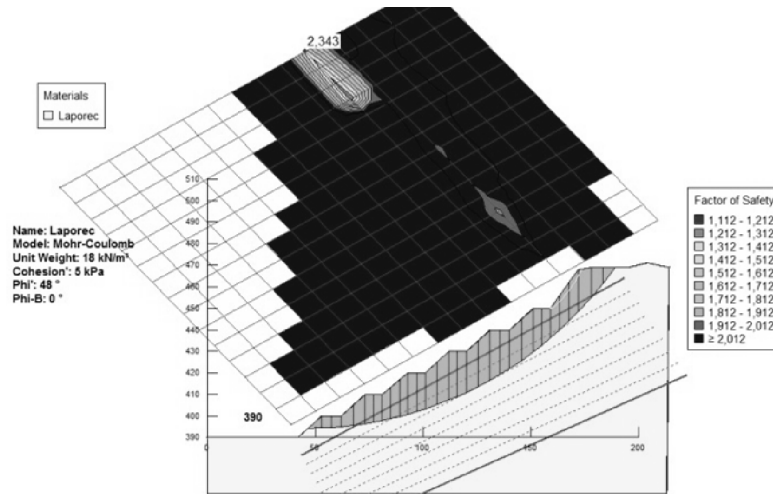
The model indicates that the potential slip surfaces develop mainly through the toe and the central part of the slope, which is characteristic of homogeneous materials analyzed using circular slip surfaces according to the **Bishop simplified method**. This type of analysis makes it possible to evaluate whether the selected geometry of the final slope provides an adequate level of stability during the operational phase of the mine as well as after mine closure.

The developed numerical model serves as the basis for determining the final factor of safety and evaluating the overall stability of the final slope. The results obtained from this analysis can be used to optimize the slope geometry, modify the slope angle where necessary, implement appropriate drainage systems, and introduce other engineering measures aimed at ensuring the long-term stability and safety of the surface mine.

Figure 5 presents the results of the slope stability analysis under dry conditions, showing the factor of safety of the potential slip surfaces in the absence of groundwater.

Figure 5 presents the results of the stability analysis of the final slope, in which the factor of safety was calculated for multiple potential slip surfaces under **dry ground conditions**, i.e., in the absence of groundwater and without the influence of pore water pressure. The analysis was performed using the **Bishop simplified method**, whereby the software automatically generated a large number of possible circular slip surfaces and identified the most critical failure mechanism. The contour plot illustrates the distribution of the factor of safety, with different colors representing different levels of slope stability. Most of the analyzed model is shown in dark black, indicating high values of the factor of safety and a stable slope condition.

The results indicate that the **minimum factor of safety is $FS = 2.343$** , which is significantly higher than the minimum recommended values for permanent slopes in surface mines (typically $FS \geq 1.30\text{--}1.50$). This demonstrates that, under dry conditions, the rock mass possesses sufficient shear strength and that there is no risk of global failure of the final slope.



Сл.5 Резултати од анализата на стабилност на завршната косина во суви услови (без присуство на подземни води).

The high factor of safety is attributed to the appropriately selected slope geometry, the relatively favorable slope angle, and the adopted geomechanical properties of the marl. In the absence of water infiltration, no pore water pressure develops to reduce the effective stresses within the rock mass, allowing the shear strength to remain at its maximum value. The obtained results indicate that the designed geometry of the final slope satisfies the criteria for long-term stability under dry conditions.

However, this represents an idealized scenario, since in actual field conditions rainfall infiltration and groundwater may significantly reduce the factor of safety. Therefore, the subsequent analysis considers the influence of the groundwater table and the saturation of the marl in order to obtain a more realistic assessment of the long-term stability of the final slope.

Figure 6 presents the results of the stability analysis of the final slope under **groundwater conditions**, represented by an assumed piezometric line incorporated into the geotechnical model. The analysis evaluates the influence of pore water pressure on the stability of the rock mass.

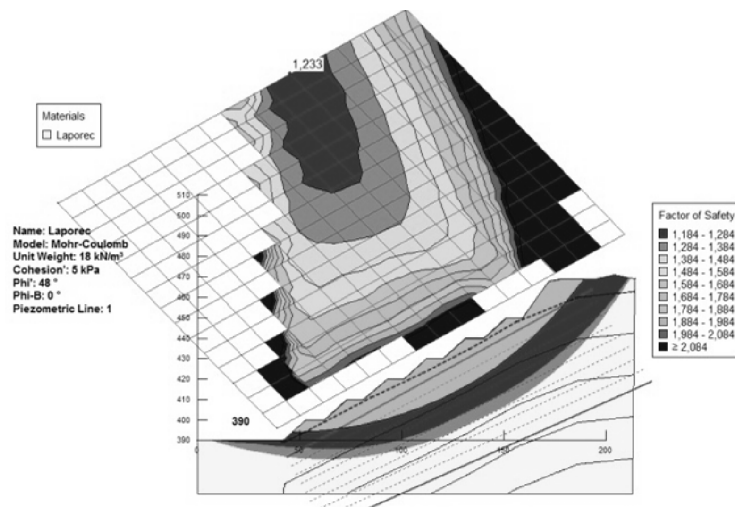


Fig.6 Results of the stability analysis of the final slope with an applied piezometric lines

By introducing the piezometric line into the model, a condition is simulated in which part of the rock mass is saturated with water. Under such conditions, pore water pressure occurs, which reduces the effective stresses in the material and consequently decreases its shear strength. As a result, the factor of safety is reduced, and the probability of slope instability increases.

From the results shown in the figure, it can be observed that the minimum factor of safety is **FS = 1.233**, which represents a significant reduction compared to the dry condition analysis, where the factor of safety was **FS = 2.343**. This reduction is a direct consequence of the influence of groundwater, which decreases the strength of the marl and facilitates the activation of potential slip surfaces. The contour plot of the factor of safety shows that the most unfavorable conditions occur at the toe and the central part of the slope, where the highest pore pressures are concentrated and where there is the greatest potential for the development of a critical slip surface. These zones are indicated by warm colors (red and orange), while the stable parts of the model are represented by green and blue shades.

The obtained factor of safety value is lower than the recommended value for permanent final slopes (**FS ≥ 1.30–1.50**), indicating that under such hydrogeological conditions there is an increased risk of instability. Although the slope is not in a state of immediate failure, its stability is significantly reduced and additional stabilization measures should be considered.

The results clearly confirm the high sensitivity of marl to the presence of water. Therefore, in the design and operation of surface mines, it is of particular importance to ensure an efficient surface and groundwater drainage system, control of atmospheric water infiltration, and continuous geotechnical monitoring. The implementation of such measures enables the reduction of pore pressures, an increase in the factor of safety, and the long-term stability of final slopes.

CONCLUSION

The engineering-geological analysis of the stability of final slopes in a marl open-pit mine has shown that slope geometry, geomechanical properties of the rock mass, and hydrogeological conditions are key factors determining its long-term stability. Due to the specific properties of marl, particularly its sensitivity to the presence of water, it is necessary to consider these factors already in the design phase of the final slopes.

By applying the limit equilibrium method (Bishop) in the GeoStudio Slope/W software package, two characteristic conditions were analyzed: a dry slope and a slope with an assumed piezometric line. Under conditions without groundwater presence, a minimum factor of safety of **FS = 2.343** was obtained, indicating that the designed geometry of the final slope provides a high level of stability and meets the criteria for safe operation and long-term security.

On the other hand, the analysis with an applied piezometric line showed a significant reduction in the factor of safety to **FS = 1.233**. This result confirms that the presence of groundwater and the development of pore water pressure have a considerable negative impact on the stability of marl, as they lead to a reduction in effective stresses and shear strength. Although the analyzed slope does not show an immediate failure condition, the obtained value indicates that under such conditions additional stabilization measures are necessary. The results of the study emphasize the importance of proper definition of slope geometry, accurate determination of geomechanical parameters, and adequate assessment of hydrogeological conditions in the design of open-pit mines.

The obtained results confirm that the application of modern numerical methods, such as GeoStudio Slope/W, represents a reliable and efficient tool for assessing the stability of final slopes. Such analyses enable timely identification of potential risks, optimization of slope geometry, and the development of engineering solutions that ensure safe, economical, and long-term sustainable exploitation of marl open-pit mines.

REFERENCES

1. Brown, E.T. and Hoek, E. 1978. Trends in relationships between measured rock in situ stresses and depth. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 15, 211-215.



Proceedings of the XII International Geomechanics Conference
7 – 11 September 2026, Varna, Bulgaria

2. Crouch, S.L. and Starfield, A.M. 1983. Boundary element methods in solid mechanics. London: Allen and Unwin
3. Hoek, E. and Bray, J.W. 1981. Rock Slope Engineering, 3rd edn. London: Institution of Mining and Metallurgy, 402 pages
4. Hoek, E. and Brown, E.T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. Intl. J. RockMech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 34(8), 1165-1186.
5. Panov, Z., 2011. Rock mechanics, "Goce Delcev" University – Stip, pp. 235 pages

**АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА „ПВР“ В ОТКРИТ РУДНИК „ЕЛАЦИТЕ“ ЗА
ОГРАНИЧАВАНЕ НА ПРЕХВЪРЛЯНЕТО НА ВЗРИВЕНА СКАЛНА МАСА КЪМ ПО-ДОЛНИ РАБОТНИ
ХОРИЗОНТИ**

маг. инж. Радослав Асенов
r.asenov@ellatzite-med.com

РЕЗЮМЕ

При извършваните масови взривявания в откритите рудници, прехвърлянето на взривена скална маса към по-долни работни хоризонти може да доведе до нежелано смесване на руда и откритка, което води до влошаване качеството на добиваната суровина и повишаване на производствените разходи. В доклада е анализирано влиянието на основните параметри на взривните работи върху движението на скалната маса с цел ограничаване на прехвърлянето. Предложени са мерки за оптимизация на ПВР за да се повиши ефективността на добивния процес.

**ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF DRILLING AND BLASTING PARAMETERS IN THE „ELATZITE“
OPEN-PIT MINE FOR LIMITING THE DISPLACEMENT OF BLASTED ROCK MASS TO LOWER WORKING
LEVELS**

msc. eng. Radoslav Asenov
r.asenov@ellatzite-med.com

ABSTRACT

Mass blasting operations in open-pit mines can result in the displacement of blasted rock mass to lower working benches, leading to undesirable mixing of ore and waste rock. This negatively affects the quality of the extracted material and increases production costs. This paper analyzes the influence of the main drilling and blasting parameters on rock mass movement with the aim of limiting such displacement. Measures for optimizing drilling and blasting operations are proposed in order to improve the efficiency of the mining process.

Въведение

Качеството на изпълнение на ПВР оказва пряко влияние върху степента на раздробяване на скалната маса, производителността на минната техника, разхода на енергия и общата ефективност на добивния процес. Поради това оптимизирането на параметрите на ПВР, представлява важен резерв за повишаване на техническите и икономическите показатели на открития добив. Прехвърлянето на взривена скална маса към по-долни работни хоризонти оказва отрицателно влияние, както върху безопасността на труда, така и върху производствената ефективност. Създават се предпоставки за възникване на аварийни ситуации, повреждане на минна техника и ограничаване достъпа до работните забои. Освен това се увеличават непреките производствени загуби, свързани с принудителни престои на оборудването, необходимост от допълнителна механизация за разчистване на засегнатите участъци и намаляване на производителността на товаро-транспортния комплекс. По тази причина изследването на факторите, определящи движението на взривената скална маса, и разработването на подходи за оптимизиране на параметрите на ПВР представляват актуална научна и практическа задача. Получените резултати могат да послужат, като основа за усъвършенстване на практиката по проектиране на ПВР и за намаляване на производствените рискове при експлоатацията на открити рудници.

Таблица №1. Възможни отрицателни последствия от прехвърляне на взривен материал към по-долни работни хоризонти

Отрицателно последствие	Ефект
Риск за персонала	Възможни наранявания от разлет на скални късове
Повреда на техника	Щети по багери, сондажно оборудване и автосамосвали
Засипване на пътища и площадки	Затруднен достъп и производствени престои
Смесване на руда с откровка	Влошаване качеството на рудата и увеличаване на разходите за преработка
Повишени разходи и намалена производителност	Допълнителни разходи за почистване, ремонти и загуба на технологично време

Кратка характеристика на рудник „Елаците“

Рудник „Елаците“ е най-големият открит рудник за добив на медно-порфирни руди в Република България и един от най-значимите в Югоизточна Европа. Разположен е на територията на Софийска област в северните склонове на Етрополска Стара планина, между върховете Мара Гидия (1789 m) и Мургана (1639 m). Находище „Елаците“ принадлежи към медно-порфирния тип находища и се характеризира с големи по обем запаси от нискосъдържателни медни руди. Добиваната руда се транспортира до Обогатителен комплекс- „Елаците“ край с. Мирково чрез подземен транспортен тунел (МГТЛ) с лентов конвейер. Рудникът работи с висок производствен капацитет и ежегодно добива милиони тонове руда и откровка, като представлява основен източник на суровина за производството на меден концентрат в страната.

Таблица №2. Основни физико-механични показатели на скалите, които се срещат в разработваните масиви на рудник „Елаците“

Литология	Якостни параметри		Деформационни параметри	
	Якост на едноосов натиск	Якост на опън	Надлъжни вълни V_p	Напречни вълни V_s
	MPa	MPa	m/s	m/s
Филити	11,24	2,09	3714,45	1864,62
Ивичести и петнисти шисти	35,65	4,34	5010,70	2404,76
Хорнфелзи	75,49	7,69	5303,76	2519,38
Монцодиоритови порфирити	87,05	7,42	4245,01	2037,16
Гранодиорити	93,77	9,11	4911,31	2400,76

Поради значителната дълбочина на рудника и близкото разположение на съседни хоризонти, при провеждане на масови взривявания съществува риск от прехвърляне на взривена скална маса към по-долни работни площадки, което налага прецизно проектиране и оптимизиране на параметрите на ПВР.

Осигуряване на взривните работи в рудник „Елаците“

Взривните работи в рудник „Елаците“ се извършват при висока целогодишна интензивност и са основен технологичен процес за осигуряване на необходимото раздробяване на скалната маса. Рудника разполага със собствена взривна фабрика, която осигурява необходимите количества взривни вещества за производствените нужди. В практиката се използват, както грубодисперсни взривни вещества от типа ANFO, така и емулсионни взривни вещества от серията „Елацит“.

Зареждането на производствените сондажи се извършва напълно механизирано посредством специализирани сондажно-зарядни камиони, което гарантира висока точност при влагането на проектните количества взривно вещество и осигурява необходимата производителност при големите обеми взривни работи. След зареждането се извършва механизирано изпълнение на забивката, Прилаганите технологии на взривяване са електронна технология за взривяване с програмируеми капсул-детонатори на фирма „Austin Powder” и неелектрическа система за взривяване- NONEL.

Методика на изследването

Целта на настоящото изследване е да се установи влиянието на основните параметри на пробивно-взривните работи върху прехвърлянето на взривена скална маса към по-долни работни хоризонти и да се разработят практични решения за неговото ограничаване. С цел оптимизиране на параметрите на пробивно-взривните работи, изследването е структурирано в два последователни етапа. Първият етап включва анализ на изпълнени производствени взривявания при различни параметри на ПВР с неразсредоточена конструкция на зарядите от ВВ. Изследвано е влиянието на основните технологични фактори – сондажна мрежа, отстояние на първия ред сондажи от горния ръб на бермата, разпределение на взривната енергия, литоложки особености. Вторият етап включва анализ на изпълнени производствени взривявания при сходни параметри на ПВР но с разсредоточена конструкция на зарядите от ВВ ,като е направена оценка на ефективността на въведените технологични решения и тяхното влияние върху движението на взривената скална маса.

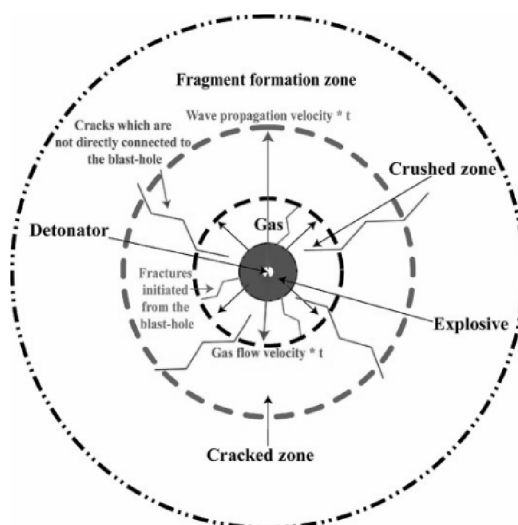
Механизъм на разрушаване на скалния масив посредством провеждане на ПВР

Разрушаването на скалния масив при провеждане на пробивно-взривни работи се осъществява вследствие на бързото освобождаване на голямо количество енергия при детонацията на взривното вещество. При детонационния процес се генерират високи налягания и температури, които въздействат върху стените на сондажа и предизвикват образуване на ударни вълни в скалния масив.

Таблица №3. Последователност на физичните процеси при разрушаване на скалния масив чрез прилагане на взривни работи

Етап	Процес	Резултат
1	Детонация на ВВ	Образуване на ударна вълна
2	Въздействие върху стените на сондажа	Смачкване на скалата
3	Разпространение на напреженията	Образуване на радиални пукнатини
4	Разширяване от взривните газове	Развитие на пукнатините
5	Отделяне към свободна повърхност	Раздробяване и разместване
6	Движение на скалната маса	Формиране на взривен насип

Под въздействието на тези вълни първоначално около сондажа се формира зона на интензивно смачкване и раздробяване на скалата. С увеличаване на разстоянието от заряда се създават радиални и концентрични пукнатини, които отслабват връзките в масива. След преминаването на ударната вълна взривните газове проникват в образуваните пукнатини и подпомагат тяхното разширяване, като предизвикват отделяне и изместване на скалната маса към свободната повърхност. Крайният резултат от взаимодействието между ударната вълна, взривните газове и свободната повърхност е раздробяване, разместване и разхвърляне на скалната маса в граници, определени от параметрите на взривяването и физико-механичните характеристики на скалите.



Фиг. 1. Схематична диаграма на процесите на натрошаване около заряд от взривно вещество в скален масив: Explosive (Взривно вещество); Detonator (Детонатор/Донорен заряд); Crushed Zone (Зона на натрошаване); Cracked Zone (Зона на напукване); Fragment Formation Zone (Зона на формиране на късове); Gas Flow Velocity (Скорост на движение на газовете); Wave Propagation Velocity (Скорост на разпространение на вълната); Fractures initiated from the blast-hole (Пукнатини, инициирани от сондажа); Cracks which are not directly connected to the blast-hole (Пукнатини, които не са пряко свързани със сондажа)

От гледна точка на данните за V_p (надлъжни сеизмични вълни) и V_s (напречни сеизмични вълни), размерът на (*Wave Propagation Velocity*) ще бъде по-голям при хорнфелзите и гранодиоритите, отколкото при филитите, защото скоростите на сеизмичните вълни са по-високи. Това означава по-бързо разпространение на енергията и различен характер на напукване и фрагментация на скалния масив. Реалната енергия при взривяване или механично раздробяване обикновено е 10–100 пъти по-голяма от теоретичната енергия на разрушаване поради загуби, пукнатинност, анизотропия и неефективност на процеса.

Таблица №4. Необходима теоретична енергия (MJ) за разрушаването на 1000 m^3 скална маса

Литология	Необходима енергия (MJ)
Филити	90
Ивичести и петнисти шисти	530
Хорнфелзи	2 150
Монцодиоритови порфирити	4 380
Гранодиорити	3 680

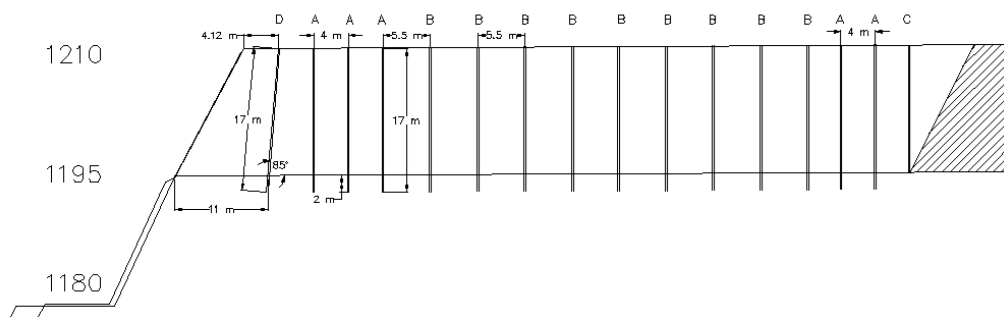
Анализ на ПВР в „Етап-1“ с неразсредоточена конструкция на зарядите от ВВ

За оценка на влиянието на параметрите на пробивно-взривните работи върху прехвърлянето на взривената минна маса към по-долни работни хоризонти са анализирани пет взривни полета разположени на хоризонт-1210. Литоложкият състав е представен основно от гранодиорити с осреднена плътност 2,66 g/cm^3 и гранодиорит-хорнфелзова асоциация с малко по-висока плътност 2,70 g/cm^3 . Напукаността на скалния масив е сходна за всички полета (0,3–0,5 m), а предварителен просип пред борда на работните площадки не е наличен.

Таблица №5. Основни проектни и технологични параметри на изследваните взривни полета в „Етап-1“

№	ВП, №	Хоризонт	Порода скали	Осреднена плътност на масива, g/cm3	Напуканост , m	Просип на площадката пред ВП, m3	Сондажна мрежа между 1ви и 2ри ред, m		Дължина на ВП, m	Брой сондажи в 1ви и 2ри ред, бр.				Средно отстояние на сондажите от горен ръб, m	Вложени взривни вещества, kg				Генерирана енергия, MJ		Обем преди взривяване, m3	Паднал обем, m3	Паднал обем, %	
							a	b		165mm	%	250mm	%		Е-3400	%	АНФО Е	%	В 1ви и 2ри ред на ВП	Общо на взривното поле			%	m3/m
1	110	1210	гранодиорит	2,66	0,3-0,5	0	6,5	5,5	54	0	0	19	100	1,85	73958	81,0	17172	19,0	42520	337424	90200	17000	18,8	315
2	119; 124	1210	гранодиорит	2,66	0,3-0,5	0	6,5	5,5	65	0	0	22	100	1,66	154570	99,4	900	0,6	64704	570430	119200	14000	11,7	215
3	133	1210	гранодиорит	2,66	0,3-0,5	0	6,5	5,5	46	0	0	16	100	2,56	114720	100	0	0	45190	420793	93200	9000	9,7	196
4	143	1210	гранодиорит	2,66	0,3-0,5	0	5	4	35	18	90	2	10	4,12	66700	96,5	2450	3,5	22976	254093	65500	5400	8,2	154
5	154	1210	гранодиорит/хорнфелси	2,7	0,3-0,5	0	6,5	5,5	81	0	0	26	100	3,47	98910	100	0	0	80109	362802	81600	9000	11,0	111
Общо/Средно				2,66	0,3-0,5	0	6,2	5,2	281	4	18	17	82	2,73	101771	95	4104	5	51099	389108	449700	54400	12,1	194

ВП №143 показва най-добри резултати от петте анализирани полета. По-гъстата сондажна мрежа осигурява по-равномерно раздробяване и контрол върху движението на взривената минна маса. Увеличеното отстояние на първия ред от горния ръб е ограничило прехвърлянето към долните хоризонти.



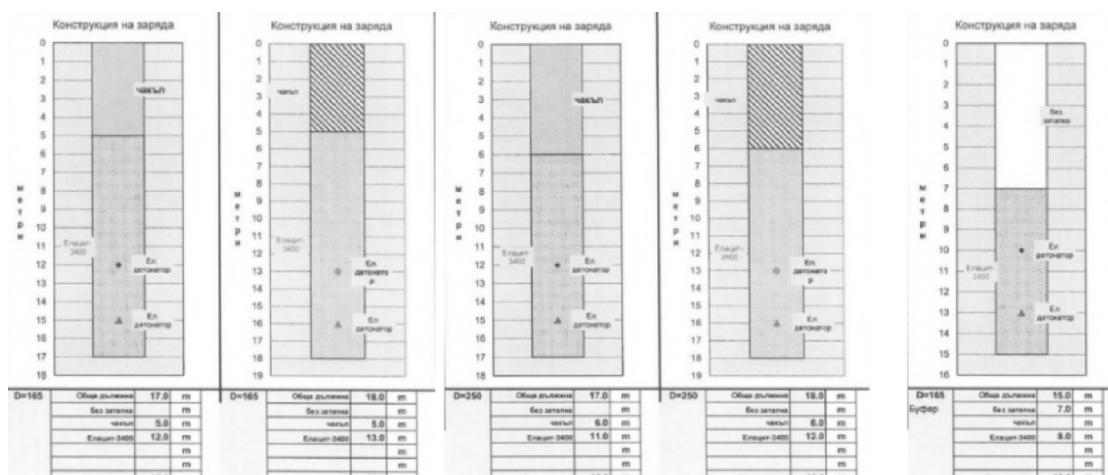
Фиг.2. Напречен разрез на ВП №143. Категории сондажи, разстояния между редовете

Фиг.2. илюстрира проектната схема на сондажното поле за масово взривяване. Разстоянията между сондажите варират от 4,0 до 5,5 m в зависимост от категорията на сондажа и местоположението му в блока. Сондажите са проектирани с дълбочина 17 m и наклон, съобразен с геометрията на откоса. Чрез диференцираното разполагане на крайните и вътрешните сондажи се цели постигане на равномерно раздробяване на скалния масив, запазване устойчивостта на откосите и минимизиране на риска от прехвърляне на взривена скална маса към съседни работни участъци.

Таблица № 6. Основни проектни показатели за ПВР на ВП №143.

Категория сондажи	Тип сондажи	Диаметър, mm	Проектен ъгъл, ...°	Проектна дълбочина, m	Патрон боевици, бр.	Количество ВВ "Елацит 3400" в един сондаж, kg	Конструкция на заряда	Забивка, m
A	производствени	165	90	17	2	320	непрекъсната	5
B	производствени	250	90	17	2	760	непрекъсната	6
C	буферни	165	90	15	2	220	непрекъсната	-
D	производствени	165	85	17-18	2	320-350	непрекъсната	5

Таблица №6 съдържа проектните характеристики на сондажите и зарядите, използвани при масовото взривяване, включително геометричните параметри на сондажите, количествата взривно вещество и конструкцията на зарядите за отделните категории сондажи.



Фиг.3. Конструкция на зарядите на отделните категории сондажи, приложени във ВП №143.

Иницирирането на зарядите е посредством електронно-програмируеми капсул-детонатори на фирма „Austin Powder“. Последователността на взривяване е организирана по диагонално-редова схема, като са приложени закъснения между сондажите и редовете, аналогични на използваните при неелектрическите системи NONEL – 25 ms, 42 ms, 65 ms и 109 ms.. Благодарение на високата точност на електронните детонатори се постига надеждно изпълнение на проектната схема на взривяване и ограничаване на риска от прехвърляне на скална маса към по-долни работни хоризонти.

Основни изводи за оптимизиране на параметрите на ПВР в „Етап-1“ с неразсродоточена конструкция на зарядите от ВВ

Анализът на ПВР от „Етап- 1“ показва, че за ограничаване на прехвърлянето на взривената минна маса към по-долните хоризонти е целесъобразно прилагането на по-гъста сондажна мрежа (приблизително 5 x 4 m със сондажи с d=165 mm), увеличено отстояние на първия ред от горния ръб и адаптиране на параметрите на зареждане спрямо плътността и здравината на литологията. Прилагането на електронно-програмируеми КД ще допринесе за реализирането на по-добри резултати.

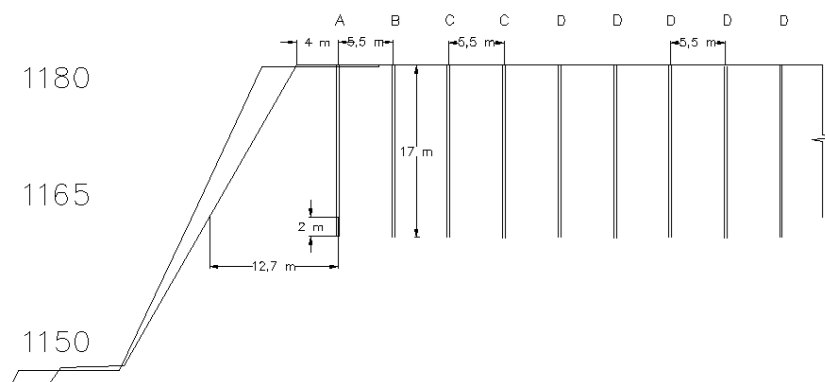
Анализ на ПВР в „Етап-2“ с разсродоточена конструкция на зарядите от ВВ

Вторият етап от изследването представлява прилагане на практически опит и надграждане на изводите, получени при анализа на взривните полета от „Етап-1“. След установеното влияние на сондажната мрежа, отстоянието на първия ред сондажи от горния ръб и разпределението на взривната енергия върху прехвърлянето на взривената скална маса, в Етап-2 са приложени допълнителни технологични решения, като разсродоточена конструкция на зарядите от ВВ с цел подобряване контрола върху движението на масива и ограничаване на падналата маса към по-долните работни хоризонти.

Таблица №7 Основни проектни и технологични параметри на изследваните взривни полета в „Етап-2“

№	ВП, №	Хоризонт	Порода скали	Осреднена плътност на масива, g/cm3	Напуканост , m	Просип на площадката пред ВП, m3	Сондажна мрежа между 1ви и 2ри ред, m		Дължина на ВП, m	Брой сондажи в 1ви и 2ри ред, бр.			Средно отстояние на сондажите от горен ръб, m	Вложени взривни вещества, kg				Генерирана енергия, MJ		Обем преди взривяване, m3	Паднал обем, m3	Паднал обем,		
							a	b		165mm	%	250mm		%	Е-3400	%	АНФОЕ	%	В 1ви и 2ри ред на ВП			Общо на взривното поле	%	m3/m
1	214	1180	гранодиорит	2,66	0,3-0,5	0	6,5	5,5	26	0	0	8	100	3,96	25930	100	0	0	12324	95111	27442,8	6000	21,9	231
2	215	1165	гранодиорит	2,66	0,3-0,5	5500	7	6	121	9	31	20	69	3,9	20820	100	0	0	26703	76367	40019,4	1000	2,5	8
Общо/Средно				2,66	0,3-0,5	2750	6,75	5,75	147	4,5	15,5	14	84,5	3,93	23375	100	0	0	19514	85739	67462,2	7000	10,4	48

Анализирани са две взривни полета в една и съща скална среда – гранодиорит с еднаква осреднена плътност ($2,66 \text{ g/cm}^3$) и сходна напуканост ($0,3\text{--}0,5 \text{ m}$), което позволява сравнението да се базира основно на параметрите на пробивно-взривните работи и резултатите от взривяването. ВП №214 е реализирано при липса на просип пред взривното поле и сравнително компактна сондажна мрежа $6,5 \times 5,5 \text{ m}$. Използвани са изцяло сондажи $d=250 \text{ mm}$, което в комбинация с високото количество вложено взривно вещество ($25\,930 \text{ kg}$ „Е-3400“) и обща генерирана енергия от $95\,111 \text{ MJ}$ е осигурило добро разрушаване на масива. В резултат е постигнат паднал обем от $6\,000 \text{ m}^3$, което представлява $21,9\%$ от обема преди взривяване.



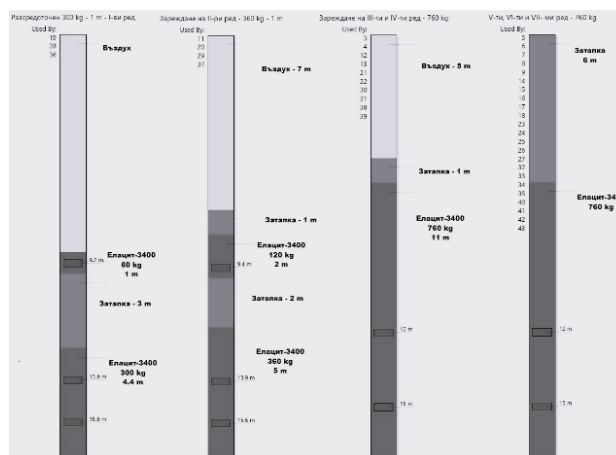
Фиг.4. Напречен разрез на ВП №214. Категории сондажи, разстояния между редовете

Фиг.4. илюстрира проектната схема на сондажно поле №214. Сондажите са групирани в категории А, В, С и D, като разстоянията между редовете е $5,5 \text{ m}$, а между сондажите $6,5 \text{ m}$. Всички сондажи са проектирани с дълбочина 17 m . Разстоянието от първият ред сондажи до проектен горен ръб на работната площадка е 4 m .

Таблица № 8. Основни проектни показатели за ПБР на ВП №214.

Категория сондажи	Тип сондажи	Диаметър, mm	Проектен ъгъл, ...°	Проектна дълбочина, m	Патрон боевици, бр.	Количество ВВ "Елацит 3400" в един сондаж, kg	Конструкция на заряда	Забивка, m
A	производствени	250	90	17	3	долен-300; горен-60	разсредоточена	$3 \rightarrow 0$
B	производствени	250	90	17	3	долен-360; горен-120	разсредоточена	$2 \rightarrow 1 \rightarrow 0$
C	производствени	250	90	17	2	760	непрекъсната	$1 \rightarrow 0$
D	производствени	250	90	17	2	760	непрекъсната	6

Разсредоточената конструкция на зарядите от взривно вещество е приложена с цел оптимално разпределение на енергията по височината на сондажа и нейното съобразяване с променящите се геоложки и геометрични условия в скалния масив. Чрез разделяне на основния заряд на отделни секции, разделени с инертна междинна забивка, се осигурява по-равномерно въздействие върху скалата, намалява се концентрацията на енергия в отделни зони и се ограничава рискът от свръхраздробяване и нарушаване на проектния контур на откоса. Допълнителна цел на тази конструкция е ограничаване на прехвърлянето и разпиляването на взривената скална маса към подолните работни хоризонти, което повишава безопасността на производствения процес, намалява необходимостта от последващо почистване на работните площадки и съдейства за запазване на нормалния технологичен цикъл в съседните работни участъци.



Фиг.5. Конструкция на зарядите на отделните категории сондажи, приложени във ВП №214, от ляво на дясно- в първи ред (силно редуцирано количество на ВВ), във втори ред, в трети и четвърти ред и последно от пети ред до девети ред

Повърхностната взривна мрежа е проектирана с неелектрическа система за инициране тип NONEL, осигуряваща висока надеждност на взривяването и прецизен контрол върху последователността на взривяване на отделните сондажи. Системата използва комбинация от повърхностни конектори с времена 17 ms, 42 ms, 65 ms и 109 ms, чрез които е реализирано поетапно развитие на взривния процес. При общо 41 сондажа, заредени с 25 930 kg взривно вещество „Елацит-3400“, и обща продължителност на взривяването 2378 ms, NONEL мрежата осигурява плавно придвижване на фронта на взривяване по протежение на блока. Това е особено важно предвид разположението на сондажите по горния ръб на откоса, тъй като подпомага насочването на разрушената скална маса към проектната зона на натрупване и ограничава падането на материал към по-долните работни хоризонти.

Заключение

Сравнителният анализ между “Етап-1” и “Етап-2” показва положителен ефект от приложените мерки за оптимизация на параметрите на ПВР. Средният дял на прехвърлената скална маса намалява от 12,10% на 10,38%, което представлява подобрение от 14,2%. Едновременно с това средното отстояние на първия ред сондажи от горния ръб е увеличено от 2,73 m на 3,93 m, а генерираната енергия в първите два реда е намалена с 61,8%. Най-съществен резултат е отчетен при показателят m^3/m , който намалява от 193,6 на 47,6 m^3/m или с 75,4%. Получените резултати потвърждават, че:

- Увеличаването на отстоянието на първия ред сондажи намалява вероятността за прехвърляне;
- При изпълнение на сондажи с $d=165$ mm в първите два до четири реда от взривното поле се получават добри резултати;
- Разсредоточената конструкция на зарядите подобрява контрола върху движението на скалната маса;
- Намаляването на енергията в първите два реда има съществен ефект върху ограничаване на прехвърлянето;
- Предварително формираните просипи пред взривните полета, оказват съществено влияние върху резултатите;

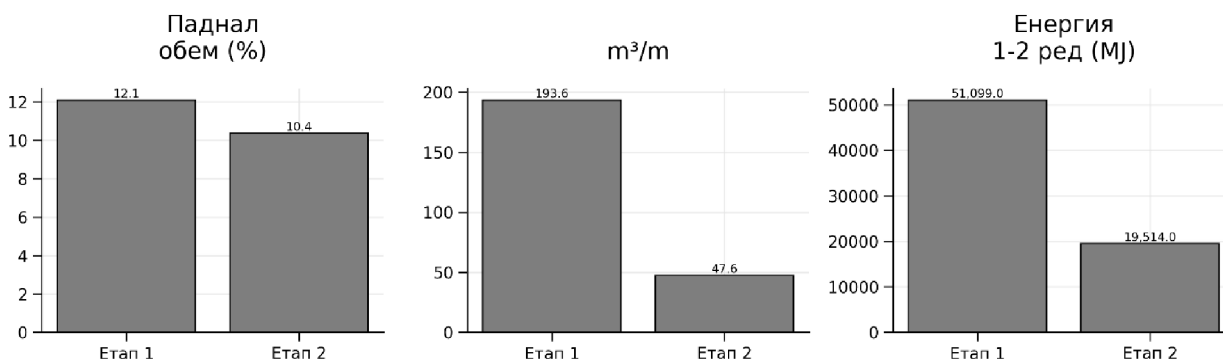
ВП №143 показва най-добри резултати сред анализиранияте взривни полета с неразсредоточена конструкция на зарядите и е използвано, като базов модел за разработване на решенията, приложени в “Етап-2”. Следва да се отбележи, че ВП №143 показва най-нисък относителен дял на падналата скална маса сред всички анализирани взривни полета, изпълнени без предварително формиран просип пред взривното поле. Това позволява резултатите да бъдат разглеждани, като

обективна оценка на влиянието на параметрите на ПБР върху прехвърлянето на взривената скална маса.

Таблица №9 Сравнение между получените резултати от приложените ПБР в „Етап-1“ и „Етап-2“

Показател	Етап 1	Етап 2	Разлика
Брой анализирани взривни полета	5	2	-
Средна сондажна мрежа а x b, m	6.2 x 5.2	6.75 x 5.75	По-разредена в Етап 2
Средна дължина на ВП, m	56.2	73.5	+30.8%
Среден брой сондажи в първи и втори ред	17	14	-17.6%
Средно отстояние от горен ръб, m	2.73	3.93	+44.0%
Средно количество ВВ, kg	101 771	23 375	-77.0%
Средна енергия в първи и втори ред, MJ	51 099	19 514	-61.8%
Средна обща генерирана енергия, MJ	389 108	85 739	-78.0%
Среден обем преди взривяване, m ³	89 940	33 731	-62.5%
Среден паднал обем, m ³	10 880	3 500	-67.8%
Среден паднал обем, %	12.10 %	10.38 %	↓ 14.2%
Среден показател m ³ /m	193.6	47.6	↓ 75.4%
Среден просип пред ВП, m ³	0	2 750	+2 750

Сравнение на ключови показатели от Таблица 9



Фиг.6. Сравнение на ключови показатели от приложените ПБР в „Етап-1“ и „Етап-2“

Литература

1. Взривна техника и технология. Валери Митков, София 2020
2. В помощ на взривника. Никола Паунов, Борислав Барбулов, София 1989
3. Взривни явления и експлозиви. Гергана Камбурова, София 2007
4. Справочник на взривника. Петър Шишков, София 2019
5. Взривни работи. проф. к. т. н. инж. Славчо Б. Лазаров
6. Surface Blast Design. Konya & Walter
7. Drilling and Blasting of Rocks. Jimeno, Jimeno & Carcedo
8. Rock Blasting and Explosives Engineering. Persson, Holmberg & Lee

ГЕОМЕХАНИЧНА СЪЩНОСТ НА БАРИЕРНИТЕ ЦЕЛИЦИ И ПОДХОДИ ЗА ТЯХНОТО ОРАЗМЕРЯВАНЕ

проф. Георги Михайлов, МГУ Св. Ив. Рилски e-mail: mihayg@mgu.bg

РЕЗЮМЕ

Представена е концепция за оразмеряване на бариерни целици като основен конструктивен елемент в рудодобивните технологии. Посочени са трите стъпки, изискващи успешното решаване на проблема.

- Изучаване на структурната нарушеност на масива;
- Изграждане на адекватен блоков модел;
- Разработване на подходящ изчислителен метод.

Върху реален обект са посочени основните закономерности при изучаване на напрегнато и деформирано състояние (НДС) използвайки собствен програмен продукт по метода на крайните елементи-Finite element method (FEM). За нуждите на съвместно открито-подземно разработване се предлага хибриден подход за оразмеряване на бариерния целик. Той се основава на съчетанието на Метода на крайните елементи и Distinct element method (DEM). Формулирани са три ограничаващи условия за осигуряване на точността на полученото решение: непрекъснатост на преместванията, съвместимост на преместванията и силовото натоварване на interface, определящ границата между двата метода, респ. две облости.

Ключови думи: структурна нарушеност на масива; напрегнато и деформирано състояние; хибриден модел.

CROWN PILLAR MINE DESIGN, USING NUMERICAL HIBRID MODELS

ABSTRACT

This paper presents a contemporary conception for crown pillar dimensioning as basic element in ore mining technology. It must be recognized three technical steps assuring successful solving the problem:

- *Field Mapping and Geometric Properties of fractures;*
- *Mining Operation Block Model construction;*
- *Explicit Discrete Element Method for Approximation to Derivatives,*

Investigations are based on the real ore mine object in Chelopech mine. The strain-stress condition (SSC) analysis are made on the basis of Finite Element Method (FEM) using mesh of triangular and quadrilateral elements. In transition from open-pit to underground mining is proposed a hybrid numerical method, including Distinct Element Method (DEM) and Finite Element Method (FEM). The successful solution to dimensioning the crown pillar needs to formulate three boundary conditions: displacement compatibility, displacement continuity and stress equilibrium without separation and slipping between two regions.

Keywords: Rock Mass Discontinuity; Strain-Stress condition; Hybrid Model.

Въведение

Установено е, че голямото многообразие на използваните практики, респ. технологичните схеми за разработване на рудни находища се дължи на широките граници, в които се изменят природните и минно-технически фактори. Това затруднява опитите за класификация на добивните технологии, особено ако се търсят подходи за общо разглеждане на открито и подземно разработване. В конкретния случай се предлага вариант, основаващ се на класификационния признак „групиране на находищата“ както следва:

I група Разработване на находища само по открит начин;

II група Разработване на находища само по подземен начин;

III група Комбинирано разработване с три подгрупи:

III.1 Едновременно разработване по открит и подземен начин;

III.2 Последователно разработване чрез преминаване от открит към подземен добив;

III.3 Последователно разработване чрез преминаване от подземен към открит добив.

В два от случаите на комбинирано разработване (III.1 и III.2) задължително условие е оставянето на бариерен целик за изолиране на взаимното влияние на минните работи и осигуряване на безопасни условия за работа. Той се оказва основен конструктивен елемент, чието надеждно оразмеряване се явява гарант за ефективно и безопасно развитие на минните работи през целия период на изземване на запасите в границите на рудничното поле.

С навлизане на добивните работи в дълбочина рязко се променят природните условия на залягане (в отрицателна посока). Същевременно техническата революция спомага за създаване на нови и ефективни машини, способни да се адаптират към променящите се природни условия. Конюнктурата на пазара поставя все по-високи изисквания към ефективността на системите на разработване, което най-често налага тяхната замяна с по-ефективни (респ. по-производителни). Смяната на добивната технология също е свързана с оставянето на бариерни целици. Следователно, налага се въвеждане на нова Четвърта група в посочената по-горе класификация:

IV група Промяна на добивната технология в подземния рудник с три подгрупи:

IV.1 При преминаване от Подетажно обрушаване към Камерно-целикова система (КЦС);

IV.2 При преминаване от Система с открито добивно пространство към технология с Подетажно обрушаване;

IV.3 При преминаване към технология с Блоково обрушаване;

IV.3.1 Преминаване от система със запълване към блоково обрушаване;

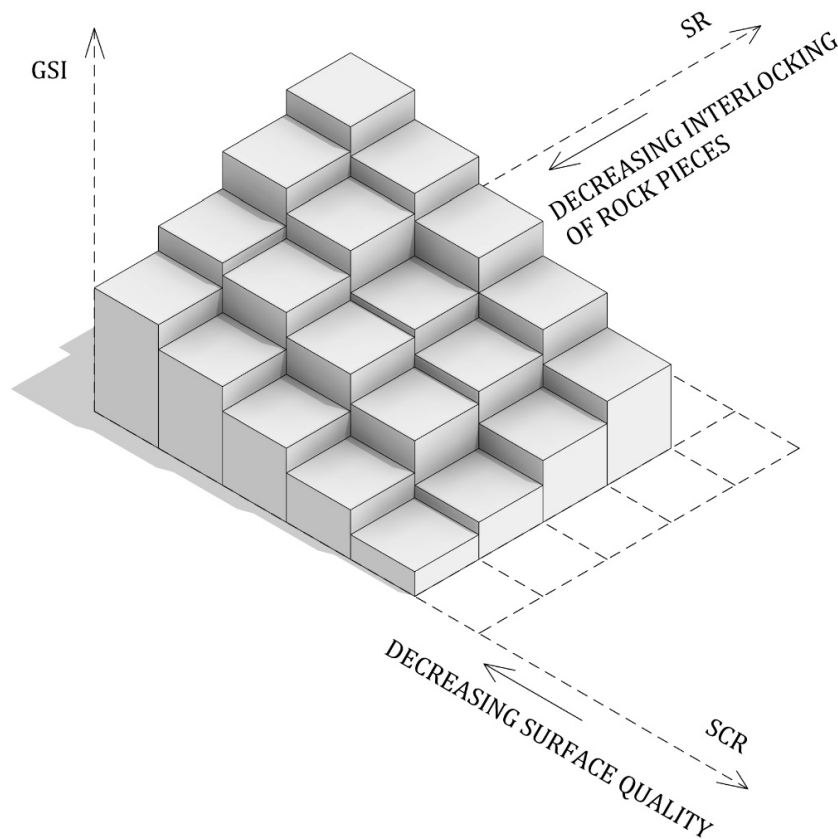
IV.3.2 Преминаване от система с подетажно обрушаване към блоково обрушаване.

Тази статия има за цел да покаже сложния характер на разпределение на действащите напрежения около подготвителните и добивни изработки при комбинирано разработване и промяна на добивната технология при подземен добив (група III и група IV). Тя идва да покаже динамиката на изменение на напрегнатото и деформирано състояние (НДС) в периода на оформяне на бариерния целик. Очертават се множество варианти, което налага търсенето на оптимално решение. Това може да се постигне само при ясно формулирани изчислителна схема и гранични условия, което представлява първи етап от цялостно комплексно изследване, свързано с рационалното разработване на запасите в границите на дадено руднично поле.

1.Изучаване на структурна нарушеност на масива като фактор, определящ устойчивостта

Въз основа на натрупания опит по изучаване на структурната нарушеност на масива са установени факторите на напукаността, влияещи върху устойчивостта. На първо място следва да се отбележи броят на системите пукнатини с тяхната ориентация в пространството и честотата [бр. пукнатини/m]. Оформя се елементарен структурен блок с определена форма и размери. В реалния масив отделните елементарни структурни блокове образуват комбинация с откритите пространства на минните изработки. Собственото тегло и характерът на контактите между отделните пукнатини, както и кинематичната същност на движението на блоковете определят начина на закрепване на изработките (анкери, мрежи и пр.). Тук следва да се подчертае, че процесът на разрушаване на реалния масив около минните изработки може да се развие както по съществуващите, така и по новообразувани повърхнини. Следователно, възниква въпросът за съответствието на механичните свойства, определени в лабораторни и натурни условия. Като количествен измерител на това несъответствие се използва коефициентът на структурна нарушеност K_w . Той се определя за различни якостни и деформационни показатели като якост натиск σ_c , якост на опън σ_t , модул на еластичност E , модул на срязване G , коефициент на Поасон μ и пр. В конкретните природни условия стойностите на коефициента K_w варират в много широки граници (0.1 до 1.0). Това създава големи отклонения и е

предпоставка за въвеждане на субективни оценки. Така се стига до масово използване на класификационните характеристики на масива. Всички те се основават на *Rock Quality Designation (RQD)* – един обективно съществуващ показател с ясни правила за неговото определяне. Несъответствието на механичните показатели в лабораторни и натурни условия е основно направление в системното изучаване на напукаността. Сред показателите, които най-добре описват това несъответствие е Geological Strength Index (GSI). На фиг. 1 е показана графичната интерпретация на автора. GSI се разглежда като двумерна матрица на Structure Rate (SR) и Surface Condition Rate (SCR). Благодарение на матричната форма на представяне, GSI дава възможност да се определят константите m и s , участващи в критериите Хоук-Браун (H-B) и Mohr-Coulomb (M-C). Това са двата най-често използвани критерии за разрушаване в условията на здрави, но напукани скали.



Фиг.1 Диаграма на изменението на GSI в зависимост от Structure Rate (SR) и Surface Condition Rate (SCR).

Стремежът към въвеждане на максимално близки до реалните стойности в моделите за изучаване на НДС дава тласък на едно ново направление, свързано с екстраполацията на данните, получени в лабораторни и крупно-машабни полски изследвания. Gray [1] предлага подход за използване на полиноми за определяне на зависимостта $y=f(x)$, където y е функцията, например Young's modulus, E , а x е аргументът-размерът на конструктивния елемент, за който се извършва изследването. Така например при използване на полиноми от четвърта степен зависимостта на Young's modulus E от размера на конструктивния елемент x изглежда така [2]

$$y=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3+a_4x^4$$

В случая $a_1, a_2, \dots, a_4$ са коефициенти пред аргумента x .

Масовото замерване на пукнатини в минните изработки е най-широко използваният метод за намиране на показателите на напуканост. В резултат на тази дейност се формират големи числени масиви, които са предпоставка за статистическа обработка на данните. Priest and Hudson показват, че разстоянието между пукнатините при добре развита мрежа се подчинява на експоненциален закон от вида:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (1)$$

където $\lambda = \frac{1}{\bar{x}}$ е средната честота на пукнатините; $\bar{x}$ – средно разстояние между пукнатините. За нуждите на анализа на устойчивото състояние на масива по-голямо е значението на обемните показатели. Така се достига до обемната интензивност на напукаността J_v . Нейно предимство е отчитането и на несистемните пукнатини на даден участък. За определяне на J_v се използва следният израз

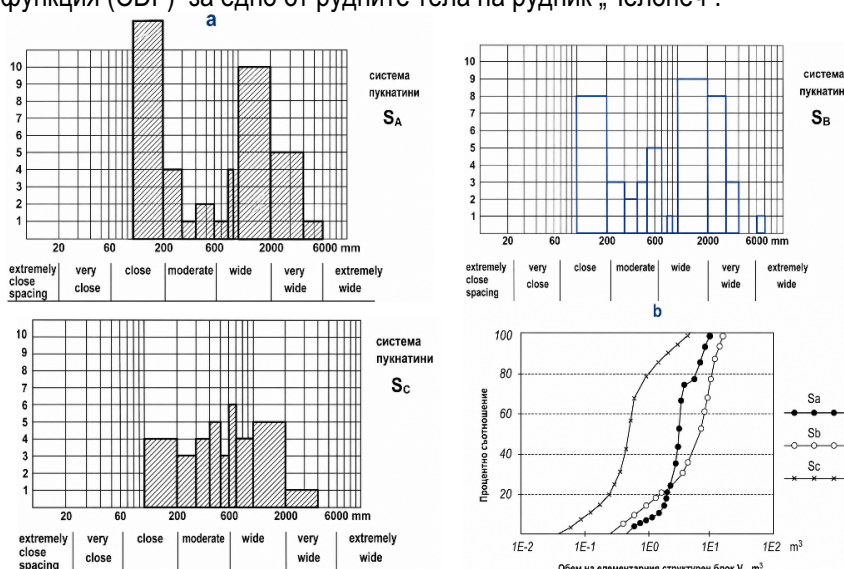
$$J_v = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{S_i} [N(j)_i + N(ns)_i], \text{ бр/м}^3 \quad (2)$$

където S_i е Общата дължина на измерителните участъци по i – то направление,
 $i = 1, 3$
 $N(j)_i$ - Броят на пукнатините от j – та система; $j = \overline{1, k}$; k – общ брой на системите пукнатините по i – то направление
 $N(ns)_i$ - Броят на несистемните пукнатини по i – то направление

Във формула (2) се приема $i=3$, защото масовото замерване на пукнатините се извършва по три взаимно-перпендикулярни направления. Определянето на J_v съгласно израза (2) служи за основание да се търси аналогия с израза (1). Тогава вероятностното разпределение на J_v може да се представи във вида

$$P(Ve) = \lambda e^{-\lambda Ve} \quad (3)$$

където λ е реципрочната стойност на средната величина на обема на елементарния структурен блок $\overline{Ve}$. Изхождайки от постановката, че реалният скален масив представлява дискретна среда от отделни блокове, както и изразите (1), (2) (3), се установява, че за нуждите на стохастическото моделиране е най-подходящо използването на вероятностното разпределение на Weibull. На фиг.2 е показана кумулативната функция (CDF) за едно от рудните тела на рудник „Челопеч“.



Фиг.2 Вероятностно разпределение на разстоянието между пукнатините за три системи S_A , S_B , S_C в даден участък на рудник „Челопеч“; а – Probability Density Function; б – Cumulative Distribution Function.

Ясно се очертават различните значения на обема на елементарния структурен блок V_e за трите системи пукнатини S_A , S_B и S_C . При построяване на вероятностната функция (PDF) се установява значително изменение на разпределението на разстоянието между пукнатините l като случайна величина. Анализът на сравнението с другите рудни тела показва, че многообразието е още по-голямо. Това е предпоставка за необходимост от индивидуален подход при избора на подходящи геомеханични показатели за оценка на приложимостта на добивните технологии.

2. Оразмеряване на бариерни целици при преминаване от система с подетажно обрушаване към камерно-целикова система на разработване (група IV.1)

Преминаването от система с подетажно обрушаване към камерно-целикова система (КЦС) на разработване е логична стъпка, следвайки стремежа към увеличаване на ефективността на добивно изземване. В основата на технико-икономическото сравнение стои равнището на загубите a_e и обедняването b , които при двете технологии съществено се различават. Критерият за оценка е коефициентът на количеството $K_{кол}$, който се определя съгласно израза

$$K_{кол} = \frac{1-a_e}{1-b} = \frac{\eta}{\rho},$$

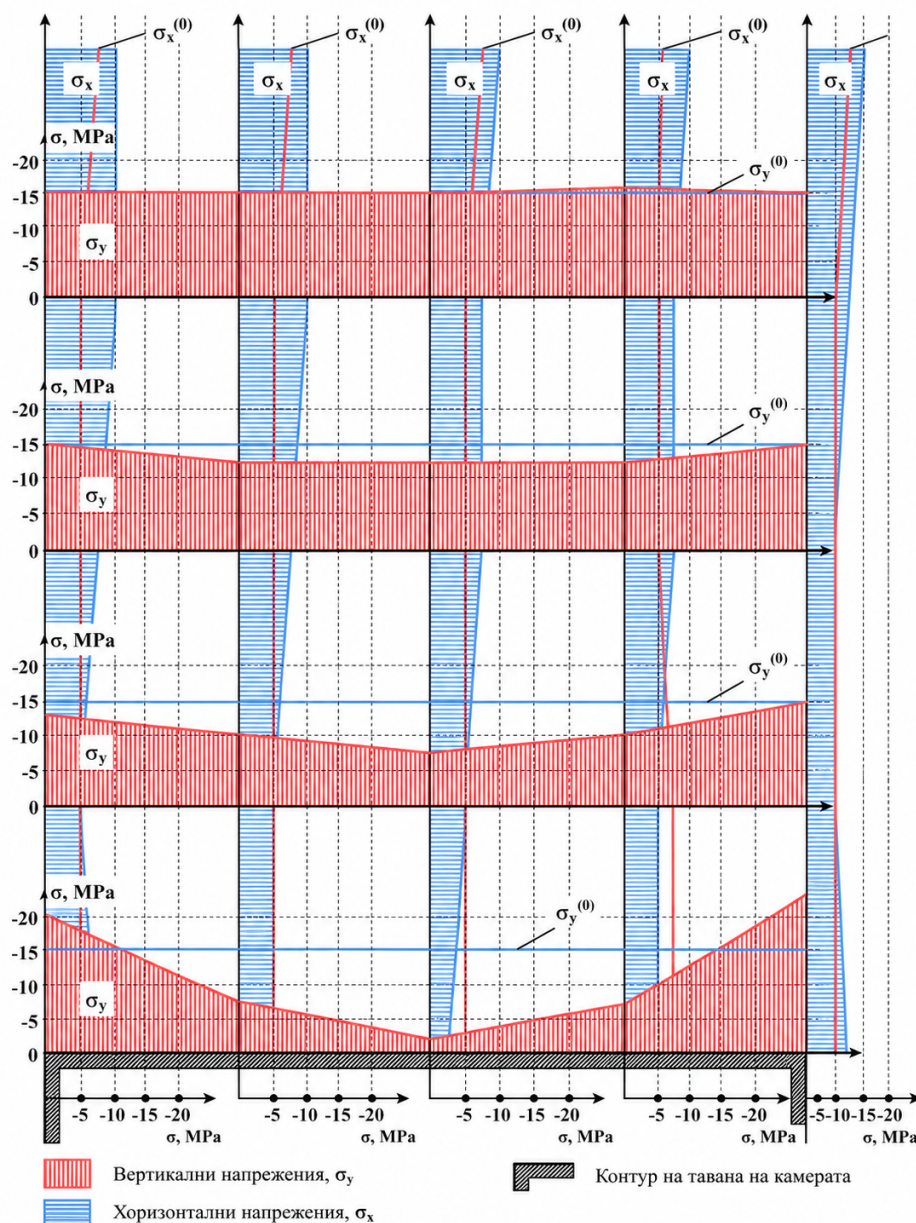
където η и ρ са съответно коефициентът на извличане и коефициентът на изменение на качеството.

$K_{кол} > 1$, когато $b > a_e$;

$K_{кол} < 1$, когато $a_e > b$.

Системата с подетажно обрушаване осигурява значителна производителност $A_{бл}$, но това се постига със съществено обедняване, респ. по-ниско равнище на коефициента на качеството ρ . Предимство на КЦС е ниското равнище на обедняването, особено при изземване на първичните камери. Преминаването от система с подетажно обрушаване към КЦС изисква оставяне на бариерен целик с цел елиминиране на взаимното влияние на минните работи. Това е конструктивен елемент с ясно изразена геомеханична същност. Тя се формира от съчетанието на минно-техническите параметри като: избор на първични и вторични камери със съответната геометрия - дължина L_k , ширина B_k и височина H_k , височина на подетажа h_{ne} и свързаните с нея сондажно отбиване и пробивно-взривни работи (ПВР), ред на разработване в границите на етажа, а така също последователното изземване в границите на рудничното поле. Минно-техническите параметри се разглеждат в неразривна връзка с геомеханичните показатели: механични свойства на рудата, страничните скали и втвърдяващото запълнение; структурната нарушеност на масива; класификационните характеристики на рудата и страничните скали.

За изследване на НДС на масива около добивните изработки при преминаване от подетажно обрушаване към КЦС особено подходящо е използване на изчислителни схеми, основаващи се на Метода на крайните елементи МКЕ. Тук са посочени резултатите от конкретно изследване за едно от рудните тела с голямо площно разпространение в рудник „Челопеч“. Използвана е собствена програмна система FEMEL, като задачата се решава в условие на равнинно-деформирано състояние. Неоднородността на средата се отчита като се въвеждат различни механични показатели на рудата, страничните скали и втвърдяващото запълнение. За моделиране на тектонските нарушения се използват правоъгълни елементи, като алгоритъмът предвижда съвместимост на контактите между триъгълните и правоъгълни елементи. Голямо предимство на използваните изчислителни схеми е възможността да се проиграват множество варианти, включващи различни геометрични размери на камерите, различна последователност на изземване, различни механични свойства на втвърдяващото запълнение. На фиг.3 е показано разпределението на хоризонталните σ_x и вертикалните σ_y напрежения в тавана на добивната камера. Въз основа на получените резултати предварително се определят профилни линии, по които се отчитат стойностите на напреженията. Така се постига необходимата представа за характера и динамиката на изменение на σ_x и σ_y в пространството около добивните изработки. Важно условие за оценка на устойчивото състояние е определянето на градиента на изменение на НДС.



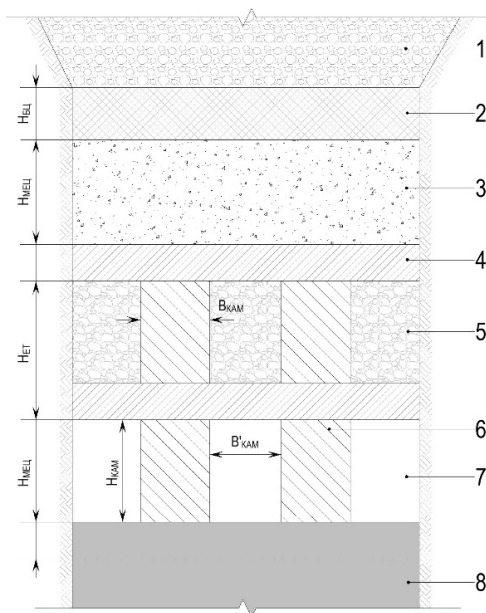
Фиг. 3 Разпределение на напреженията в тавана на добивната камера, определени по МКЕ.

За целта на профилните линии се отбелязват напреженията в ненарушения масив $\sigma_x^{(0)}$ и $\sigma_y^{(0)}$.

Увеличаването на геометричните размери на първичните камери има важно предимство: намаляват се щетите от обедняването и нараства интензивността на добивните работи. Прекомерното увеличаване на геометричните размери обаче довежда до рязко влошаване на състоянието на камерите в тавана и страничните стени. Оформят се блокове (най-често по съществуващите пукнатини и разломи), които са в състояние да се обрушат дори само от сеизмичния ефект от взривните работи и да предизвикат аварии, въпреки използването на товаро-транспортни машини с дистанционно управление. Освен това, наличието на допълнителни пукнатини довежда до затруднено прокарване на взривните сондажи във вторичните камери. Увеличава се относителният разход на ВВ, а от там и обедняването, предизвикано от разрушаването на част от запълнението на първичните камери. Следователно, налице е една оптимизационна задача: или увеличаване на геометричните параметри на камерите, или осигуряване на по-благоприятни минно-технически условия за извършване на

цялостното изземване на добивния блок. Успешното решаване на тази задача изисква детайлно изследване на НДС на масива през различните етапи на развитие (вкл. прокарването и състоянието на подготвителните изработки), което е смисълът на така описаната по-горе процедура.

При разработване на рудни тела с големи размери по линията на западане рудничното поле се разделя на етажи като границата между тях се явяват междуетажните целици (МЕЦ). Освен за вентилация и транспорт в тях се разполагат средствата за следене на състоянието на минния масив. Процедурата за оразмеряване на МЕЦ не се различава от тази за оразмеряване на бариерния целик (БЦ). Тук се поставят още три много важни условия: осигуряване на безопасна експлоатация при изземване на запасите в отделните етажи; безопасна експлоатация на подготвителните изработки, някои от които имат дълъг срок на съществуване; осигуряване на техническа възможност за последващо изземване на блокираните в МЕЦ запаси. Особено актуален е въпросът за последователността на изземване на етажите. Алтернативите са две: възходящ и низходящ. Всеки от тях има своите предимства и недостатъци. Затова следва да се оценяват комплексно, като геомеханичната същност има своя приоритет. На фиг.4 е показана принципна схема за изземване на запасите при преминаване от подетажно обрушаване към камерно-целикова система на разработване.



Фиг. 4 Принципна схема за изземване на запасите при преминаване от подетажно обрушаване към камерно-целикова система на разработване.

Посочени са технологичните размери на основните конструктивни елементи. Отделните етажи се изземват в низходящ ред – една от възможните алтернативи. Тази постановка може да послужи за основа при съставяне на подходяща изчислителна схема по МКЕ. Нейно голямо предимство е, че могат да се съставят варианти въз основа на различните етапи на разработване: последователно преминаване от един етаж на друг, както и последователно запълване и изземване на първичните и вторични камери. Натрупаният опит от изследванията на НДС в рудник „Челопеч“ показва, че са налице няколко явления, които могат да се използват в бъдещи изследвания за намиране на ефективни решения.

- Липсва симетрия в разпределението на действащите напрежения около добивните камери. Това се дължи на голямата степен на нееднородност, заложен в изчислителните схеми при моделиране на средата: руден масив, странични скали, запълнение с различни механични свойства.

- На лице е съществено преразпределение на действащите напрежения при последователното изземване на камерите. Задължително условие е определянето на напреженията в ненарушения

масив, за да може реално да се оцени градиентът на тяхното изменение в периода на добивните работи.

- Установява се, че зоната на влияние на минните работи върху страничните скали достига до 10 m. Това означава, че носимоспособността на крепежните системи за нуждите на подготвителните изработки трябва да съответства на височината на този стълб. Практиката показва, че при такива минно-технически условия най-подходящи са въздени и стоманобетонни анкери. В тавана на добивните камери също се наблюдава ефект на разтоварване. В такъв случай устойчивостта на тавана на камерата (при определена ширина) основно се осигурява от взаимното заклиняване на структурните блокове.

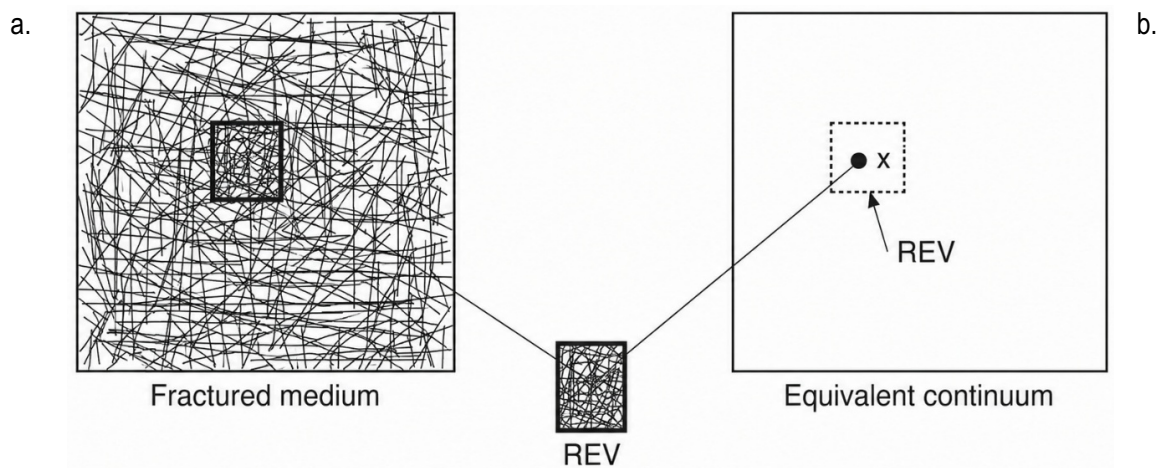
- При моделиране на едновременна работа на пет и повече камери не се забелязва оформяне на свод на естествено равновесие. Това се обяснява с обстоятелството, че при последователно изземване на първичните камери в тавана (за сметка на нееднородността) възникват предпоставки за различна коравина при деформиране, което довежда до различна податливост.

- Визуалните наблюдения показват, че при наличие на свръх високи камери възниква рязко влошаване на състоянието на стените им. То се дължи на прекомерно увеличената зона на разтоварване (вкл. зона на опънови напрежения), в която устойчивостта се обуславя единствено от взаимното заклиняване на отделните блокове, както и от задържащия ефект на запълнението. Този факт е предпоставка за възникване на аварии и силно затруднява прокарването на сондажите във вторичните камери.

Посочените до тук разсъждения показват, че прилагането на КЦС има две страни на разглеждане. От една страна е прекомерното увеличаване на геометричните размери на първичните камери, което води до увеличаване на интензивността на добива и до съществено намаляване на обедняването. От друга страна това е предпоставка за влошаване на равнището на техн. безопасност, възникване на трудности при пробиване на сондажите във вторичните камери, увеличаване на обедняването за сметка на обрушаване и смесване на рудата с части от втвърдяващото запълнение на първичните камери.

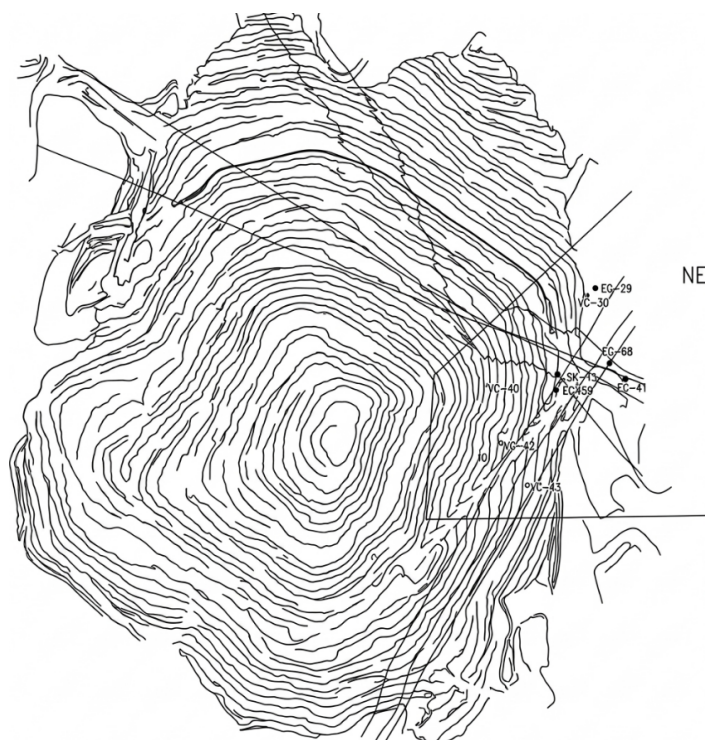
3. Оразмеряване на бариерен целик при преминаване от открити към подземни минни работи (група III.2)

Характерна особеност при оразмеряване на бариерен целик за разделяне на открити от подземни минни работи е неговото голямо площно разпространение. Съществено предимство е наличието на огромен обем от изходни данни за природните и минно-технически условия. Тяхната интерпретация обаче се затруднява от специфичните особености, които съпътстват подземния добив. На първо място това е влиянието на структурната нарушеност. Според известната класификация [4] съществуват четири групи тектонски нарушения. В първата група попадат крупните разломи с разстояние помежду им 5-10 km, а в последната – пукнатини с ширина около 1 mm и разпространение в границите на минните изработки. Практиката показва, че за нуждите на геомеханичния анализ върху устойчивостта на конструктивните елементи, най-съществено влияние оказват пукнатините от втори и трети порядък. Използвайки техните елементи на залягане и формирането на основните системи пукнатини, в границите на дадено руднично поле се изгражда блоковият модел. Най-голяма предимство в полза на бъдещи изследвания е възможността за постоянното му обогатяване с налични данни от момента на прокарване на първите проучвателни сондажи, през етапа на откритото разработване, до прокарване на първите разкриващи и подготвителни изработки в етапа на подземно разработване. На фиг. 5 а е показана принципна схема на реално напукана среда, която може да послужи като основа за изграждане на блоковия модел на находището [3]. Стремешът към максимално отчитане на реалната природна среда не изключва възможността за избор на Representative Elementary Volume (REV) – фиг. 5 б.



Фиг. 5 Схема на реално напукана среда a – fractured medium and equivalent continuum; b – Representative Elementary Volume (REV) (Jing and Stephansson).

Размерите на REV трябва да осигурят условието, че извън неговите граници влиянието на минните работи е пренебрежимо малко. На фиг.6 е показана схема на разломните структури в рудник Асарел [4].



Фиг. 6 Схема на разломните структури в рудник „Асарел“ (Кисъев Ан.).

С условието за 3D представяне, те са достатъчни за изграждане на блоков модел, свързан с оразмеряване на бариерен целик между открити и евентуални подземни работи. Аналогичен подход е използван за намиране на REV в условията на рудник „Кошава“ [2]. Целта на изследването е да се покаже наличието на аномалии в напрегнатото състояние на ненарушения масив, отчитайки дълбочината на разработване и главните тектонски линии. Обобщавайки практиката по изучаване на

напрегнатото състояние на ненарушения масив, се установява, че възможните аномалии се дължат главно на:

- Наличие на пресечен планински терен, който рязко изкривява представата за действие на геостатичния товар γH ;
- Съществуващите тектонски линии (разломи), които винаги са съпроводени с наличие на остатъчни напрежения;
- Очаквано преразпределение на действащите в масива напрежения в резултат на извършените вече открити минни работи.

В най-общ вид началните напрежения могат да се представят така

$$\sigma_{zz} = a_1 \gamma(H) + b_1$$

$$\sigma_{yy} = a_2 \mu_1 \gamma(H) + b_2$$

$$\sigma_{xx} = a_3 \mu_2 \gamma(H) + b_3$$

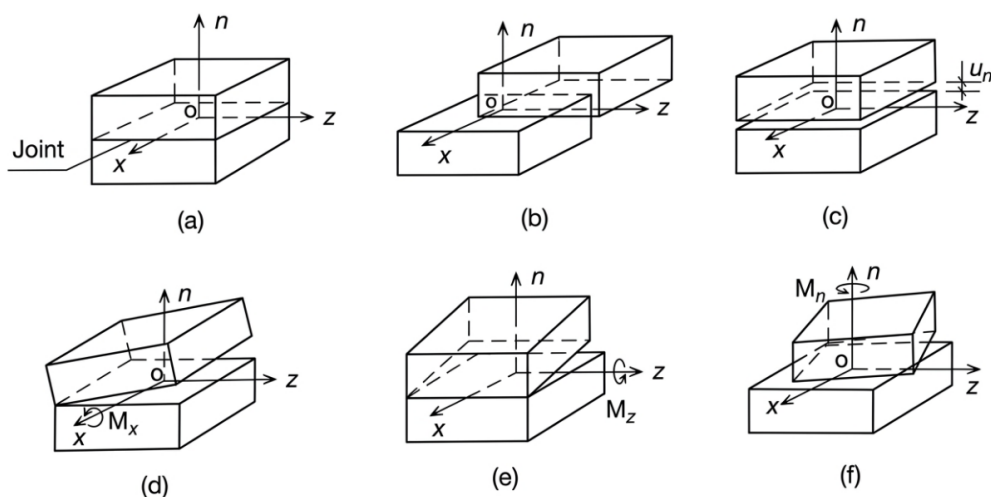
където a_1, a_2, a_3 са коефициентите пред геостатичния товар γH ;

b_1, b_2, b_3 – свободни членове;

μ_1, μ_2 – коефициентите на Poisson в две взаимно перпендикулярни посоки в хоризонталната равнина XOY.

В съвременни условия методологията за определяне на напреженията в масива е достигнала впечатляващо ниво на достоверност. Съществуват техники, които могат да се адаптират както към подземни, така и към открити условия.

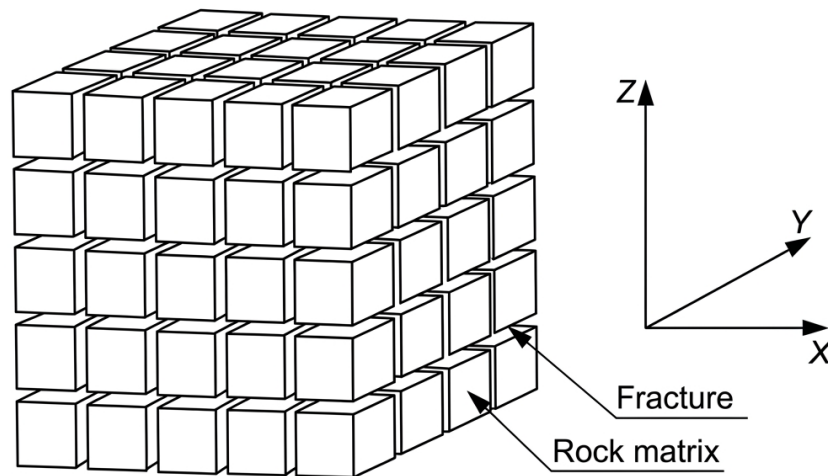
За оценка на влиянието на напукаността върху оразмеряване на бариерни целици между открити и подземни минни работи в настоящия параграф е потърсен друг подход. Той се основава на възможността за изграждане на дискретни модели, отчитайки влиянието на отделните пукнатини, статичната и динамична същност на поведението на формиралите се блокове при натоварване. Успешното създаване на REV до голяма степен решава проблема, но за да се достигне до реален резултат необходим за практиката, се изисква точно определяне на възможните степени на свобода в пространството, вкл. на границата с изземвания обем (откритото пространство). Следователно, ако първата стъпка е изграждане на глобален блоков модел, втората стъпка е съставяне на адекватен дискретен модел за изследване, то третата стъпка е определяне на възможните степени на свобода. На фиг.7 е показана принципна схема, характеризираща шестте степени на свобода в пространството [3].



Фиг. 7 Степени на свобода на пукнатините в пространството (Jing and Stephansson).

Чрез тях може да се определи поведението на реалния масив при натоварване, както и възможностите за неговото заздравяване. Съществува цяла поредица от параметри, характеризиращи състоянието на

пукнатините. Въз основа на тях са формулирани класификационните характеристики на качеството на масива. Те регламентират зависимостите между количествените и качествени значения на показателите и служат за своеобразен вход при съставяне на моделите. В тази връзка следва да се отбележи един много важен постулат. *В най-голяма степен разрушаването настъпва по съществуващите пукнатини, докато дялът на новообразуваните повърхнини е минимален (около 15%).* Отчитайки обстоятелството, че реалният скален масив се състои от 3-4 системи пукнатини, на преден план излиза проблемът за формата и големината на елементарния структурен блок, както и поведението му спрямо откритите пространства, създадени при прокарването на минните изработки. На фиг.8 е показан модел на масив, изграден от три системи пукнатини [3].



Фиг. 8 Скален масив, изграден от три системи ортогонално разположени пукнатини (Jing and Stephansson).

Макар че, може да се разглежда като частен случай, той представлява първа стъпка за съставяне на матричното уравнение, изразяващо зависимостта между напреженията $\{\sigma_{ij}\}$ и деформациите $\{\epsilon_{ij}\}$

$$\{\sigma_{ij}\} = [E_{ijkl}] \{\epsilon_{ij}\}$$

където $\{\sigma_{ij}\} = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}\}^T$

$\{\epsilon_{ij}\} = \{\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}\}^T$

$[E_{ijkl}]$ е матрицата на коравината на системата.

Членовете на матрицата $[E_{ijkl}]$ съдържат стойностите на модула на еластичност E и коефициента на Поасон μ в трите посоки на координатната система. Това налага използването на т.н. Матрица на Чеп. Чрез нея се определят независимите константи $[C_{ijkl}]$, като в сила е условието [3]

$$[C_{ijkl}] = [E_{ijkl}]^{-1}$$

Вариационният принцип, върху който се гради същността на числените методи, използвани в теорията на еластичността, изисква формиране на функционала Π на потенциалната енергия на деформациите

$$\Pi = \sum(U_i) + K + W \quad (4)$$

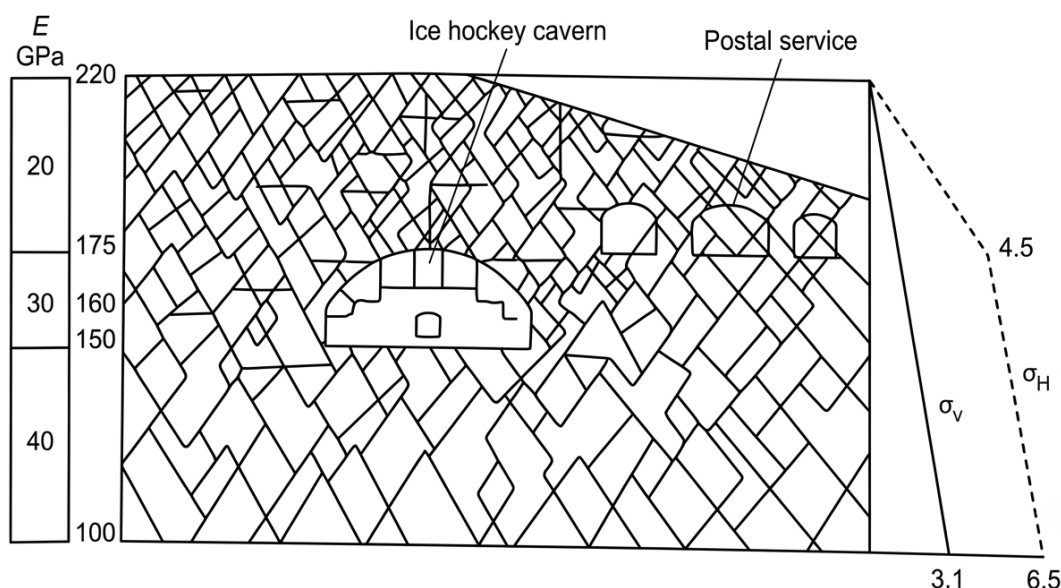
Чрез приравняване на нула на първата вариация спрямо компонентите на преместване се получава уравнението на баланса на общата потенциална енергия на деформациите

$$\frac{\partial \Pi}{\partial d} = [\sum \partial(U_i) + \partial K + \partial W] / \partial \{d\} = 0 \quad (5)$$

В изразите (4) и (5) са приети следните означения

- U1 - Potential energy due to deformation (strain energy);
- U2 - Potential energy due to external loads (work done by point forces);
- U3 - Potential energy due to bolting between blocks (works done by bolting forces);
- K - Kinetic energy due to block mass (kinetic energy due to inertia);
- U4 - Potential energy due to displacement constraints at boundaries (boundary) conditions;
- U5 - Potential energy due to blocks contacts (interaction between blocks);
- W - Dissipated energy in the system;
- $\vec{d} = \{d\}$ - Displacement vector.

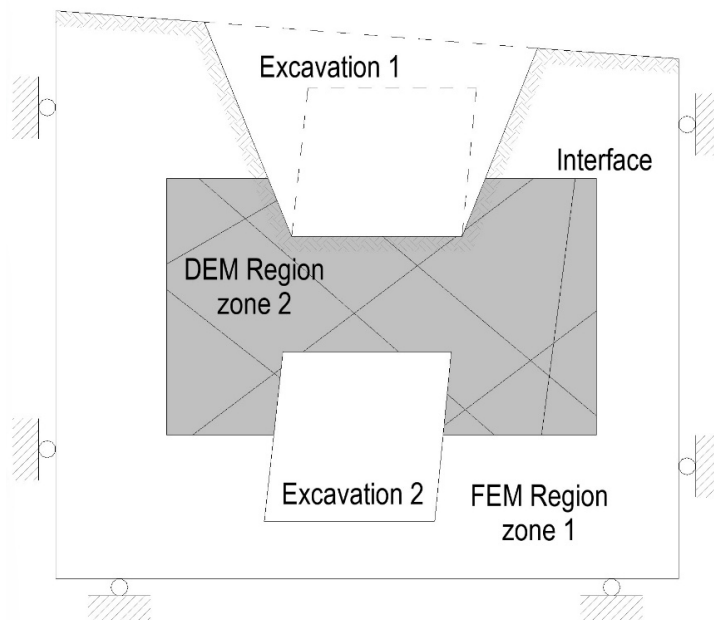
Така описаната теоретична постановка е намерила практическо приложение в множество знакови обекти по света. Един от тях е подземната зала в Lillehammer, построена за нуждите на Зимните олимпийски игри през 1994 год. в Норвегия. Нейните размери са ширина 62 m, дължина 91 m, височина 24 m, като светлият отвор надвишава 1300 m². На фиг.9 е показан блоковият модел на съоръжението.



Фиг. 9 Геометрия на пукнатините според Блоковия модел на Olympic Ice Hockey at Gjøvik-Norway (Jing and Stephansson).

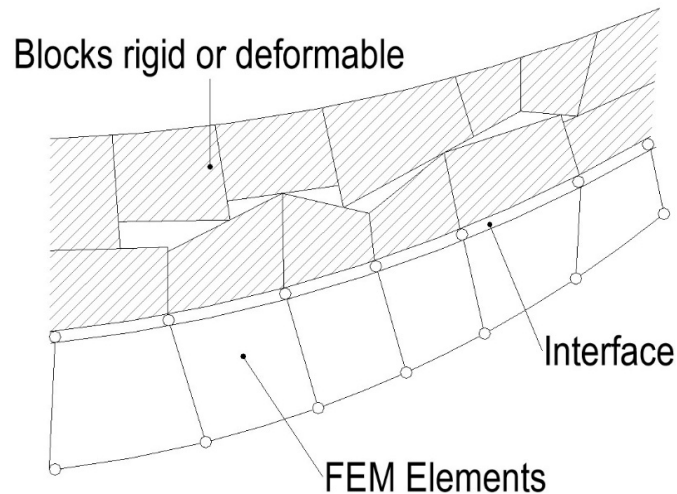
Сериозни технически постижения представляват: последователността на минните работи за оформяне на напречното сечение; закрепването на тавана с използване на комбинация от различни конструкции анкери; създаване на мрежа от изработки за мониторинг и контрол както по време на строителство, така и след това – по време на експлоатация.

Отчитайки специфичните особености на бариерния целик за изолиране на откритите от подземни минни работи, се предлага хибриден подход за неговото оразмеряване. Той се основава на едновременното използване на метода на крайните елементи (FEM) и метода на дискретните елементи (DEM). Графичното представяне на използвания модел е показано на фиг.10. В него са обособени две области. Област „Excavation 1“, съответстваща на откритите минни работи и област „Excavation 2“, съответстваща на подземни минни работи. Оформя се Interface между двете области. Същевременно, ясно се очертават зоните, в които решението на задачата се реализира по FEM и DEM. Зона 1, в която решението на задачата се търси по FEM чрез дискретизация на средата с подходящи четириъгълни елементи.



Фиг. 10 Изчислителна схема на хибридния модел, включващ FEM и DEM.

Зона 2, в която за дискретизация на средата се използват реално съществуващите тектонски нарушения и оформените блокове съгласно вече съставения блоков модел. В тази зона се прилага DEM. Между „Excavation 1“ и „Excavation 2“ се намира бариерният целик, чието НДС (заедно с прилежащите подземни минни изработки) е обект на анализ и оценка на устойчивото състояние. Реализацията на изчислителния процес при използване на така представения хибриден модел FEM-DEM е немислима без осигуряване на няколко ограничаващи условия. Тяхната същност се изяснява с помощта на фиг. 11.



Фиг. 11 Формиране на граничните условия при реализация на хибридния FEM - DEM модел (Jing and Stephansson).

- Ключовият момент е осигуряване на съвместимост на преместванията на границата между двете области (Excavation 1 и Excavation 2);
- На второ място векторът на силовото натоварване да удовлетворява условието за непрекъснатост между Excavation 1 и Excavation 2;

- На трето място осигуряване на непрекъснатост на преместванията и stress equilibrium на границата между Excavation 1 и Excavation 2 т.е. недопускане на разрив или приплъзване. Следва да се подчертае, че удовлетворяването на така формулираните ограничаващи условия е трудно реализуема задача. Практиката показва, че използването дори на изопараметрични четириъгълни елемента с осем възела не дават удовлетворителен резултат, тъй като „коравите блокове“ на DEM с равнинни стени са в конфликт с криволинейните елементи на МКЕ (вж. фиг. 11). Така представеният алгоритъм за прилагане на хибриден модел изисква създаване на програмна система с възможност за решаване на система алгебрични линейни уравнения със значителен брой неизвестни. Освен това, тя трябва да осигури използването на множество итерации с оглед удовлетворяване на граничните условия. Практиката показва, че най-сигурно условие за постигане на необходимата точност е решаване на тестови задачи, за които е известно точното аналитично решение, например гредостена, гредна на две опори, прътови конструкции.

Заклучение

Въпреки голямото многообразие на природните и минно-технически условия, рудодобивните технологии могат да се групират в четири групи. В третата група се предвижда комбинирано разработване – преминаване от открити към подземни минни работи, а в четвъртата група – промяна на добивната технология в подземния рудник по технико-икономически причини. И в двата случая се налага оставянето на бариерен целик за изолиране на принципно различни методи на изземване. Неговото оразмеряване е комплексна многопланова задача, която изисква съчетание на лабораторни, полу-промишлени и руднични изследвания.

- При определяне на оптималните параметри на КЦС решението се търси между две алтернативи. Увеличаването на размерите на първичните камери довежда до увеличаване на интензивността на добива и намаляване на първичното обедняване. Същевременно, рязко се влошава геомеханичното състояние на стените и тавана на камерите. Това е предпоставка за възникване на аварии при товарене и доставка. Освен това, възникват сериозни проблеми при пробиване на сондажите във вторичните камери и рязко увеличаване на обедняването за сметка на сеизмичния ефект и смесване на отбитата руда с запълнението на първичните камери..

- При изследване на НДС около конструктивните елементи на добивните технологии задължително условие е определянето на напреженията в ненарушения масив. Наличието на аномалии, както и причините за тяхното съществуване могат да се окажат решаващи при изучаване на динамиката и възможностите за ефективно противодействие през различните етапи на развитие на минните работи.

- В съвременни условия широко приложение за изучаване на НДС намират хибридните модели. Най-често се използва комбинация от числените методи FEM и DEM. Точността на получените решения зависят от стриктно спазване на граничните условия, непрекъснатост на преместванията, съвместимост на преместванията и силовите натоварвания на interface, определящ границата между двата метода, респ. отделните области.

- Ефективността от използване на дискретни модели в най-голяма степен зависи от осигуряването на три важни стъпки: изучаване на структурната нарушеност на масива, създаване на адекватен блоков модел, избор на възможните степени на свобода в изчислителните схеми. Бариерните целици са важно условие в ефективното приложение на рудодобивните технологии. Установява се, че е целесъобразно въвеждане на четвърта група в предлаганата класификация „Промяната на добивната технология в подземния рудник“, където ролята и значението на бариерния целик е непосредствено свързана с цялостното разработване на рудничното поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gray, I (2020) Rock Property Determination, Underground Mining Technology - J.Wesseloo (ed) Australian Center for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9876389-9-1.



2. Михайлов, Г.А. (2007) Научно-методологични основи на процедура за избор на оптимално технологично решение при подземно разработване на рудни находища. Хабилитационен труд за получаване на научно звание „Професор“. Минно-геоложки университет "Св.Иван Рилски".
3. Jing, L. and Stephansson, O. (2007) Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering. Theory and Application. Developments in Geotechnical Engineering, 85. Elsevier.
4. Турчанинов, И.А., Йофис, М.И., Каспарьян, Э.В. (1977) Основы механики горных пород. Ленинград, Недра.
5. Кисьов, А. (2026) Мерки за намаляване на поровото налягане в разломните зони в северо-източния и източния борд на рудник „Асарел“. Геология и минерални ресурси, кн.1, 2-9.
6. Михайлов, Г.А. (2022). Геомеханика на поддържащите целици при камерно-стълбова система на разработване. Proceedings of the X international Geomechanics Conference. 19-23 September 2022, Varna, Bulgaria.

APPLICATIONS OF NEURAL NETWORKS TO SLOPE STABILITY PREDICTION

Kremena Arsova - kremena.arsova@mgu.bg, Dimitar Kaykov

ABSTRACT

This study explores the application of neural networks to slope stability prediction. Monte Carlo simulation was used to generate representative examples of slope stability assessments. Iterative variations of the physical and mechanical properties of soil and rock masses were applied to determine the factor of safety, probability of failure, reliability index, and overall distribution of the factor of safety. The probabilistically generated dataset can be used to train neural network models capable of identifying complex nonlinear relationships between geotechnical parameters and slope stability outcomes. This approach enables faster stability assessment with minimal information loss. This in turn can support more reliable decision-making in probabilistic geotechnical engineering by accelerating the design stage.

Keywords: slope stability, multilayer perceptron, Bishop method, probability of failure, reliability index

1. Introduction

Managing geotechnical uncertainty and ensuring long-term structural reliability are broader concerns shared across geotechnical engineering, from meeting quality-management and regulatory requirements for the service life of reinforced concrete structures (Borisov et al., 2023) to safeguarding the durability of small-scale structural elements with significant impact, such as tunnel linings and portals, against corrosion (Borisov, 2025). Slope stability can also be considered an equally challenging area within this field of engineering, where maintaining a sufficient factor of safety and stability from possible failures is very important (Duncan, 2000). The problem is important for geotechnical engineering and appears when designing highway embankments, surface mine slopes, earth dams, as well as natural slopes influenced by rainfalls, seismic actions and human intervention. Conventional methods of slope stability are limit equilibrium methods where a failure surface of the mass is divided into several slices and the equilibrium of forces and moments is calculated to obtain the factor of safety. There are multiple limit equilibrium methods which have been developed during last decades but the Simplified Bishop method is still among the most commonly used ones due to its relative simplicity and the long time of validation on the basis of field case studies.

Deterministic slope stability analysis utilizes single best-estimate values of mechanical and physical properties of the soil or rock mass. It fails to consider natural variability of geotechnical parameters like cohesion, friction angle and unit weight. The variability results from natural heterogeneity of geological materials, limitations in field and laboratory testing and from spatial variability within the site. In order to overcome this limitation, probabilistic slope stability analysis makes use of input parameters as random variables with specific probability distribution and propagates uncertainty through slope stability analysis using Monte Carlo simulation method. The output of probabilistic analysis is a complete probability distribution of the factor of safety which makes it possible to derive the probability of failure and the reliability index.

Probabilistic slope stability analysis performed with Monte Carlo simulation method has the disadvantage of being computationally costly, especially when slope geometry and boundaries between lithological structures within the slope are complex. Moreover, deriving reliable estimate of the probability of failure, especially for low probabilities needed in engineering design, may require evaluating tens of thousands of individual limit equilibrium analyses. This becomes practically problematic when a probabilistic analysis needs to be run many times in case of multiple design options or when it is to be used as a part of an optimization/sensitivity analysis.

Artificial neural networks appear to be good candidates to solve this computational problem. Trained on representative Monte Carlo datasets, neural networks are able to approximate the nonlinear relationship between input geotechnical parameters and factor of safety and hence predict the factor of safety for new parameter sets at significantly lower computational cost than conventional limit equilibrium analysis. This study evaluates the potential of this technique. Multilayer perceptron networks of various architectures are trained on

a Monte Carlo generated dataset obtained using the Bishop Simplified method. Their performance is examined depending on network architecture and training sample size.

2. Background on Artificial Neural Networks in Slope Stability

Artificial neural networks are computational models that simulate the workings of biological nervous systems. They do not follow explicit programming instructions but learn the mapping between inputs and outputs from examples by adapting a large number of internal parameters known as weights. This capacity to learn complicated nonlinear mappings from data makes neural networks one of the cornerstones of modern machine learning (Goodfellow et al., 2016) and a growing area of application in geotechnics where relationships are highly nonlinear. Multilayer Perceptron is a classical feedforward neural network, consisting of input layer, one or more fully connected hidden layers with nonlinear activation functions and output layer. Multilayer Perceptrons are trained with backpropagation algorithm, which propagates the prediction error backwards through the network and updates the weights with the gradient descent (Rumelhart et al., 1986). One important theoretical result says that a multilayer perceptron with a single hidden layer and a sufficient number of neurons can approximate any continuous function with arbitrary accuracy, explaining why such networks are called universal approximators (Hornik et al., 1989). This property makes multilayer perceptron particularly suitable for the current study, which aims at approximation of the nonlinear mapping between the set of geotechnical input parameters and the factor of safety. The validation can afterward be performed on the estimated probability of failure and reliability index obtained from Monte Carlo simulation of the input parameter values from the actual slope stability analysis.

Because of this flexibility, multilayer perceptron is used wherever it is necessary to learn a nonlinear mapping between numerical features and some target quantity from the data. Their applications for slope stability prediction has been developed since early 2000s, motivated by the same computational problem addressed in this research. Among the first researchers who demonstrated that backpropagation neural networks can estimate the factor of safety and stability of slopes with accuracy similar to conventional limit equilibrium analysis were Sakellariou and Ferentinou (2005). Extending this approach Choobbasti et al. (2009) and Das et al. (2011) applied multilayer perceptron and differential evolution based neural networks respectively for classification of slopes and prediction of factor of safety, while Manouchehrian et al. (2014) combined genetic algorithms with slope stability models to find critical slip surfaces. More recently, Suman et al. (2016) compared the performance of several artificial intelligence approaches including neural networks, support vector machines and ensemble methods and found that data driven models have good predictive accuracy once they are trained on sufficiently informative dataset. One common feature in this line of research is that the model performance is highly dependent on the quality and informativeness of the training dataset, thus making the idea of combining neural networks with Monte Carlo simulation used in the current research relevant, as the network is trained on the same probabilistic space, where reliability analysis is performed.

3. Methodology

The dataset used to train and evaluate the neural network models was generated by Monte Carlo simulation of slope stability, using the Simplified Bishop limit equilibrium formulation. The method discretizes the sliding mass into vertical slices and performs force and moment equilibrium analysis along a trial slip surface to compute a factor of safety, assuming horizontal interslice forces and satisfying the moment equilibrium about the center of the circular slip surface (Bishop, 1955).

The Monte Carlo datasets used to train the neural network models in this study were generated from a benchmark single slope cross-section (Slide 2), comprising the following geotechnical units: a weathered sandy-silt unit (MH weathered A), an underlying weathered silty-sand unit (M weathered A), and a deeper Upper Marine Sediment unit. For each unit, cohesion and the angle of internal friction were treated as normally distributed random variables, with the mean, standard deviation, and relative minimum and maximum truncation limits summarised in Table 1. Within each material, cohesion and friction angle were sampled as a correlated pair rather than independently, reflecting the physical tendency of shear strength parameters

derived from the same soil unit to co-vary. Monte Carlo sampling and stability analysis was compared for efficiency, requiring a comparable computation time of approximately 127 seconds to generate the 1000 simulation results.

Table 1. Geotechnical input parameters and probability distributions for the case study slope

Material	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max	Correlation
MH weathered A	Cohesion (kPa)	Normal	8	2	6	6	Correlated with Phi (same material): $r=-0.5$
MH weathered A	Phi (°)	Normal	34	3	10	10	Correlated with Cohesion (same material): $r=-0.5$
M weathered A	Phi (°)	Normal	24	3	9	9	Correlated with Cohesion (same material): $r=-0.5$
M weathered A	Cohesion (kPa)	Normal	7	2	6	6	Correlated with Phi (same material): $r=-0.5$
Upper Marine Sediment	Phi (°)	Normal	17	2	6	6	Correlated with Cohesion (same material): $r=-0.5$
Upper Marine Sediment	Cohesion (kPa)	Normal	4	1	3	3	Correlated with Phi (same material): $r=-0.5$

The governing physical and mechanical properties of the soil mass such as cohesion, angle of internal friction, and unit weight together with the slope geometry were considered as random variables, described by representative probability distributions, instead of fixed deterministic values. In each Monte Carlo realisation, a value was sampled independently for every random variable, the factor of safety was calculated using the limit equilibrium equations of the method under study with the software Rocscience Slide 2. The process was repeated 1000 times, so as to create the complete simulated distribution of the factor of safety. The probability of failure was calculated as the ratio of the number of realisations with a factor of safety below 1 to the total number of realisations, while the reliability index was calculated under the assumption that the factor of safety follows either a normal or log-normal distribution.

The output of the Monte Carlo procedure therefore included a large set of input-output data for the Bishop Simplified method, which served as the basis for the dataset used to train and test neural network models.

Multilayer perceptron networks were trained on the dataset. Three different network architectures were considered: 4-3-2, 5-4 and 5-4-3, where each number indicates the number of neurons in consecutive layers of the network. For every architecture, four training sample sizes were considered: 50, 100, 250 and 500 examples from the dataset, so that the effect of training data size on the quality of the approximation can be identified and the point of diminishing returns can be found.

Training was performed using backpropagation with gradient-based optimisation, minimising the mean squared error (MSE) between the predicted and simulated values of output parameters on a part of each dataset, reserved for testing. Model performance was then evaluated on testing data set, using R^2 , the mean absolute error (MAE) and the root mean squared error (RMSE). Besides those accuracy measures, the time taken to train the network and to perform predictions was measured in order to quantify computational efficiency gain achieved by the use of the trained neural network instead of the repeated Monte Carlo procedure.

4. Results

Figure 1 presents the probabilistic slope stability results obtained for this cross-section, the minimum factor of safety and the critical slip surface superimposed on the slope geometry. The deterministic factor of safety for the critical surface was 1.188, closely matched by a mean simulated factor of safety of 1.190, indicating that the probabilistic analysis is well-centred on the deterministic solution. The resulting probability of failure was 2.900%, corresponding to a reliability index of 1.840 under a normal distribution assumption and 1.966 under a lognormal distribution assumption for the factor of safety. These outputs, together with the full simulated distribution of the factor of safety, constitute the target values used to train and evaluate the neural network models discussed in Section 5.

Table 2 summarises the results of experiments conducted to evaluate the multilayer perceptron models trained on the Bishop Simplified Monte Carlo dataset. Predictive performance significantly increases when the training sample size grows from 50 to 500 examples. R^2 increases from approximately 0.96 to over 0.99, and both MAE and RMSE values decrease accordingly. The increase is the largest between 50 and 100 examples of training data and becomes progressively smaller as the training sample size increases, showing that the point of diminishing returns is reached when the sample size exceeds approximately 250 examples. This means that the underlying input-output mapping can be efficiently approximated by a relatively compact neural network, and increasing the training sample size appears to be more effective way of improving prediction accuracy than the increase in depth or width of the architecture. The deeper 5-4-3 architecture does not consistently show advantages over the shallower 5-4 configuration, and sometimes shows worse performance, which is in accordance with low dimensionality and relative simplicity of the mapping being approximated.

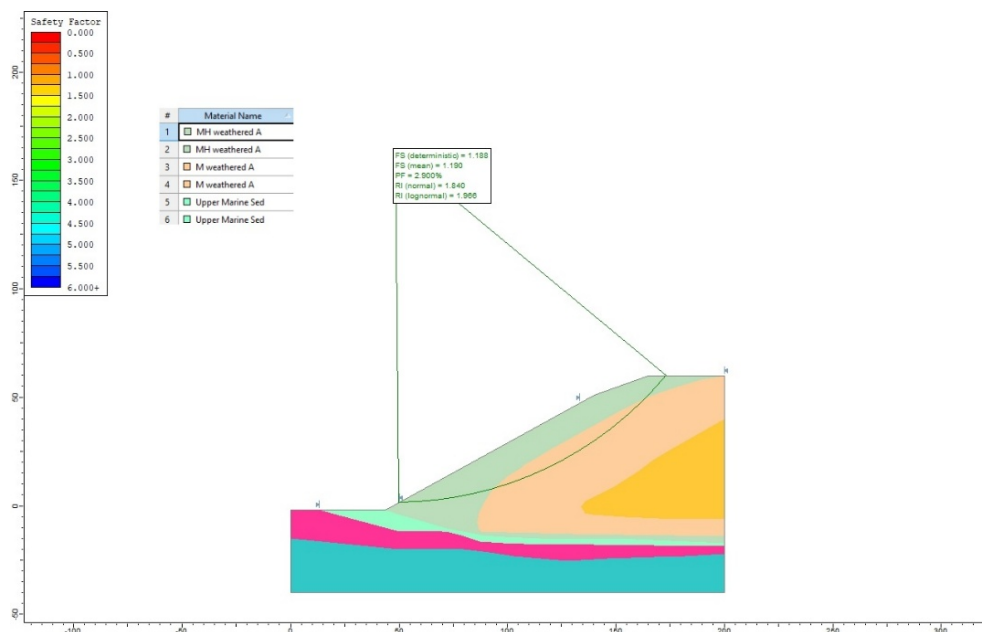


Figure 1. Monte Carlo probabilistic slope stability analysis of the case study cross-section and critical slip surface (FS deterministic = 1.188; FS mean = 1.190; PF = 2.900%; RI normal = 1.840; RI lognormal = 1.966).

In terms of training times, there is an insignificant increase in the training time as a function of the sample size, which does not exceed 0.32 seconds for any of the architecture and sample size combinations considered. Also, the inference time does not significantly depend on the sample size and architecture after training and stays below 1.5 milliseconds per inference. This verifies the basic hypothesis, underlying the usage of neural networks in this case, which states that a properly trained model is able to deliver predictions regarding slope stability several orders of magnitude faster than Monte Carlo simulation and conventional analysis.

Table 2. Neural network performance metrics (Bishop Simplified method dataset)

Architecture – Sample size	R ²	MAE	RMSE	Probability of failure (%)	Reliability index (normal)	Reliability index (lognormal)	Training time (s)	Inference time (s)
4-3-2 – 50	0.9575	0.01305	0.02081	2.34	1.987	2.123	0.0705	7.84×10^{-4}
4-3-2 – 100	0.9919	0.00587	0.00900	3.84	1.769	1.876	0.1208	1.13×10^{-3}
4-3-2 – 250	0.9979	0.00315	0.00463	3.92	1.760	1.869	0.2856	9.69×10^{-4}
4-3-2 – 500	0.9947	0.00434	0.00728	3.85	1.768	1.877	0.2766	9.59×10^{-4}
5-4 – 50	0.9858	0.00829	0.01201	3.59	1.801	1.912	0.1539	7.24×10^{-4}
5-4 – 100	0.9979	0.00307	0.00462	3.85	1.769	1.877	0.1846	1.07×10^{-3}
5-4 – 250	0.9977	0.00292	0.00486	3.90	1.762	1.871	0.2669	1.30×10^{-3}
5-4 – 500	0.9981	0.00244	0.00440	3.84	1.769	1.878	0.2963	5.23×10^{-4}
5-4-3 – 50	0.9751	0.00969	0.01592	3.03	1.876	1.996	0.1770	1.20×10^{-3}
5-4-3 – 100	0.9870	0.00763	0.01143	3.61	1.798	1.909	0.2469	1.10×10^{-3}
5-4-3 – 250	0.9977	0.00308	0.00487	3.83	1.770	1.880	0.2877	1.11×10^{-3}
5-4-3 – 500	0.9978	0.00287	0.00464	3.88	1.764	1.873	0.3175	1.15×10^{-3}

Along with numerical estimates of the model's accuracy given in Table 2, a kernel density estimate plot of the simulated and network predicted distributions of the factor of safety helps us to assess the quality of the reproduction of the probability distribution shape apart from only the point prediction values. Figure 1 presents the plot for the Bishop Simplified case.

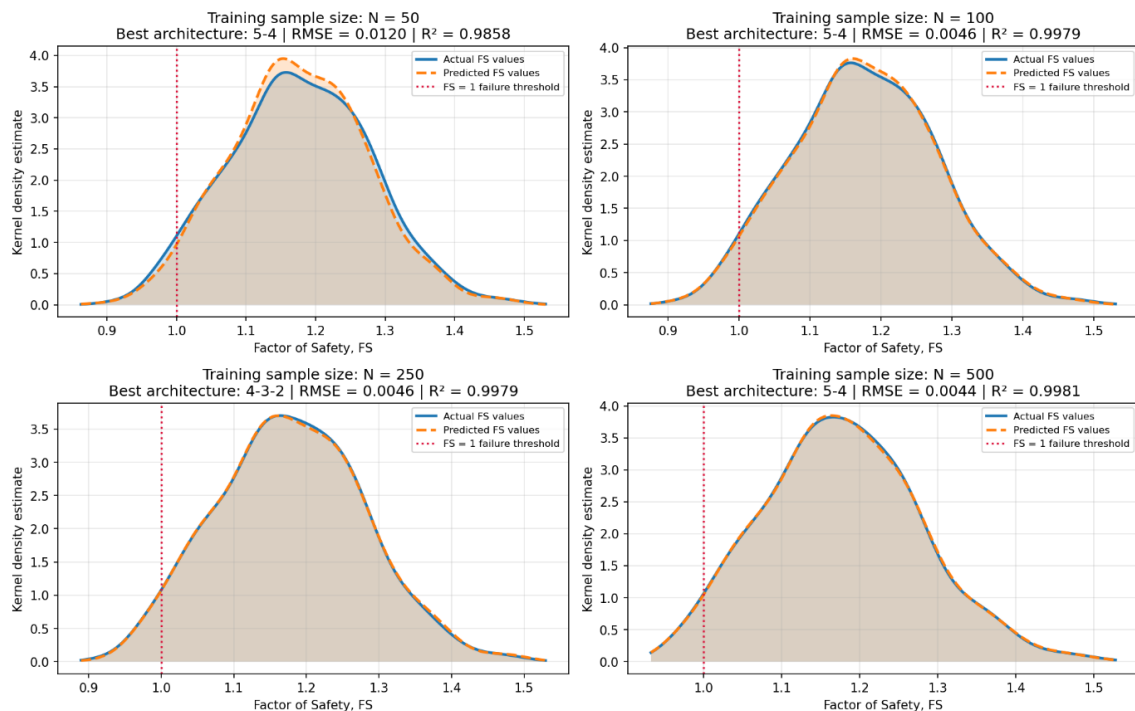


Figure 1. Kernel density estimate of the factor of safety distribution (simulated vs. predicted by Bishop Simplified method)

5. Discussion

It appears that neural network models trained on relatively small number of Monte Carlo samples, as little as 100-250 cases, are capable of replicating the output of a fully probabilistic slope stability analysis with relatively high fidelity for the widely used Simplified Bishop limit equilibrium method. It is a favorable result, supporting engineering effort and it means that the time-consuming stage of producing a Monte Carlo sample needs to be done just once and even on a smaller sample size before the surrogate model will be created. The network trained on the method faithfully reproduces the inherent bias of that particular method without correcting it, thus the surrogate model should be seen as an acceleration tool of the selected probabilistic analysis method and not as a replacement of engineering judgement based on a full-scale stability analysis.

The nearly constant, sub-millisecond inference time regardless of the architecture combination and sample size is perhaps the most important result of this work. This implies that once trained, these models may be integrated into any interactive design tool, real time monitoring system or large-scale parametric analysis of different slope geometries, without the need for computation of numerous Monte Carlo simulations in the process. This property may prove especially useful in probabilistic design, where the factor of safety needs to be recalculated multiple times with different combinations of parameters, load cases or design options.

There are several limitations to the present study worth noting, however. The datasets used to train and test the networks were generated for a single slope geometry and a fixed set of assumed probability distributions for the input parameters. Generalisation to other geometries or parameter ranges would require retraining, or an expanded and more diverse dataset. The analysis was also restricted to a single simplified limit equilibrium formulation, the Simplified Bishop method, and did not extend to other methods such as Spencer's method or the Morgenstern-Price method, nor was the surrogate model validated against field monitoring data or documented slope failures. In the future, the scope of the presented methodology needs to be extended by considering a wider variety of slope configurations and parameters' distribution. Moreover, another method of sampling, which focuses on the tail end of the factor of safety distribution, needs to be considered for improving accuracy and performance of the neural network with respect to relatively smaller amount of simulations and in turn training sample size.

6. Conclusion

This study investigated the possibilities of application of neural networks for slope stability prediction based on Monte Carlo simulation generating a representative probabilistic dataset using the Simplified Bishop limit equilibrium formulation. Multilayer perceptron neural networks of different architectures, trained using 50 to 500 samples, achieved close approximations of the factor of safety, probability of failure and reliability index obtained from Monte Carlo simulation.

The accuracy of approximation improved with the increase in training sample size. The differences between the structures used were not significant, indicating that a reasonably sized and trained neural network is adequate enough to describe the nonlinear behavior between geotechnical variables and the slope stability performance. Training time remained low regardless of configuration, and the inference time was consistently sub-millisecond, hence, faster than direct Monte Carlo evaluation.

Firstly, it is important to note that the prediction obtained through a neural network is different from the result derived using the Monte Carlo technique since some residual errors will always exist even with very large sample sizes when MAE and RMSE have non-zero values and the coefficient of determination is not equal to one. This implies that the surrogate model may be considered as a complete substitute to perform a complete probabilistic analysis for design verification purposes. On the contrary, the results demonstrate the suitability of this method as a fast and accurate approximation tool to be used in slope design at an early stage where it can be used to filter out design options, make a preliminary parameter selection and detect cases where further probabilistic analysis must be done before performing the Monte Carlo simulation for final design confirmation. In addition, the fact that the reliability index value predicted by the neural network always resembles the behavior of the limit equilibrium model shows that the properties of the model are reproduced but not ideally improved by the surrogate for the amount of data utilized. This limitation is due to the

underrepresentation of the left-hand tail of the factor of safety distribution in the training data, where the small number of failures limits the ability of the surrogate model to improve predictions of the reliability index.

References

1. Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*, 5(1), 7–17.
2. Borisov, B. (2025). Durability, corrosion risks and prevention of tunnel linings and portals (in Bulgarian). *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski,"* 68, 134–138. ISSN 2738-8808 (print), ISSN 2738-8816 (online).
3. Borisov, B., Balev, V., & Pavlov, P. (2023). Principles of the contemporary approach for ensuring the service life of underground reinforced concrete structures (in Bulgarian). *Proceedings of the International Conference "Innovative Architectural, Structural and Technical Solutions in Metro Construction,"* dedicated to the 25th anniversary of the Sofia Metro, 26–27 January 2023, Sofia, ISBN 978-619-90939-9-3, pp. 49–59.
4. Choobbasti, A. J., Farrokhzad, F., & Barari, A. (2009). Prediction of slope stability using artificial neural network (case study: Noabad, Mazandaran, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 2(4), 311–319.
5. Das, S. K., Biswal, R. K., Sivakugan, N., & Das, B. (2011). Classification of slopes and prediction of factor of safety using differential evolution neural networks. *Environmental Earth Sciences*, 64(1), 201–210.
6. Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307–316.
7. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press, Cambridge, MA.
8. Hornik, K., Stinchcombe, M., & White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, 2(5), 359–366.
9. Manouchehrian, A., Gholamnejad, J., & Sharifzadeh, M. (2014). Development of a model for analysis of slope stability for circular mode failure using genetic algorithm. *Environmental Earth Sciences*, 71(3), 1267–1277.
10. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323, 533–536.
11. Sakellariou, M. G., & Ferentinou, M. D. (2005). A study of slope stability prediction using neural networks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23(4), 419–445.
12. Suman, S., Khan, S. Z., Das, S. K., & Chand, S. K. (2016). Slope stability analysis using artificial intelligence techniques. *Natural Hazards*, 84(2), 727–748.

ХВОСТОХРАНИЛИЩАТА В БЪЛГАРИЯ: ИСТОРИЧЕСКО РАЗВИТИЕ, ТЕХНОЛОГИИ НА ИЗГРАЖДАНЕ И ЗНАЧЕНИЕ НА СТРУКТУРАТА НА ХВОСТА ЗА ОЦЕНКАТА НА ВТЕЧНЯВАНЕТО

Момчил Бояджиев¹ и Николай Милев²

¹ Докторант – Катедра „Геотехника“, Университет по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ), бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, България, mgboyadzhiev@abv.bg

² Доцент – Катедра „Геотехника“, Университет по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ), бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, България, milev_fte@uacg.bg

РЕЗЮМЕ

Хвостохранилищата в България се проектират и изграждат в продължение на десетилетия за осигуряване на нуждите на минно-добивния сектор. Паралелно с активните съоръжения съществуват и множество изведени от експлоатация – независимо дали рекултивирани или не, преустановяването на депонирането на отпадъка не изключва наличието на геотехнически опасности, особено при сеизмично въздействие. Различните технологии на депониране, последователността на надграждане и оперативното управление на съоръженията са формирали пространствено нееднородни хвостови масиви, чиято структура отразява хронологията на тяхната експлоатация. Докладът проследява развитието на българските хвостохранилища чрез примери за тяхното изграждане, експлоатация, технологични промени, аварии и реконструкции. Хидравличното намяване е разгледано във връзка със зърнометричната зоналност, слоестостта, лещовидните включения и филтрационната анизотропия. Състоянието на хвоста (плътност, коефициент на порите и ефективни напрежения) е разграничено от структурата, формирана от начина на отлагане, контактите между частиците, стареенето и потенциалната циментация. Тези фактори влияят върху „рохкото“ или „сбитото“ реагиране, генерирането на порен натиск и склонността към статично и динамично втечняване. Инженерната практика за установяване на структурния ефект съчетава архивни данни, полеви и геофизични изследвания и лабораторни изпитвания.

Ключови думи: хвостохранилища, България, технологии на изграждане, хидравлично намяване, структура на хвоста, втечняване

TAILINGS STORAGE FACILITIES IN BULGARIA: HISTORICAL DEVELOPMENT, CONSTRUCTION TECHNOLOGIES AND THE SIGNIFICANCE OF TAILINGS FABRIC FOR LIQUEFACTION ASSESSMENT

Momchil Boyadzhiev¹ and Nikolay Milev²

¹ PhD Student – Department of Geotechnics, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1 Hristo Smirnenski Blvd., Sofia 1046, Bulgaria; mgboyadzhiev@abv.bg

² Associate Professor – Department of Geotechnics, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1 Hristo Smirnenski Blvd., Sofia 1046, Bulgaria; milev_fte@uacg.bg

ABSTRACT

Tailings storage facilities (TSFs) in Bulgaria have been designed and constructed over decades to fulfill the needs of the mining sector. In parallel with active facilities, numerous TSF have been decommissioned—whether reclaimed or not—where the cessation of tailings deposition does not preclude the presence of geotechnical hazards, particularly under seismic impact. Different deposition technologies, raising sequences and operational practices have produced spatially heterogeneous tailings deposits whose fabric reflects their construction history. The paper traces the development of Bulgarian tailings storage facilities through examples of their construction, operational events, technological changes, failures and reconstructions.

Hydraulic deposition is discussed in relation to grain-size zonation, stratification, lenticular inclusions and hydraulic anisotropy. The state of the tailings, described by density, void ratio and effective stresses, is distinguished from their fabric, which is governed by the mode of deposition, particle contacts, ageing and possible cementation. These factors influence contractive or dilative response, pore-pressure generation and susceptibility to static and dynamic liquefaction. In engineering practice, fabric effects are assessed by combining archival records, field and geophysical investigations, and laboratory testing.

Key words: *tailings storage facilities, Bulgaria, construction technologies, hydraulic deposition, tailings fabric, liquefaction*

ВЪВЕДЕНИЕ

Хвостът е отпадният продукт след преработката и обогатяването на рудата, съставен основно от фино натрошени и смлени скали, който обикновено се транспортира по хидравличен способ под формата на пулп, съдържащ технологични води и остатъчни реагенти. Хвостохранилищата са хидротехнически съоръжения за приемане, утаяване и дългосрочно съхранение на този материал, както и за управление на контактните води. В зависимост от прилаганата технология минните отпадъци могат да бъдат депонирани като пулп, в сгъстено състояние, или след предварително обезводняване. При конвенционалното хидравлично наливане той се подава по напорни тръбопроводи и се депонира от последователно премествани изтичала, при което се формират плажна зона и утаечно езеро.

За разлика от земно-наситните язовирни стени, които обикновено се изграждат по предварително определена конструктивна схема, хвостохранилището се развива поетапно, заедно с експлоатацията на производственото предприятие. Ограждащите стени се надграждат последователно, местата на заустване и положението на утаечното езеро се изменят в течение на времето, а характеристиките на постъпващия хвост могат да се изменят в резултат на развитието на добива и технологията на преработване. Така съществуващият масив е резултат не само от проектните решения, но и от многогодишната експлоатационна история. Проектирането, експлоатацията, геотехническото характеризирание и консервацията са свързани етапи от развитието на едно отпадъкохранилище [5].

В България хвостохранилища се изграждат и експлоатират при различни технологични режими, а наличната техническа документация за отделните обекти е с нееднаква пълнота. Промените в добива, обогатяването и управлението на водите са оставили различен отпечатък върху геометрията и вътрешния строеж на хвостовите масиви. Хронологичната информация е необходима, за възстановяване действителните условия на формиране и последващо поведение на масивите.

Подбраните примери илюстрират влиянието на технологията на депониране върху вътрешния строеж на масива и склонността му към статично и динамично втечняване. Архивните и технологичните данни служат за база при планирането и интерпретацията на полевите, геофизичните и лабораторните изследвания.

ХВОСТОХРАНИЛИЩАТА В БЪЛГАРИЯ – РАЗВИТИЕ, СТАТУС И СЕЛЕКТИРАНИ ПРИМЕРИ

- Развитие и експлоатационен статус

Развитието на хвостохранилищата в България е свързано главно с добива и обогатяването на медни, медно-златни и оловно-цинкови руди. Част от съоръженията са надградени и експлоатирани в продължение на десетилетия, като с развитието на добива и технологиите са изменяни технологията на депониране, конструкцията на ограждащите стени, дренажните системи и режимът на управление на водите.

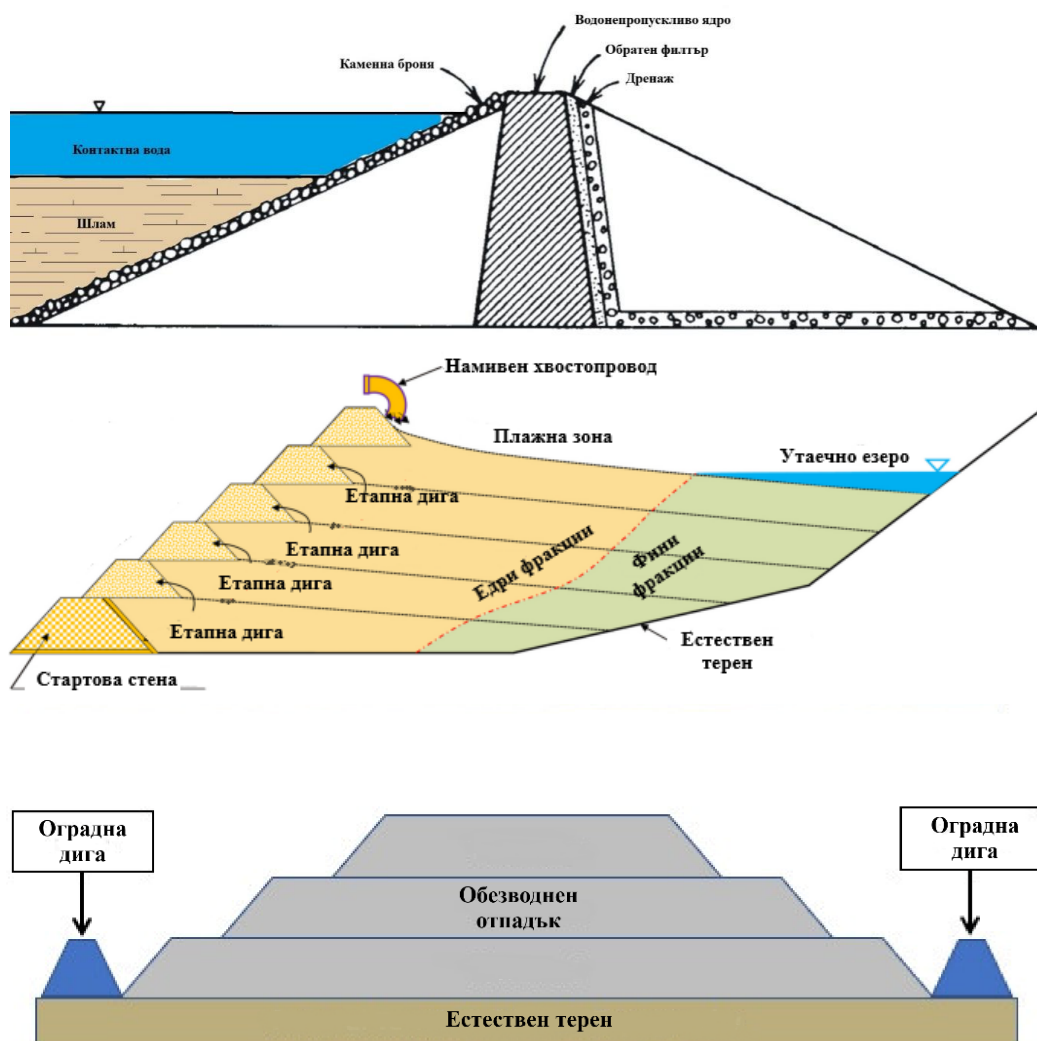
По данни на МОСВ към 2010 г. в страната са отчетени 33 хвостохранилища, от които 12 действащи и 21 спрени от експлоатация и рекултивирани [18]. Данните са исторически и не представляват актуален регистър, но показват броя и разнообразието на съоръженията.

Експлоатационният статус на съоръжението има пряко влияние върху неговите геотехнически характеристики. При активни съоръжения депонирането и надграждането изменят геометрията, напрегнатото състояние и филтрационния режим. При изведени от експлоатация съоръжения протичат

процеси на консолидация и филтрация през масива и основата, въздействия от повърхностни води и стареене на дренажните системи. Рекултивационният слой подобрява повърхностните условия, но сам по себе си не гарантира благоприятно състояние на хвоста в дълбочина. При съществуващи съоръжения е необходимо да бъдат възстановени етапите на надграждане и намяване, действителното водно ниво и надеждността на дренажната система [5].

- Технологии на депониране и надграждане

Технологията на депониране трябва да бъде разграничавана от схемата на надграждане. Основните технологии включват наливане зад преградна стена от язовирен тип изградена от външни строителни материали, хидравлично намяване и депониране след предварително обезводняване, докато класическите схеми на надграждане са нагоре по течението, надолу по течението и по централната ос [5, 6].



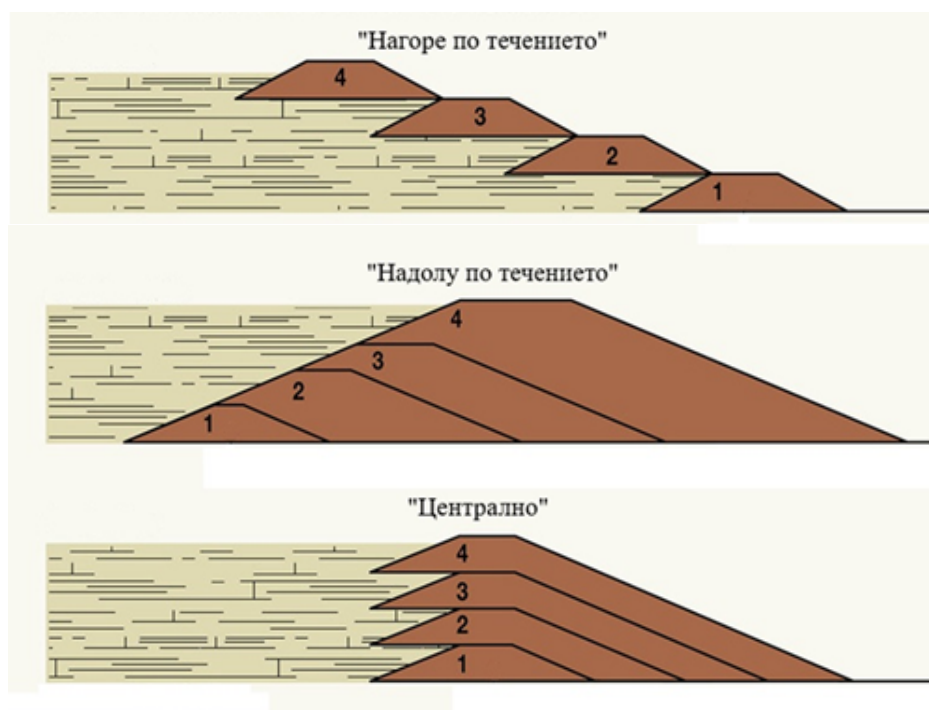
Фиг. 1. Принципи схеми на депониране на хвоста: а) наливен тип (горе) б) намивен тип (средя); в) сухо депониране (долу). Адаптирано от: [2,9,14]

Депонирането зад предварително изградена оградаща стена се осъществява в басейн, оформен чрез земнонасыпна или каменнонасыпна конструкция от външни материали. Хвостът се задържа в чашата и не изпълнява основна конструктивна функция в стената. Този тип стена позволява контрол върху състава и уплътняването на оградащото съоръжение, но изисква значителни

количества строителни материали. Задържаният хвост може да остане водонаситен и рохък независимо от типа на стената.

Хидравличното намиване позволява непрекъснато транспортиране и депониране на хвоста под формата на пулп. Материалът се подава от намивни изтичала, разположени по короната на съоръжението. По-едри фракции се отлагат в близост до изтичалата и формират плажната зона, докато по-фините частици достигат опашката на съоръжението, където се формира утаечното езеро и се събират технологичните води. Вътрешният строеж на масива зависи от зърнометричния състав и концентрацията на пулпа, дебита, местата на заустване, дължината на плажа, положението на езерото и действието на дренажната система. Периодичното преместване на изтичалата и измененията в режима на работа допълнително усложняват пространственото разпределение на материала [5, 6].

Предварително обезводненият хвост се транспортира, разстила на пластове и, когато технологията го предвижда, се уплътнява. Намаленото водно съдържание и контролираното полагане могат да подобрят плътността, отводняването и механичното поведение на насипа. Самата технология не изключва втечняване; значение имат достигнатата плътност, степента на водонасищане и качеството на изпълнение. Принципи схем на намивно и сухо депониране на хвоста са представени на Фигура 1.



Фиг. 2. Основни схеми за надграждане на хвостохранилища: нагоре по течението (горе); б) надолу по течението (среда); по централната ос (долу). Адаптирано от [15]

Надграждането на оградящите стени се изпълнява основно по една от следните схеми:

- **Нагоре по течението:** всяка следваща дига се измества към хвостовия масив и се изгражда частично или изцяло върху по-рано депониран материал. Необходимият обем насип е относително минимален, но общата устойчивост зависи в голяма степен от състоянието на предшестващите отложения, нивото на депресионната повърхност, наличието и ефективността на дренажната система;
- **Надолу по течението:** всеки следващ етап се развиват в посока към въздушния откос и обикновено се изграждат върху контролирано положени материали. Тази схема изисква значително по-големи обеми от насип и площ, но намалява зависимостта на оградящата конструкция от състоянието на намитият хвост;

- **Централно надграждане:** короната се запазва приблизително по първоначалната ос, като отделните етапи се развиват едновременно навътре и навън. По необходимия обем материали и степента на зависимост от депонирания хвост схемата заема междинно положение.

Основните схеми на надграждане са представени на Фигура 2. Технологиите на депониране и схемата на надграждане определят условията на отлагане, натоварване и дрениране, чрез които се формират състоянието, структурата и пространствената изменчивост на хвостовия масив.

- Селектирани случаи, технологични решения и реконструкции

Следващите примери представят различни етапи от развитието на български хвостохранилища – от аварийни събития и особености на геоложката основа до промени в технологията на депониране, инженерни решения, реконструкции и дългосрочно управление на съоръженията.

- **„Плакалница–Згориград“:** На 1 май 1966 г. разрушаването на хвостохранилището над с. Згориград предизвиква бързо разпространяващ се поток от вода и хвост с тежки последствия по долината. Освободеният обем е оценен на около 450 000 m³ [13]. Аварията е сред най-тежките събития, свързани с хвостохранилища в България. Ограничената техническа документация не позволява механизмът да бъде определен еднозначно, но наличните данни сочат за катастрофална загуба на устойчивост и мобилизиране на механизъм на разрушение, който е обвързан с водонаситения хвост;
- **Комплекс „Лъки-2“:** През януари 2011 г. в чашата на хвостохранилище Комплекс „Лъки-2“ пропада карстова кухня, вследствие на което хвостът е увлечен през естествени подземни колектори, а замърсяването достига последователно реките Юговска и Чепеларска [19]. Към момента на инцидента съоръжението не се използва за текущо депониране, но съдържа хвост от предходна експлоатация. Районът е карстов, а сходен инцидент е регистриран около две години по-рано. В отговор са предвидени тампониране на пропадането и продължаване на програмата за противофилтрационни мероприятия с цел ограничаване на филтрацията през карстовата основа и предотвратяване на повторно увличане на хвост;
- **„Люляковица“:** Съоръжението е изградено в чашата на кариера „Люляковица“ и се развива поетапно с използване на депонирания хвост. По данни от техническата документация в него са складиран над 333,10⁶ m³ хвост, а основната стена достига приблизителна височина 200 m и дължина 2 500 m. Първоначално е изпълнена каменнонасипна стена с кота на короната +722.7 m, впоследствие наградена с каменен насип до +750.0 m. До кота +793.0 m надграждането е извършвано с циклонирания хвост, а над нея – чрез директно наливане по плажа, без предварително хидроциклонирание. При развитието до кота +900.00 m са разглеждани инженерни мероприятия за управление на порния натиск, включително направляващи диги и вертикални сондажи, запълнени с едър хвост. За съоръжението е разработена комплексна програма за геотехническо характеризиране, съчетаваща полеви, геофизични и лабораторни изследвания за оценка на статичното и динамичното втечняване, дефиниране на критичното състояние и отчитане на структурата на хвоста [17]. Различните технологии на депониране и етапи на надграждане са отчетени при планирането на изследванията и интерпретацията на резултатите;
- **„Бенковски-2“:** През 2018 г. е въведена технологията Mud Farming за механично обработване на намития хвост в плажните зони, а в края на 2021 г. е добавена втора машина. Обработката ускорява обезводняването и консолидацията и според архивни данни осигурява около 12% допълнителен обем за депониране в обработваните зони [16]. Ефектът на технологията върху състоянието на хвоста е отчетен и в последващото геотехническо характеризиране [17];

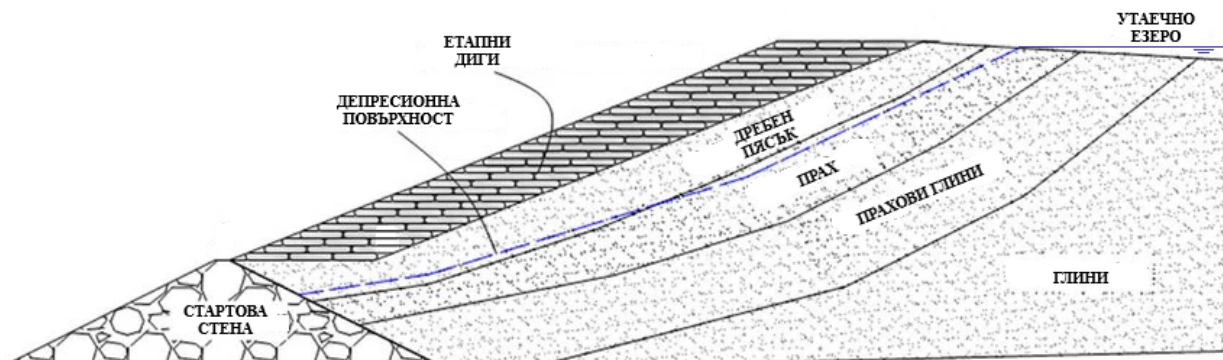
- **„Ерма река“:** Хвостохранилището е съоръжение от язовирен тип за съхраняване на минни отпадъци и повърхностни води. Проектното му развитие обхваща технико-икономическа разработка от 1981 г., работен проект от 1986 г. и актуализация от 2014 г. Предвидено е поетапно надграждане от кота 583.00 до 586.00 m и впоследствие до кота 592.00 m. Първият етап включва около 42 000 m³ руднична баластра, положена на пластове и уплътнена до обемна плътност 2,0 t/m³; дължината на насипа по оста на короната е около 350 m, а средната ширина – 40 m. Осигуреният обем е от порядъка на 1,5·10⁶ m³. Проектът включва локална система за ранно предупреждение и оповестяване. Поради невъзможността за извеждане на води от водосбора на р. Ерма, съоръжението ще продължи да изпълнява язовирна функция и след прекратяването на добива и преработката на руди [20].

За текущото състояние на тези съоръжения не може да се съди единствено по първоначалния проект или експлоатационния статус. Необходимо е да бъдат възстановени действителната строителна последователност, промените в технологията, изпълнените укрепителни и експлоатационни мерки.

ОТ ТЕХНОЛОГИЯТА НА ДЕПОНИРАНЕ ДО СТРУКТУРАТА НА ХВОСТА

- Хидравлично фракциониране

При хидравличното наливане пулпът се разлива по плажната зона, като частиците се утаяват в зависимост от скоростта на потока, едрината, плътността и формата си. В непосредствена близост до наливните изтичала обикновено се отлагат по-едрият пясъчни фракции. С отдалечаването от тях преобладават праховите и смесените фракции, а най-финият материал достига зоната на утаечното езеро. Така се оформят едрозърнеста, преходна и фина зона, чието принципно разположение е показано на Фигура 3.



Фиг. 3. Схематично формиране на зърнометрична зоналност при хидравлично наливане на хвоста.
Адаптирано от: [10]

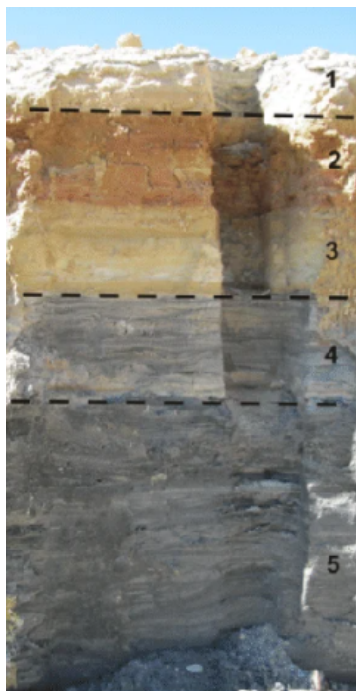
Общата зоналност не е плавна и постоянна по дължината на плажа. Положението на изтичалата, дебитът и концентрацията на пулпа, продължителността на наливните цикли и местоположението на утаечното езеро се изменят във времето. Локалният наклон, разклоняването и меандрирането (криволичещото движение) на потока, както и прекъсванията на наливането, създават значителна местна нееднородност.

Хидравличното фракциониране влияе не само върху зърнометричния състав, но и върху разпределението на плътността, дrenaщата способност и механичните характеристики. Зони с по-едри частици обикновено притежават по-висок коефициент на филтрация, докато фините прослойки могат да ограничат вертикалното отводняване и да задържат повишен порен натиск – поради тези причини хидравлично депониранят масив не може да се описва с един осреднен набор от характеристики [5]. Ето защо, при планиране сондажните дейности, полевите изпитвания и

пробовземането, следва да се идентифицират контрастни прослойки, локално рохки зони и материали с ограничена възможност за дрениране.

- Слоестост, лещовидни включения и анизотропия

Във вертикален разрез отделните цикли на депониране формират редуване на пясъчни, прахови и относително по-фини прослойки с различни плътност и водно съдържание. Границите между тях невинаги съвпадат с проектните етапи на надграждане. Пример за такъв слоест строеж е показан на Фигура 4.



Фиг. 4. Пример за слоест строеж на хидравлично депониран хвостов масив. Източник: [11]

В план меандрирането (криволичето движение) на потока създава канали, които при промяна на точките на депониране се запълват и образуват лещовидни тела. В рамките на една и съща разновидност хвост могат да се срещнат локални зони с различни физични и филтрационни характеристики [5, 6].

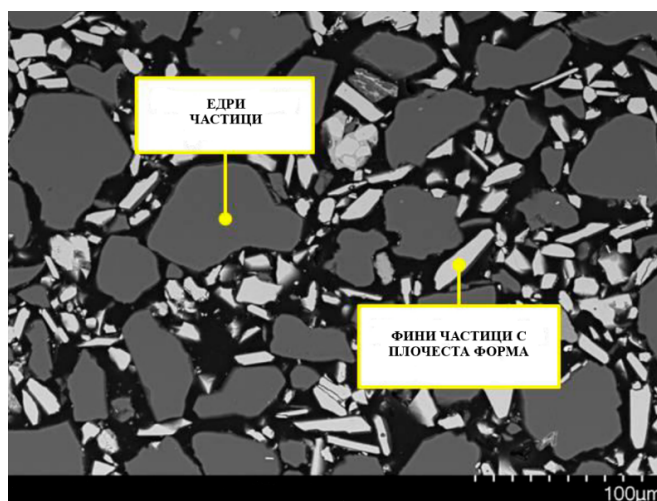
Съчетанието на относително по-пропускливи пясъчни прослойки и фини слоеве обуславя филтрационна анизотропия, като отношението между хоризонталния, k_h , и вертикалния, k_v , коефициент на филтрация може да бъде в широки граници $k_h/k_v=5-20$. Хоризонталният филтрационен поток се насочва преимуществено по пясъчните прослойки, докато фините включения ограничават вертикалното отводняване и могат локално да задържат повишен порен натиск. Нещо повече, ориентацията на частиците и контрастите в коравината създават и механична анизотропия [3, 5].

Въз основа на това може да бъде направен извод, че профилът от единичен сондаж не следва автоматично да бъде разпространяван (възприеман) върху голяма зона от съоръжението – необходимо е да бъдат съпоставени данни от разнообразни локации, резултати от непрекъснатото полево профилиране и да бъде отчетена историята на наливването. Осреднените характеристики могат да прикрият рохки прослойки, слабодренирани зони или контрастни контакти със значение за филтрацията, деформациите и втечняването.

- Състояние и структура

Състоянието на хвоста се описва чрез неговия коефициент на порите, плътност и ефективни напрежения, а при „подходящи“ (обикновено несвързани) материали – и чрез относителната плътност. В рамките на „земната механика на критичното състояние“ текущото положение на материала се оценява спрямо линията на критичното състояние при едно и също средно ефективно напрежение. Положението спрямо линията показва дали при срязване хвостът е склонен към обемно свиване или разширение [1, 7].

Структурата на хвоста обхваща подреждането, ориентацията и контактите между частиците, както и слоестостта, лещовидните включения и анизотропията, формирани при намиването. Върху нея влияят начинът на отлагане, последователността на намивните цикли, историята на напреженията, изсушаването, стареенето и потенциалната циментация. Характерната форма и подреждане на едрите и фините хвостови частици са илюстрирани на Фигура 5. Състоянието и структурата са свързани, но не са взаимозаменяеми характеристики.



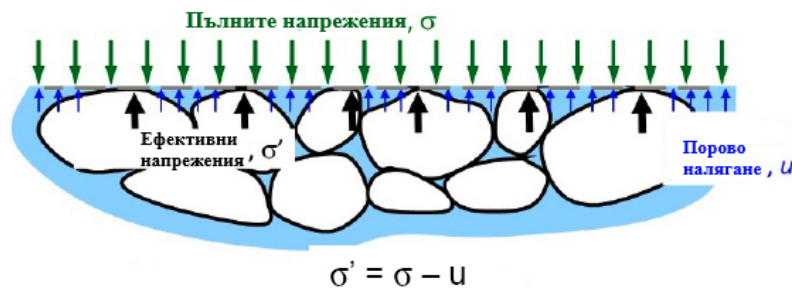
Фиг. 5. Пример за морфология и подреждане на едри и фини хвостови частици. Адаптирано от: [4]

Материали с близки зърнометричен състав, коефициент на порите и ефективни напрежения могат да проявят различна коравина, якост и недренирано реагиране, ако са формирани при различни условия на депониране. При лабораторно възстановените образци първоначалната структура обикновено не може да бъде възпроизвежда напълно. Плътността или относителната плътност сами по себе си не са достатъчни за характеризиране на материала [3]. Затова, за определяне на състоянието е нужна информация за естествената плътност, коефициента на порите и ефективните напрежения, а структурният ефект се установява чрез съпоставка на полеви и лабораторни резултати.

ЗНАЧЕНИЕ ЗА ВТЕЧНЯВАНЕТО И ГЕОТЕХНИЧЕСКОТО ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ

- Влияние върху механичното реагиране

При оценката на втечняването определящи са зърнометричният състав, текущото („естествено“) състояние, структурата, началните ефективни и срязващи напрежения и условията на дрениране. Една и съща класификация или близка относителна плътност не гарантират аналогична якост. Статично втечняване може да се задейства при етапно надграждане, запълване на отделни клетки или покачване на водното ниво, докато динамичното се свързва със земетръсни въздействия, взривни работи и други вибрационни въздействия. Връзката между пълните напрежения, порния натиск и ефективните напрежения във водонаситения материал е показана на Фигура 6.



Фиг. 6. Връзка между пълните напрежения, порния натиск и ефективните напрежения във водонаситен зърнест материал. Адаптирано от: [12]

Водонаситеният хвост в „рохко“ състояние проявява стремеж към обемно свиване при срязване. При относително бързо натоварване и ограничено дрениране стремежът към обемно свиване предизвиква нарастване на порния натиск, намаляване на ефективните напрежения и загуба на коравина и якост на срязване. Когато началното статично срязващо напрежение е по-голямо от остатъчната недренирана якост, но по-ниско от пиковата, относително малко допълнително статично или циклично въздействие може да задейства втечняване под формата на протичане и бързо развитие на големи деформации. При по-ниски начални срязващи напрежения цикличното натоварване може да доведе до постепенно натрупване на порен натиск, деградация на коравината и увеличаване на деформациите – поведение, определяно като циклична подвижност (т. нар. „cyclic mobility“). То не е задължително свързано с неконтролируемо протичане, но може да причини значителни слягания, хоризонтални премествания и пукнатини. Разграничението между протичане и циклична подвижност (т. нар. „cyclic mobility“) зависи не само от характера на въздействието, а и от началното напрегнато състояние и остатъчната якост на материала.

Хвостът в „сбито“ състояние проявява стремеж към обемно разширение при срязване, при което ефективните напрежения и якостта на срязване се запазват или дори временно нарастват. Това не изключва деградация на коравината при циклично натоварване (т.е. „омекване“) и натрупване на деформации, особено при многократно натоварване или в зони с контрастна слоестост. В реалния хвостов масив поведението може да бъде контролирано (диктувано) от ограничена по обем, но неблагоприятно разположена „рохка“ (т.е. със склонност към обемно свиване при срязване) прослойка, а не от осреднените свойства на преобладаващия материал [5, 7].

Историята на намяването помага да се очертаят вероятните критични зони, но оценката им трябва да се основава на действителното механично поведение на хвоста.

- Установяване на състоянието и ефекта на структурата

Състоянието и структурата не могат да се установят с един единствен метод. Оценката трябва да е комбинация от сондиране и пробовземане, полеви и геофизични изследвания, както и лабораторни изпитвания [5]. Основните данни са:

- естествена обемна плътност, водно съдържание и коефициент на порите;
- зърнометричен състав, съдържание на фини частици и пластичност;
- ниво на подземните води и ефективни напрежения;
- полеви SPT и CPTu, като при CPTu се включват „динамично“ измерване на порния натиск и тестове за разсейване на порен натиск;
- положение спрямо линията на критичното състояние, изразено чрез параметъра на състоянието, ψ [1, 7].

Пробовземането от водонаситен и рохък хвост е свързано с висок риск от нарушаване, затова пробата трябва да запази не само зърнометричния състав, но и естествените плътност, водно съдържание и структура. Степента на нарушаване зависи от целия процес – сондиране, извличане, опаковане, транспорт, съхранение и вграждане в лабораторния апарат.

Монотонните и цикличните триосови изпитвания определят „рохкото“ (т.е. със склонност към обемно свиване при срязване) или „сбитото“ (т.е. със склонност към обемно разширение при срязване – дилатансия) реагиране, генерирането на порен натиск, недренираната якост на срязване и цикличната носимоспособност. Когато полевата структура не може да бъде запазена, образците се възстановяват при контролирани плътност и ефективни напрежения. Резултатите характеризират поведението при зададено лабораторно състояние, но не непременно пълното полево поведение.

Допълнителна информация за ефекта на структурата дава съпоставката на коравината при малки деформации в масива и в лабораторно възстановени образци. Полевата скорост на срязващите вълни, V_s , се определя посредством геофизични методи in-situ, например чрез „cross-hole“ тест, а лабораторната – чрез бендер-елементи (т. нар. „огъвни елементи“) при съпоставими плътност и ефективни напрежения. Разликите могат да отразяват начина на отлагане, ориентацията на частиците, стареенето и потенциалната циментация. V_s не е самостоятелен измерител на структурата и се интерпретира съвместно с пенетрационните и лабораторните изпитвания [8]. Съпоставката показва доколко лабораторно определените якост на срязване и циклична носимоспособност са представителни за масива. При съществуващи и многократно надграждани хвостохранилища тя е от особено значение, тъй като сходството по зърнометричен състав и коефициент на порите не означава непременно и еднакво механично реагиране.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хвостохранилищата в България са изградени и надградени при различни технологии и експлоатационни режими. Схемата на надграждане, местата на заустване, положението на утаечното езеро и управлението на водите се изменят във времето. Историята на строителството и експлоатацията са част от геотехническото характеризане, включително при изведени от експлоатация съоръжения.

Хидравличното фракционироване и редуването на наливни цикли формират пространствено нееднороден масив със слоестост, лещовидни включения и филтрационна анизотропия. В него се изменят зърнометричният състав, плътността, водопропускливостта и условията на дрениране. Осреднените физични показатели не са достатъчни, а състоянието и структурата следва да се оценяват съвместно.

Технологията на депониране и схемата на надграждане не са самостоятелни критерии за определяне на риска от статично или динамично втечняване – ето защо оценката се основава на съвкупност от архивни данни, сондиране (пробовземане), полеви и геофизични изследвания, както и монотонни и циклични лабораторни изпитвания. Сравнението между полевата и лабораторната коравина при малки деформации подпомага оценката и отчитането на структурния ефект. Историята на изграждането остава записана в структурата на хвоста и е целесъобразно да бъде отчитана при оценката на механичното му поведение и склонността към втечняване.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Been, K., & Jefferies, M. G. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*, 35(2), 99–112.
- [2] Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2023). *Dry Stacking of Filtered Tailings for Large-Scale Production Rates over 100,000 Metric Tons per Day: Envisioning the Sustainable Future of Mine Tailings Storage Facilities*. *Minerals*, 13(11), 1445
- [3] Chang, N., Heymann, G., & Clayton, C. R. I. (2011). The effect of fabric on the behaviour of gold tailings. *Géotechnique*, 61(3), 187–197.
- [4] dos Santos, R. A., Vulpe, C., Fourie, A., Jefferies, M., de Sousa Silva, J. P., & Casagrande, M. D. T. (2025). *Shear wave velocity and small-strain stiffness across a broad range of states in iron ore tailings*. *Canadian Geotechnical Journal*.
- [5] Fourie, A., Verdugo, R., Bjelkevik, A., Torres-Cruz, L. A., & Znidarcic, D. (2022). *Geotechnics of mine tailings: A 2022 state of the art*. In *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – State of the Art and Invited Lectures*, 121–183.

- [6] International Commission on Large Dams – ICOLD. (2021). *Bulletin 181: Tailings Dam Design – Technology Update*. ICOLD, Paris, France.
- [7] Jefferies, M. G., & Been, K. (2016). *Soil Liquefaction: A Critical State Approach*. 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- [8] Kiyota, T., Maekawa, Y., & Wu, C. (2019). Using in-situ and laboratory-measured shear wave velocities to evaluate the influence of soil fabric on in-situ liquefaction resistance. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 164–173.
- [9] Li, Q., Duan, Z., Shi, H., Yu, Y., Zhang, H., & Fu, B. (2024). Development of a full-scale flume test system for depositional behavior study of segregating tailings. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83, Article 66
- [10] Li, Q., Ma, G., Li, P., & Su, Z. (2021). Dynamic characteristics of tailings dam with geotextile tubes under seismic load. *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1), 599–614
- [11] Murray, J., Kirschbaum, A. M., & Dold, B. (2013, January). Influence of acid mine drainage from Pan de Azúcar Mine (Pb-Zn-Ag) and possible arsenic input on the water quality of Pozuelos Lagoon Basin, Northwest Argentina [Paper presentation]. *Mine Water Solutions in Extreme Environments Conference*, Lima, Peru.
- [12] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *State of the art and practice in the assessment of earthquake-induced soil liquefaction and its consequences*. The National Academies Press.
- [13] Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. G. (2008). Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 846–852.
- [14] Shrivastava, A. (n.d.). *Mine Waste dumps and tailing dams*. Academia.edu
- [15] Vick, S. G. (1983). *Planning, design, and analysis of tailings dams*. John Wiley & Sons.
- [16] Геотехмин. (2026). *Иновативна технология за подобряване стабилитета на хвостохранилище „Бенковски-2“*. Геотехмин, София.
- [17] Милев, Н. (2025). *Съвременен подход за геотехническо характеризиране на хвостохранилища – два български примера от практиката*. Сборник с доклади от Третата българска научно-техническа конференция „Управление и безопасност на хвостохранилища“, ISSN 2815-472X, с. 39–57, Копривщица, България.
- [18] Министерство на околната среда и водите – МОСВ. (2010). *Регионалните инспекции по околната среда и водите извършват ежегодни проверки за правилната експлоатация на общо 12-те действащи хвостохранилища на територията на страната*. 6 октомври 2010 г.
- [19] Министерство на околната среда и водите – МОСВ. (2011). *Регионалните структури на МОСВ в Смолян и Пловдив извършват незабавна проверка по сигнал за замърсяване на реките Юговска и Чепеларска*. 11 януари 2011 г.
- [20] Регионална инспекция по околната среда и водите – Смолян. (2015). *Решение № 05-ОС/2015 г. от 06.03.2015 г. за преценяване на вероятната степен на отрицателно въздействие върху защитените зони на инвестиционно предложение за надграждане на хвостохранилище „Ерма река“ – IIБ етап до кота 592 и изграждане на система за ранно предупреждение и оповестяване на населението*.



**ГЕОМЕХАНИКАТА – ОСНОВА ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ, ОСНОВА ПРИ ИЗБОРА В ПАРАМЕТРИТЕ НА
СИСТЕМИТЕ НА РАЗРАБОТВАНЕ, ОСНОВА ПРИ ОСИГУРЯВАНЕ НА ДЪЛГОВРЕМЕННА
УСТОЙЧИВОСТ НА ИЗЗЕТИТЕ ПРОСТРАНСТВА, ОСНОВА НА ПОДЗЕМНИЯ ДОБИВ НА ПРИРОДНИ
РЕСУРСИ**

д-р инж. Георги Дачев
e-mail: g.dachev@me.government.bg

**GEOMECHANICS – BASIS FOR DESIGN, BASIS FOR SELECTING THE PARAMETERS OF
DEVELOPMENT SYSTEMS, BASIS FOR ENSURING LONG-TERM SUSTAINABILITY OF EXCAVATED
AREAS, BASIS FOR UNDERGROUND MINING OF UNDERGROUND RESOURCES**

PhD. Eng. Georgi Dachev
e-mail: g.dachev@me.government.bg

ABSTRACT

For the effective implementation of the development system and mining technology, the way of managing the state of the mining massif is of particular importance. Geomechanics "participates" in the selection of the parameters of the state of the development systems, including ensuring long-term stability. In all cases, the state of the massif is determined by the physicommechanical properties of the massif, its damage and the requirements for the protection of facilities located underground and on the surface. When determining the parameters of the state of the mining massif and accepting the parameters of the development systems, including ensuring stability and safety, the following open questions remain: practice has proven it, the parameters of the state that work are adopted; the parameters of the development systems are adopted, including the adopted geometric parameters laid down in acts issued by state authorities; the factors above are determined not by a team of specialists in the field, but by one person, often with a legal capacity other than rock mechanics. The report aims to show the role of geomechanics in making design decisions entered into the project documentation during design, analysis and evaluation.

Въведение

Относителния дял на добитите количества руди при подземно разработване у нас в сравнение с добива на руди при открито разработване не са относими по количества едни спрямо други. Към 01.01.2026 г. добитите количества руди по подземен начин през календарната 2025 г. са около 3 200 000 тона, за което свидетелства предоставената геоложка информация със съответните геоложки отчети за всяко едно от находищата експлоатирано по подземен начин. На територията на Р. България към 01.01.2026 г. по подземен начин се експлоатират общо десет находища за добив на метални подземни богатства – руди. Прилаганите системи за подземен добив – съвместно с подвариантите им надхвърлят дванадесет броя, като едни от най-прилаганите у нас остават камерна система на разработване с последващо запълване, система с подетажно обрушаване, камерно-стълбовата система и слоева система на разработване с възходящ и низходящ ред на изземване на слоевете. Като най-производителна се е доказала камерната система с последващо запълване която обуславя малко над 70 % от общото количество добити руди за предходната календарна година. Като най-ниско производителна се явява системата със слоево запълнение при низходящ ред при добива на тънки рудни жили, която обуславя едва 2 % общото количество добити руди за предходната календарна година у нас. За ефективното охарактеризиране на инженерно-геоложки условия, геомеханична характеристика на скалите и/или геомеханика и техноложка характеристика на полезните изкопаеми в

масива, (съгласно разпоредбите записани в Наредбата за изискванията към обхвата и съдържанието на работните проекти за търсене и проучване, добив и първична преработка на подземни богатства, за ликвидация и/или консервация на геологопроучвателните и на миннодобивните обекти и за рекултивация на засегнатите терени и условията и редът за тяхното съгласуване) е необходимо да се следва ред, който съществува, описан е, приет е съгласно нормативна уредба, но е доказано неприлаган или рядко прилаган повече от един път при проектирането и по-рядко следван при практическото изпълнение на полевите задачи в етапа на строителство и експлоатация.

Основни практики при геомеханично характеризирание и осигуряване

При определяне параметрите на състоянието на минния масив на системите на разработване в т.ч. осигуряване на устойчивостта и безопасността, остават следните открити въпроси, които се превръщат в рутина - практиката го е доказала, приети са параметри на състоянието които работят; възприети са параметри на системите на разработване в т.ч. приети геометрични параметри залежали в актове издавани от държавни органи в т.ч. оценки ВОС, Решения по ОВОС и др.; факторите по-горе са определени не от колектив специалисти в областта, а от едно лице много често с правоспособност различна от скалната механика.

Наложилата се практика за характеризация на масивите в които се прокарват, строят, и проектират минни изработки е посредством емпирика (формулни апарати) и по-малко по лабораторни изпитвания и числени анализи с цел снемане на реални данни за параметри известни като геоложка обстановка на района и пресъздаване с помощта на модели от един или друг вид. Съществуват различни методи в минната практика за оразмеряване на параметри на системите на разработване емпирични, аналитични и числени. Всички известни методи изискват и адекватни параметри т.н. параметри на състоянието (якостно - деформационни свойства, структурна нарушеност, действащи напрежения, хидроложка и хидрогеоложка изученост и др.).

Факт е, че подземната експлоатация на полезни изкопаеми се осъществява в недостатъчно изучена и постоянно изменяща се геоложка среда, каквато е скалният масив. Масивът е нарушен с неизвестни якостни и деформационни свойства и е предварително напрегнат. Всички тези характерни особености на подземната експлоатация на полезни изкопаеми правят оразмеряването на конструктивните елементи в системите на разработване и на групата подготвителни минни изработки все по-конкретно, различно и специфично. При оформяне на един експлоатационен блок и/или участък естественото поле на напрежения се нарушава и се индуцира ново такова с неизвестна магнитуда и ориентация на нови действащи напрежения. Основните фактори, определящи поведението на системата на разработване, са механичните свойства, структурните характеристики, мащабите от технологични въздействия и напрегнатото състояние на системата. Тези групи фактори обуславят базата данни при всеки етап от фактическото оразмеряване.

За разлика от подходите, прилагани в строителната механика при оразмеряване на конструктивни елементи в подземния добив на полезни изкопаеми е че реалния масив е предварително напрегнат, нарушен, съдържащ нееднородности, често флуиди (газове и води), които не се отчитат във формулите при оразмеряване. Освен това в условия на хомогенна, изотропна и еластична среда, натоварваща се след изграждане на конструкцията, свойствата, строежът и поведението на средата с всичките ѝ предимства и недостатъци, в която се оразмерява, обикновено остават неизвестни или недостатъчно изучени. Едновременно с това трябва да се отбележи, че съвременната приложна геомеханика дава възможност за количествена оценка на отбелязаните по-горе структурно-механични особености, определящи режима на работа и поведението.

Геомеханични подходи за характеризация на масива

За ефективното прилагане на системата на разработване и добивната технология от особена важност е начинът на управление на състоянието на минният масив. Геомеханиката „участва“ при избора в параметрите на състоянието на системите на разработване в т.ч. осигуряването на дълговременната устойчивост. При всички случаи състоянието на масива се определя от физикомеханичните свойства на масива, неговата нарушеност и изискванията за охрана на съоръжения ситуирани под земята и на повърхността.

В геомеханичен аспект всеки вид залеж, всяко рудно тяло, респективно всеки експлоатационен участък е различен и специфичен по своите геоложки, геомеханични и минно-технологични условия. На второ място, устойчивостта на работата на тази по същество природно инженерна система, геомеханичната реакция и поведението на вместващия масив, освен от напрегнатото и деформираното състояние (НДС) и от ефектите на технологичните въздействия, се определя и от геомеханичните свойства и структурни характеристики на изграждащите го скали, наличие на води и наличие на изменения в геолошко отношение по степен на нарушеност на масива. На трето място НДС на системата вместващ масив/добивни изработки (ВМ/ДИ) или вместващ масив/минна инфраструктура ВМ/МИ на практика е динамично променящ се параметър. При тези обстоятелства определянето на устойчивостта трябва да се извършва след установяването на реалните физико-механични характеристики на масивите/литоложките разновидности скали и скалите по степен на нарушеност (SRK, 2016), с отчитане влиянието и на структурните нарушения. Тези характеристики („параметри на състоянието“) са обединени и посочени в таблица 1, в конкретния случай те дават информация за един изследван минен регион в мина за добив на оловно-цинкови руди.

Таблица 1. Геомеханична характеристика на скален масив в находище за олово и цинк базирана на стойностите на вместващия масив и рудното тяло

State parameters	Host massif		Ore body	
	Values		Values	
	Min.	Max.	Min.	Max.
RQD	45	74	53	82
Jn	2	3	2	3
Jn rating	6	9	6	9
Jr	2	3	2	3
Ja	1	1	1	1
Jw	1	1	1	1
SRF	2,5	2,5	2,5	2,5
UCS	42	84	45	77
Rock Block	2,4	7,5	1,5	3,5
J Condition	2	3	2	3
Stress	2,4	2,4	2,4	2,4
RMR	41	67	38	64
MRMR	35	61	34	52
Q	1,64	9,80	0,75	4,30
Mean (Q)	5,72		2,53	
Design Rock mass Strength (DRMS)	38		25	

База данни за числени модели - подход/последователност базирана на комплексна параметрична и геомеханична оценка за логистика при оразмеряване, важащо за системите на разработване.

Таблица 2. Параметри на състоянието за захранване на числен модел

Геомеханични параметри		Литология	Вместващ масив	Рудно тяло
Лабораторни изследвания	Обемна плътност γ [MN/m ³]		0,0275	0,0265
	Якост на едноосов натиск σ_{ucs} [MPa]		122	84
	Якост на опън, σ_t [MPa]		19,6	10,4
	Hoek-Brown константа- m_i		28,0	17,0
	Кохезия- c [MPa]		10,8	7,6
	Ъгъл на вътрешно триене- ϕ [°]		43	35
	Модул на еластичност E , [MPa]		115 400	98 320
	Коефициент на Поасон - ν		0,18	0,22
	Hoek-Brown константа- m_b		7,234	3,016
	Hoek-Brown константа- s		0,0160	0,0051
	Hoek-Brown константа- a		0,502	0,504
	Геоложки индекс за якост GSI		67 $\pm$ 5	58 $\pm$ 2
Характеристика	Брой системи пукнатини		Две системи пукнатини	Три системи пукнатини
Напрегнато състояние на масива	Максимално главно действащо напрежение, σ_1 [MPa]		11,0	11,0
	Минимално главно действащо напрежение, σ_3 [MPa]		5,5	5,5
	Посока на максималното главно действащо напрежение [deg., °]		30°-115°	30°-115°
	Дълбочина от земната повърхност, H [m]		300	300

Една част от необходимите входни параметри за характеризация на масива са систематизирани в таблица 1 и таблица 2, а останалата част от входни параметри са представени в таблица 3, където влизат и геомеханичните класификации съвместно с техните показатели по литоложки разновидности.

Таблица 3. Геомеханична характеризация на скален масив базирана на литоложките разновидности скални масиви

Геомеханични параметри	Амфибол-биотитови гнайси	Хидротермално-променени гнайси	Гранитогнайси с мрамори прослойки
Средна якост на едноосов натиск $\sigma_{ср}$ [MPa] (таблица III.5)	98	82	58
Hoek-Brown константа- m	28	24,0	17
Геоложки индекс за якост GSI (таблица III.6)	64	58	54
Hoek-Brown константа- m	7,234	4,949	3,016
Hoek-Brown константа- s	0,0160	0,0080	0,0051
Константа- a	0,502	0,503	0,504
Модул на еластичност E [MPa] (таблица III.5)	103 804	87 630	58 320
Кохезия- c [MPa]	7,83	5,770	3,486
Ъгъл на вътрешно триене- φ [°]	43,04	39,82	35,54
Якост на опън на скалния масив, [MPa]	-0,216	-0,133	-0,097
$\sigma_{ср}^M$ -Якост на едноосов натиск на скалния масив [MPa]	12,271	7,222	4,030
Обща якост- $\sigma_{teng th}$ [MPa]	36,044	24,646	13,550
Деформационен модул- E_{th} [MPa]	21 054	13 634	9 108

Всички резултати от новоопределените входни параметри от таблица 1, таблица 2 и таблица 3 дават възможност за получаване на пълна представа за геомеханичните процеси съпътстващи изпълнението на инженерните проекти по оразмеряването.

Съществува и още една необходима част от входни параметри при проектиране, последващо оразмеряване и дори обратен анализ за състоянието, тя е представена в таблица 3. За тази допълнителна характеризация са необходими т.н. "in situ" наблюдения които дават отговори на някои въпроси. Тези полеви наблюдения, наричани още "mine history", са базирани на проучване механизмите на разрушаване; времето на настъпване на интензивно нарушаване по стените на минните изработки или конструктивни елементи; хронологичния ред; пространствените характеристики; характерните места на интензивно обрушаване и т.н, даден е пример с подпорен целик.

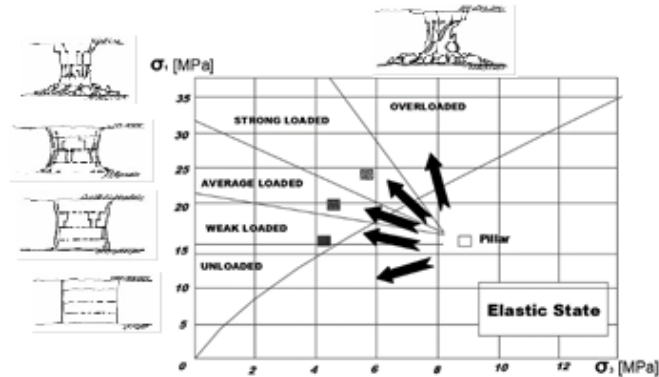
Таблица 4. Геомеханично поведение на прилаганата система на разработване

№ на целика	Форма на целика	Време на оформяне на целика (месец, година)	Наблюдават ли се пукнатини по целика (ако да с какъв размер)	Престъргването на целика (ако да с колко m ²)	Площ на целика (m ²)	Височина на целика (m)	Структура на целика	Строеж на целика	Средна якост на материала изграждащ целика (MPa) σ_c	Площ на камерата около целика (m ²)	Пукнатини по тавана на камерата (ако да как са ориентирани)

Предварителен анализ на геомеханичната обстановка

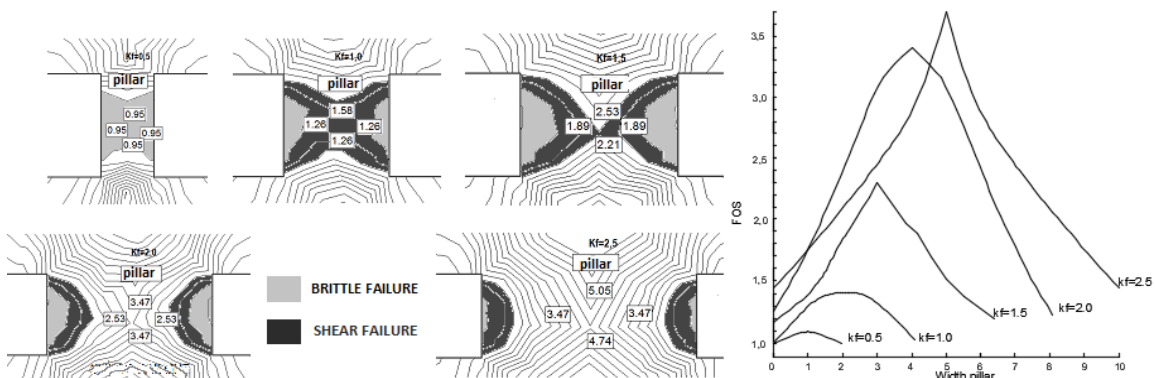
Преди да се изпълни и „зареди“ численият модел, трябва да се изготви геомеханичен такъв. В него е необходимо да се използва създадената многомерна база данни за предварително определените параметри на състоянието–свойства, структурни характеристики, напрежение и т.н. и предварително определената геометрия на системата ВМ/ДИ, представена по-горе. Анализа на геомеханичното състояние на системата на разработване може да следва определен ред – прав и обратен. За да се приложи адекватно оразмеряване е необходимо да се следва последователност на отчитане на взаимовръзки, предварително определяне параметрите на състоянието и всичко това да се обвърже помежду си, а именно:

- характеристика по натовареността на конструктивни елементи осигуряващи безопасната експлоатация:



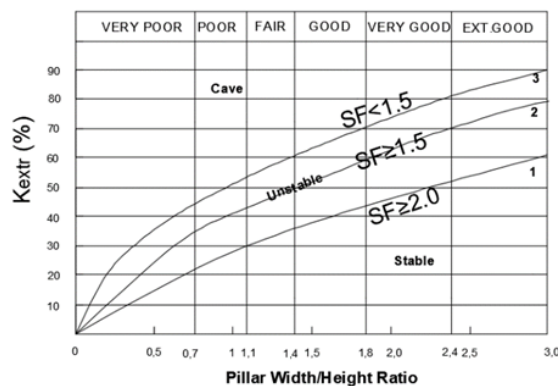
Фигура 1. Геомеханична характеристика по натовареност в случая за стълбообразни целици

- Изследване на промяната в коефициента на формата даваща връзка с коефициента на сигурност



Фигура 2. Анализ за промяната в коефициента на формата в случая за стълбообразни целици, резултати получени с помощта на числен модел.

- Класификационна оценка по геомеханични показатели



Фигура 3. Класификационна оценка за прогнозиране устойчивостта на целиците, анализ разви на база полеви и експериментални изследвания

Създадената многомерна база данни, осигурява освен количествените входните параметри (параметри на състоянието) за всеки инженерен разчет, но и приложение на добре разработените и широко използвани за целта числени методи. Това осигурява още комплексен анализ, логистика на всеки инженерен проект или модел и съответните параметрични оценки, в т.ч. оценка на риска, оценка на рисковите фактори и зони, определящи устойчивата експлоатация.

Количествения анализ и класификационната оценка спомагат за всеки етап от адекватното оразмеряване през определяне на оптималното местоположение на конструктивни елементи, форма и ориентация, гарантиране на устойчивостта при експлоатация до решенията за осигуряване на дълговременната устойчивост - предмет на геомеханиката.

Изводи

Добре известно е, че Р България е държава с древни традиции в добива на метали – медни, оловно-цинкови и златосъдържащи руди в находищата за добив на подземни природни богатства. Съгласно националния концесионен регистър (НКР) към момента в България се извършва експлоатация на над 600 концесионни обекта от които по подземен способ се разработват едва десет находища или 1,7% от общия дял. Потенциалът на страната ни за добив на подземни богатства е голям, но целенасочено „развитие“ на специалисти в посока подземен добив на полезни изкопаеми изостава с резки темпове. Липсват специалисти свързани с реални изследвания и практически опит в областта на подземния добив – технолози, миньори и минни разработчици, от там и на геомеханици. В последните няколко години добивът на метални полезни изкопаеми и въглища по подземен способ е съкратен наполовина, изцяло са ликвидирани четири метални находища упражняващи минно-добивна дейност по подземен способ действащи до 2020 г. (находища Чала, находище Димов дол, находище Лукина падина и находище Оброчище), четири находища за добив на въглища (находище Ораново, находище Миньор находище Бабино и находище Бобов дол) са последните у нас разработвани по подземен способ действащи до 2018 г. За проблемите пред подземния добив на полезни изкопаеми и в частност геомеханиката свидетелства и вече несъществуващата катедра по „Подземен добив на полезни изкопаеми“.

Все по-големия дял от инвестиционните намерения за добив единствено по открит способ, обуславяни от липсата на кадри в минерално-суровинния отрасъл плюс ръководен инженерен персонал с нуждата квалификация който да упражнява и да възлага дейност в подземни минни условия. Доказателство за последното се явява и перипетите пред които се изправя всеки един новостроящият се подземен рудник или подземен рудник развиващ се в нов фланг или по нова зона. Липсата на квалифицирани кадри от средно ниво в т.ч. минни оператори липсват или тепърва е необходимо да се обучават на място. Липсата на „практични миньори“ с познания по базова геомеханика води до злоупотреби. Статистика водена през последните пет години показва, че проектирането и строителство на минни изработки в т.ч. подземна инфраструктура се възлага вече и на кадри от строителния и архитектурен бранш и все по-малко на специалисти от минния бранш.

От друга страна осезаемите ефекти от геополитическите конфликти през последните години върху европейската и световната минна промишленост и настъпилите мащабни промени в обществено - икономически план в световен мащаб наложиха преосмислянето на икономическите и научните приоритети. Към момента тридесет и четири елемента от периодичната Менделеева таблица на химическите елементи са определени от Европейския съюз като „критични“ суровини със стратегическо значение за европейската икономика (КСС). Те се използват в електрониката, здравеопазването, производството на стомана, отбраната, изследването на космоса, авиацията и още много други индустриални области, като основните им доставчици са извън Европа. Поради това европейския законодателен акт за суровините от изключителна важност от 2023 г. дефинира като критични суровини следните материали: антимон, арсен, алуминий/боксит, барит, берилий, бисмут, бор, мед, фелдшпат, флуорит, галий, германий, хафний, хелий, литий, магнезий, манган, графит, никел, ниобий, фосфати, скандий, силиций, стронций, тантал, титан, волфрам, ванадий и платинова група елементи, включваща платина, паладий, родий, рутений и осмий. Като стратегически в същия документ са определени

бисмут, бор, кобалт, мед, галий, германий, литий, магнезий, манган, графит, никел, платинова група елементи, редкоземните елементи включително и неодим, празеодим, тербий, диспрозий, гадолиний, самарий и церий, силиций, титан и волфрам.

В заключение следва да се отбележи, че избора на правилна методична последователност осигурява всички етапи от проектиране, лабораторните и полеви изследвания, моделирането и плана за разработка, през строителството и експлоатацията до рекултивирането и решенията за вторично използване на отработените пространства с други предназначения, изключително актуално в съвременен етап от развитие на всеки един подземен минен обект.

Литература:

1. **МИЛЧЕВ, М.**, Кр. Дерменджиев. Очаквани прояви на скалния натиск при слоева система с възходящ ред на изземване и запълване. Сб.докл. от X Международна конференция по Геомеханика, 19–23 септември 2022., Варна, България, с.74–82
2. **ДЕРМЕНДЖИЕВ, Кр.**, Г. Стоянчев, К. Куцаров. Крепеж за добивни изработки при разработване на неустойчиви рудни жилни и пластообразни залежи. Сб.докл. от X Международна конференция по Геомеханика, 19–23 септември 2022., Варна, България, с.53–58.
3. **BROWN E. T.** Editor "Rock Characterisation Testing and Monitoring ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, 1991.
4. **DACHEV G.**, Stefanov D. Analysis of the geomechanical state of isolated inter-room support pillars. Geotechnical challenges in karst ISRM Specialised Conference/Međunarodna konferencija 8. Savjetovanje Hrvatskog geotehničkog društva Omiš – Split, Croatia, 11-13 April 2019, page 175-180.
5. **DACHEV G.**, Kutsarov K., Georgiev D. The safe and effective acquisition of geo-resources as the main objective of geomechanics. XIth Expert counseling with international in the area of underground and surface exploitation and geological exploration of mineral resources Podelks Poveks 2018, Struga, R. of Macedonia 09-11 November 2018, page 143-149.
6. **ДАЧЕВ, Г.**, Ръководство за упражнения по приложна механика на скалите, ISBN 978-619-160-822-5, (2017).
7. **Дачев Г.**, Иванов В., Проблеми при оразмеряване на единични опорни целици по примера на рудник „Ерма река“, находище „Гюдюрска“ („Южна Петровица“), Годишник на МГУ, том 57, св. II, 2014, стр. 12-14.
8. **Bienjowski Z. T.** Engineering Rock mass classifications. NY Wiley, 1989.
9. **Lunder P. J** Hard rock pillar strength estimation an applied empirical approach-The university of Columbia 1994.
10. **Potvin Y**, Thomas E, Fourie A. Handbook on mine fill. Nedlands, Australia: Australian Centre for Geomechanics; 2005.
11. **Hedley D.G.F**, Singh Cut and Fill Mining in Canada Application of R.M. to cut and fill mining; 1980 Lulen, Vol 2.
12. **Mark C.**, Chase F. Analysis of retreat mining pillar stability (ARMPS), Pittsburgh Research Center, 1997.



TOPIC E

**Environmental protection. Sustainable development.
Geotechnical aspects of cultural heritage**

**Опазване на околната среда. Устойчиво развитие.
Геотехнически аспекти на културното наследство**

**CARBON FUNCTIONS OF PEATLAND GEOSYSTEMS IN THE NORTH-WESTERN REGION OF UKRAINE:
A REGIONAL ASSESSMENT IN THE CONTEXT OF EUROPEAN EVIDENCE**

Andrii Pokshevnytskyi

²State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine", 34a, Akademika Palladina av., Kyiv, Ukraine, 03142, e-mail: pokshevnitskiy@gmail.com

ABSTRACT

For much of the twentieth century, peatlands were widely regarded as land requiring drainage for agricultural use rather than ecosystems of major environmental value. As a result, large areas of peatland across Europe were drained during the twentieth century, with consequences that are still being quantified. At that time, the importance of peatlands as long-term carbon stores was largely overlooked. Globally, peatlands occupy somewhere between 3 and 5% of the land surface and yet hold more than one-third of all soil carbon – more, in aggregate, than is contained in the standing biomass of all the world's forests.

Peatland geosystems of the NWR play an important role in regional carbon storage and greenhouse gas regulation, and have been substantially altered by 20th-century drainage whose consequences are still unfolding. Abandoned drained peatlands in the NWR are at elevated fire risk during drought years. Peat fire events release centuries of accumulated carbon within days and leave no possibility of recovery at human timescales. Conservation of intact peatland geosystems and managed rewetting of degraded areas represent the most effective land-use interventions for climate mitigation in the NWR – with co-benefits for regional hydrology, biodiversity, and the geomechanical stability of peat-underlain infrastructure.

Introduction

For much of the twentieth century, peatlands were widely regarded as land requiring drainage for agricultural use rather than ecosystems of major environmental value. As a result, large areas of peatland across Europe were drained during the twentieth century, with consequences that are still being quantified. At that time, the importance of peatlands as long-term carbon stores was largely overlooked. Globally, peatlands occupy somewhere between 3 and 5% of the land surface and yet hold more than one-third of all soil carbon – more, in aggregate, than is contained in the standing biomass of all the world's forests.

The North-Western Region of Ukraine (NWR) – Volyn, Rivne, Lviv, Ivano-Frankivsk, Chernivtsi and Zakarpattia oblasts, together forming the Ukrainian section of the broader Polissia and Carpathian fringe – has its own substantial peatland resource. Organic deposits have formed in the floodplains of the Prypiat, Horyn, Styr, Sluch and Western Bug rivers, in glaciofluvial depressions between sandy ridges, and along the drained margins of ancient lake basins. Annual precipitation across the region ranges from 600 mm in the north to 800 mm in the Subcarpathian zone (Vozniuk et al., 2017), which is sufficient to sustain active peat formation where drainage has not intervened. Peat depths vary enormously – from less than half a metre on the margins of complexes to more than 3 metres in well-developed lowland bogs.

The core question is what happens to the carbon stored in these deposits – under natural conditions, under drainage, and under the fire and abandonment that followed the collapse of Soviet-era land improvement systems. This paper brings together regional data on NWR peatlands and recent European evidence on peatland carbon losses to address that question. It draws mainly on Vozniuk et al. (2017) for regional characterization and on European flux and inventory studies from the past decade for quantitative context.

Carbon Accumulation Capacity of NWR Peatlands

Peat accumulates because decomposition is slower than production. Under permanently waterlogged conditions, the absence of free oxygen shuts down the aerobic microbial pathways responsible for most organic matter breakdown. Plant material – mosses, sedges, reeds, wood fragments – piles up as partially

decomposed residues, layer upon layer, over timescales measured in centuries and millennia. The carbon content of the resulting material is high: typically 45–60% of dry mass, sometimes more.

In the NWR, peatlands are predominantly eutrophic – that is, fed by mineral-rich groundwater rather than rainwater alone. Groundwater supply strongly influences their geochemical characteristics. Eutrophic peats tend to have higher ash content than raised bogs, with more calcium, higher pH, and significantly elevated concentrations of nitrogen (reaching 2–3% of dry mass in well-developed profiles), phosphorus, potassium, and micronutrients including copper (Vozniuk et al., 2017). The organic fraction itself is heterogeneous: fresh accumulations are rich in cellulose and hemicellulose, while older, more humified horizons consist predominantly of humic acids, fulvic acids, and recalcitrant humin complexes that resist further decomposition even under aerobic conditions.

Carbon stocks in these systems have not been systematically measured at the regional scale for Ukrainian Polissia. But comparable eutrophic peatlands in Poland, Belarus and the Baltic states – with similar genesis, peat types and depth distributions – typically hold 150–300 tonnes of carbon per hectare. These figures should be regarded as indicative estimates until a regional inventory becomes available. Given that peat depths along the Horyn and Styr floodplains and in the inter-drainage areas of Volyn and Rivne oblasts locally reach 2–3 metres, the aggregate carbon reservoir of the NWR is geochemically substantial.

Greenhouse Gas Exchange: CO₂, CH₄ and N₂O

Three greenhouse gases matter in peatland carbon accounting: CO₂, CH₄, and N₂O. The relative importance of these gases varies with hydrological conditions, particularly water table depth.

When the water table is at or near the surface, photosynthesis by Sphagnum mosses and vascular wetland plants draws CO₂ from the atmosphere and incorporates it into biomass, part of which eventually becomes peat. Below the water table, in strictly anaerobic conditions, the dominant microbial process is methanogenesis – the fermentation of organic matter into CH₄. Methane escapes through the water column by diffusion, through the aerenchyma (air-conducting tissue) of emergent plants, and as bubbles from the sediment surface. Over a 100-year global warming potential horizon, one kilogram of CH₄ has the same radiative forcing as approximately 28–34 kg of CO₂. This is why natural, undrained peatlands can show a net warming influence in the short term – they emit enough methane to offset their CO₂ uptake – while functioning as net carbon sinks over longer timescales as peat accumulates.

A decline in water table depth of only 20–30 cm substantially alters carbon cycling. Oxygen penetrates the upper peat layers, aerobic bacteria become active, and CO₂ emissions from decomposition increase sharply. Koch et al. (2023) quantified this relationship using flux data from Danish long-term eddy covariance monitoring networks and showed that CO₂ emissions respond predictably – and steeply – to declining water table depth. Their results underpin national-scale GHG estimates and have been used to design restoration programmes. Rewetting, conversely, has been shown across multiple European studies to reduce net CO₂ emissions by an average of around 1.43 t CO₂/ha/year (Darusman et al., 2023), at the cost of somewhat elevated CH₄ production; the net climate benefit of rewetting over decades is generally positive.

Nitrous oxide adds a further complication – particularly in eutrophic systems like those of the NWR. At intermediate moisture levels, where the soil cycles between aerobic and anaerobic conditions, both nitrification and denitrification are active simultaneously. These conditions favour intensive N₂O production through simultaneous nitrification and denitrification. In nitrogen-rich lowland peats with 2–3% organic nitrogen, even modest drainage can generate N₂O emissions that represent a meaningful fraction of the total GHG budget. Yet N₂O is rarely measured in Ukrainian peatland studies, and its contribution to national emission inventories is likely underestimated.

What Drainage Does to Peat Carbon

Between the 1950s and the early 1980s, Soviet hydrotechnical improvement programmes installed drainage networks across large areas of wetland and waterlogged land in Ukrainian Polissia – including substantial areas of organic soil in the NWR. The intended outcome was agricultural productivity. In many

agricultural areas, drainage initially increased crop productivity. But the geochemical consequences have outlasted the agricultural rationale by decades in many locations.

Once peat is drained and exposed to oxygen, oxidation begins and does not stop. Under drained conditions, peat oxidation continues for decades unless hydrological conditions are restored. Aerobic microorganisms that were previously inactive begin breaking down organic compounds that accumulated over thousands of years. The surface subsides – compaction, shrinkage, and biological oxidation all contribute – at rates typically between 1 and 5 cm per year in cultivated European peatlands (Tiemeyer et al., 2020). The carbon released by this process enters the atmosphere as CO₂ at rates that can reach several tonnes of carbon per hectare annually, year after year, for as long as drainage is maintained.

The scale of this problem across Europe has only recently been quantified at high resolution. A 2025 analysis published in Nature Communications mapped GHG emission hotspots from drained EU peatlands and found that annual emissions amount to between 59 and 113 million tonnes of CO₂-equivalents that are absent from or substantially underreported in national UNFCCC submissions. Ukraine is not included in this analysis. But the drained Polissia peatlands share their genesis, peat type and drainage history with the systems studied in Poland and the Baltic states, where the emissions data are among the most significant in the dataset.

Peat fires constitute an additional pathway of carbon loss. Drained peat ignites readily – it is, after all, a form of incompletely transformed fuel. Peat fires burn underground, slowly, and are extremely difficult to extinguish. The abandonment of former agricultural peatlands in the NWR – a process that accelerated after 1991 and continued unevenly through the 2000s – has left extensive areas of dry, unmanaged organic soil that are vulnerable during drought years. A single fire event can release in days or weeks the carbon that accumulated over centuries (Page et al., 2002). That carbon does not return on any human timescale.

Carbon Management and Sustainable Development Implications

The 2013 IPCC Wetlands Supplement was the first attempt to provide standardized methods for counting GHG emissions from organic soils in national inventories – and it changed how drained peatlands are reported, moving them from a land-use category to an emissions source. The EU's LULUCF regulation built on this, and the obligation to report organic soil emissions now extends progressively to candidate countries as well. Ukraine is not exempt from this direction: the 2024 Law on Basic Principles of Climate Policy sets up an Emissions Trading System, with a pilot starting in 2026.

For the NWR, the simplest starting point is keeping intact systems intact. The wetland complexes of Prypiat-Stokhid National Nature Park, Rivne Nature Reserve and adjacent protected areas hold their carbon as long as drainage is not pushed further into them. These peatlands represent some of the largest terrestrial carbon reservoirs in Ukraine.

Where degradation has already occurred, managed rewetting is the established restoration approach. Paludiculture – cultivation of wetland-adapted species such as Sphagnum, reed, and cattail on rewetted peat soils – is increasingly discussed in Central and Eastern European contexts as a way to reduce GHG emissions while maintaining some economic productivity on land that is no longer viable for conventional agriculture.

An additional aspect relevant to this conference concerns geomechanical stability. Peat subsidence – the loss of surface elevation that follows drainage – reduces bearing capacity and creates differential settlement in roads, hydraulic structures and embankments across the Polissia lowlands. The carbon loss and the mechanical instability are not separate issues; both come from the same process of aerobic peat decomposition. Maintaining higher soil moisture simultaneously improves geotechnical stability and reduces carbon losses.

Conclusions

Peatland geosystems of the NWR play an important role in regional carbon storage and greenhouse gas regulation, and have been substantially altered by 20th-century drainage whose consequences are still unfolding. The main conclusions are presented below.

1. Eutrophic peatlands of the Polissia zone store an estimated 150–300 t C/ha in partially decomposed organic matter, with peat depths reaching 2–3 metres in the inter-drainage depressions of Volyn and Rivne oblasts and in the floodplains of the Horyn and Styr rivers. Systematic regional inventory data are not yet available.
2. Under natural waterlogged conditions, these systems tend toward net carbon accumulation over long timescales, despite simultaneous CH₄ emissions. Water table position is the dominant control: a drop of even 20–30 cm triggers a shift from CO₂ sink to CO₂ source through activation of aerobic decomposition.
3. Large-scale drainage during the Soviet period transformed significant areas of NWR peatlands from carbon sinks into chronic GHG sources. The oxidative loss of peat carbon is ongoing and cumulative, and is not offset by the agricultural productivity of drained organic soils.
4. N₂O emissions from nitrogen-rich NWR lowland peats under partial drainage conditions are not currently quantified in national GHG reporting – a gap that likely results in systematic underestimation of total GHG contributions from drained organic soils in Ukraine.
5. Abandoned drained peatlands in the NWR are at elevated fire risk during drought years. Peat fire events release centuries of accumulated carbon within days and leave no possibility of recovery at human timescales.
6. Conservation of intact peatland geosystems and managed rewetting of degraded areas represent the most effective land-use interventions for climate mitigation in the NWR – with co-benefits for regional hydrology, biodiversity, and the geomechanical stability of peat-underlain infrastructure.

REFERENCES

1. Vozniuk S.T., Moshynskiy V.S., Klymenko M.O. et al. (2017). Torfovo-zemelnyi resurs Pivnichno-Zakhidnoho rehionu Ukrainy [Peat-land resource of the North-Western Region of Ukraine]. Rivne: NUVHP, 117 p. [in Ukrainian]
2. Darusman T., Murdiyarso D., Impron, Anas I. (2023). Effect of rewetting degraded peatlands on carbon fluxes: a meta-analysis. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 28(3), 10. <https://doi.org/10.1007/s11027-023-10046-9>
3. Fluet-Chouinard E. et al. (2023). Extensive global wetland loss over the past three centuries. *Nature*, 614, 281–286. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05572-6>
4. Hugelius G. et al. (2020). Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw. *PNAS*, 117(34), 20438–20446. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117>
5. IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to AR6*. Cambridge University Press.
6. Koch J. et al. (2023). Water-table-driven greenhouse gas emission estimates guide peatland restoration at national scale. *Biogeosciences*, 20, 2387–2403. <https://doi.org/10.5194/bg-20-2387-2023>
7. Leifeld J., Menichetti L. (2018). The underappreciated potential of peatlands as a nature-based climate solution. *Nature Communications*, 9, 1071. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>
8. Loisel J. et al. (2021). Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. *Nature Climate Change*, 11, 70–77. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>
9. *Nature Communications* (2025). Identifying hotspots of greenhouse gas emissions from drained peatlands in the European Union. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-65841-6>
10. Page S.E. et al. (2002). The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 420, 61–65. <https://doi.org/10.1038/nature01131>
11. Tiemeyer B. et al. (2020). A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories. *Ecological Indicators*, 109, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>
12. IPCC (2014). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Geneva: IPCC.

ЕКСПЕРИМЕНТ ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА ОБЕМА НА МЕЛНИЧЕН ОСТАТЪК ПОДАВАН ЗА ПОВТОРНО СМИЛАНЕ

Цветан Дилов - Главен експерт, геотехнически дейности
„Елаците-Мед“ АД, Мирково 2086, Софийска област, tz.dilov@ellatzite-med.com
Иванина Сергеева - Минералог
„Елаците-Мед“ АД, Мирково 2086, Софийска област, i.sergeeva@ellatzite-med.com

ABSTRACT

The refuse from grinding process at mining companies is part of the valuable ore – non-waste material. It has to be refed for grinding, so that particles reach the size ready for flotation. Significant part of non-ground refuse continues not to be ground. With the help of a recycling and sorting company we would perform an experiment aiming at minimizing the volume of the refed for grinding refuse. It would save certain power consumption. With this article we describe the experimental features. In case of success, a subsystem in the grinding process would be built, for less secondary grinding of the refuse.

ВЪВЕДЕНИЕ

Процесът на смилане е неотменна част на флотацията за извличане на метали. Целта на тази подготовка на рудата е да бъде доведена до размери на частиците, които отговарят на размерите на всички важни метални минерали, допринасящи до производството на крайния концентрат. В общият случай една част от подаваната за смилане руда не може да бъде смляна до желанния размер и известен тегловен обем се изхвърля извън мелниците като отпадък. Смляната руда се подава за повторната флотация. Несмленият отпадък на практика излиза с приблизително същите размери както на хранящите мелници руда. Този „отпадък“ всъщност не е никакъв отпадък, а продължава да е руда със същото качество както на подавания за смилане материал.

Мелничният „отпадък“, наричан още скрап, не се депонира на някакви насипища, а се подава за повторно смилане. Проблемът се появява, когато тези повторно подадени за смилане зърна в голямата си част излизат отново несмлени. Така те се движат в постоянен кръг и изразходват ненужно количество електроенергия за обработка.

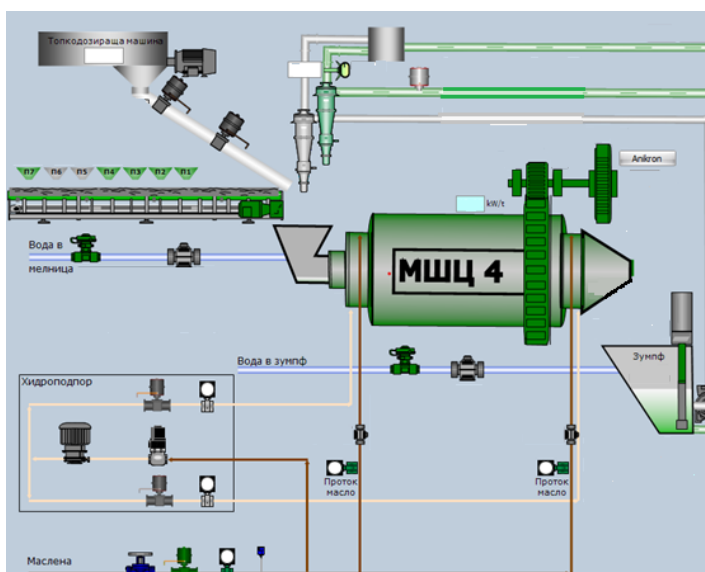
С настоящата работа търсим да дефинираме, оценим и предложим евентуално решение на проблема – да се минимизира количеството на отпадъка-скрап, да се намали количеството на повторно несмлени материал и в крайна сметка да се спести ненужното използване на допълнителна електроенергия.

Използваният подход е чрез сортиране на несмлени едри рудни зърна. Настоящата работа не се занимава с основните причини за това явление, такива като: 1) Ускорено износване на топковия товар и вътрешните брони на мелницата; 2) Загуба на високия релеф на броните; 3) Неподходяща реология и небалансирана плътност на пулпа подложен на смилане; 4) Създаване на прекалено вискозно силикатно покритие на стоманените топки и намаляване на тяхната енергия на удар; 5) Мелнично храняване с неподходящ голям размер руда над 25 mm.

ПРОИЗВОДСТВЕНИ ЛИНИИ ЗА СМИЛАНЕ И ТЕХНОЛОГИИ ЗА СОРТИРАНЕ

Мелничният цех на „Елаците-Мед“ е изграден от 12 топкови мелници работещи паралелно. Единадесет от тях са с еднакъв размер (МТЦ 4.5 m x 6 m – диаметър/дължина) и една е с по-малък такъв. Последната предстои да бъде подменена с размер еднакъв с големите.

Всяка мелнична единица се състои от барабанна топкова мелница с централно разтоварване, задвижвана от електромотор. Смленият продукт се подава за класифициране в хидроциклон. Преливният продукт от циклона е готов за храняване към процес флотация, а остатъчният пясък се връща за досмилане. През предния отвор на мелницата се изхвърля несмленият скрап, който се събира и връща в мелниците за досмилане. Пример за организацията на един мелничен агрегат е показан схематично на Фигура 1.



Фигура 1. Схематична организация на компонентите на един мелничен агрегат

Консумацията на една мелнична единица е от порядъка на 2.3 MWh. Процентът от постоянно подаване на скrapта за досмилане реализира ненужна консумация на електроенергия. Ако този процес бъде минимизиран, консумацията на електроенергия ще бъде оптимизирана.

Съвременните технологии за сортиране на материали се използват интензивно в хранително-вкусовата индустрия (сортиране на узрели плодове и зеленчуци, вкл. сортиране по размер и цвят) и във фармацевтичната индустрия (сортиране на хапчета).

През последните десетина години сортировъчната технология навлиза и в минната индустрия. Известно е изключително успешно сортиране на скална маса за добив на необработени диаманти с големи размери чрез трансмисионна рентгенография (Caesar, 2020). Този реализиран проект в диамантена мина в Ботсуана успешно е селектирал само за последните десетина години 7 от 10-те най-големи необработени диаманти досега, изобщо от цялата минна дейност за добив на диаманти в света.

МЕТОДОЛОГИЯ

Несмлени едри зърна от мелничния процес са с размери около 2 cm. Те са изградени предимно от гранодиоритова, хорнфелзова и шистова скала. Като основен източник на ценните рудни минерали, тези скални зърна остават да бъдат руда, отговаряща на нужните концентрации на ценни метали (Фигура 2а).



Фигура 2. Отляво надясно: а) несортиран скrap – несмлени зърна с размери около 2 cm, подаван за повторно смилане; б) сортиран скrap – стерил; в) сортиран скrap – руда; г) стрит скален материал, подготвен за химически анализ и бърза трансмисионна рентгенография

Настоящата работа описва предварителната подготовка на несмлени скални зърна за да бъдат подложени на сортировъчния опит чрез трансмисионна рентгенография. Необходимото количество за лабораторен тест за сортиране е около 100 kg. В допълнение е необходимо определено количество сортиран материал, определен като руда и стерил.

От транспортната лента за мелничен отпадък (скрап) е събрана композитна проба от несмлени зърна в продължение на пет дни (27 февруари, 2 март, 4 март, 5 март и 6 март, 2026 г.), от 15 до 30 kg материал за всеки опробван ден и с общо тегло суха проба от 103 kg. Пробата е измита за премахване на фините частици и изсушена в сушилня при 105 °C. Една представителна част от композитната проба е прегледана под стерео микроскоп-бинокуляр, с общо тегло от 65.5 kg. Материалът е визуално сортиран на зърна „стерил“ (Фигура 2б) и зърна „руда“ (Фигура 2в). Това визуално сортиране е само въз основа на наличие/липса на рудни минерали по повърхността на зърното, като е държана сметка за наблюдение на халкопирит. Пиритът е считан за безруден минерал. Сортираните зърна като „стерил“ не е задължително наистина да се окажат безрудни – възможно е във вътрешността на зърното да има рудни минерали. Средното количество по дни на стерилните зърна от сортирания материал е 4.34%.

На Фигура 3 е представена схематична блок диаграма за процеса на подготовка на материала и неговите анализи.

Количествени данни за всеки ден на опробване са представени на Таблица 1.

Втора част от всяка от дневните проби е натрошена в челюстна трошачка, след което е обработена в дискова трошачка за постигане на зърна от милиметров размер. Накрая материалът е стрит до фини частици в лабораторна топкова мелница (Фигура 2г). Количества между 100 g и 120 g са предадени за химичен анализ за елементи (метали и неметали). Анализите са за следните елементи: Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, W, Hg, Pb, Bi, Th, U, и групово леки елементи (35 компонента).

От пробата за всеки ден са отделени около 100 зърна стерил и 500 зърна руда. Заедно с част от стритите проби, те са подложени на бърза трансмисионна рентгенография с полеви рентгенометър, модел Vanta Handheld XRF Analyzer на Olympus.

По-долу са представени количествените резултати от химическите анализи (Таблица 2) и бързата трансмисионна рентгенография (Таблица 3) на пробите.



Фигура 3. Блок диаграма за процеса на подготовка на пробата и провеждане на анализи

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

Тук са представени предварителните количествени данни за визуалното ръчно сортиране на пробите - „стерил“ и „руда за досмилане“, химическите анализи стритите проби и бързата трансмисионна рентгенография.

Таблица 1. Количествена информация за ръчно сортирания материал под микроскоп

Проба №	Дата	Тегло, kg	Стерил, kg	Руда, kg	% Стерил
1	27.02.2026	12.742	0.645	12.097	5.06
2	02.03.2026	9.539	0.435	9.104	4.56
3	04.03.2026	8.169	0.493	7.676	6.04
4	05.03.2026	15.673	0.458	15.215	2.92
5	06.03.2026	19.505	0.605	18.900	3.10
Дневно средно % Стерил				4.34	
Проба №	Дата	Влажна руда, kg	Суха руда, kg	Влажност, %	Инспектиран материал, %
1	27.02.2026	19.372	18.492	4.54	68.91
2	02.03.2026	21.276	20.286	4.65	47.02
3	04.03.2026	30.264	29.462	2.65	27.73
4	05.03.2026	16.428	15.673	4.60	100.00
5	06.03.2026	20.433	19.505	4.54	100.00
		Всичко, kg	103.418		

Химическите анализи на ръчно сортирания материал показват, че човешкото око не е задължително да успее да разграничи руда от стерил, дори под микроскопско стерео увеличение. За Проба №1 съдържанието на Си е значително по-високо в сортирания стерил от това при рудата. Проба №5 показва сходна ситуация, но не толкова силно изразена. Проба №2 е с идентични съдържания на Си при руда и стерил, докато Проби №3 и 4 са с ясно изразени съдържания на Си в повече при рудните зърна. Разликите в съдържанията на Мо, нежелано Fe, Au и Ag не са статистически значими.

Таблица 2. Химически анализи на дневните проби по главните метални елементи, окисна мед и нежелано желязо

Стрит материал № / дата	Руда (1)/ Стерил (2)	Cu, %	Mo, %	Fe, %	CuO, %	Au, g/t	Ag, g/t
№1 /27.02.2026/	1	0.032	0.0026	2.52	0.006	< 0.030	0.50
	2	0.116	0.0037	2.63	0.002	< 0.030	0.55
№2 /02.03.2026/	1	0.054	0.0026	2.45	0.002	< 0.030	< 0.50
	2	0.068	0.0025	3.34	0.002	< 0.030	0.55
№3 /04.03.2026/	1	0.150	0.0044	2.86	0.002	0.059	0.61
	2	0.019	0.0025	3.10	0.001	< 0.030	< 0.50
№4 /05.03.2026/	1	0.205	0.0028	3.09	0.001	0.091	0.67
	2	0.012	0.0025	2.51	0.001	< 0.030	< 0.50
№5 /06.03.2026/	1	0.171	0.0033	2.82	0.001	0.054	0.64
	2	0.218	0.0041	3.37	0.006	0.056	0.74

Лабораторният тест ще използва автоматична система за сортиране чрез трансмисионна рентгенография. Този метод се очаква да даде ясна тримерна картина за количеството рудни минерали в отделните зърна. Технологиите на компанията, която ще проведе опита се очаква да използва усъвършенстван софтуер за разпознаване на изображения, в този случай и тримерни такива. Последното може значително да подобри неясните резултати от ръчно сортиране. При всички случаи можем да считаме за надеждно ръчното сортиране на Проби №3 и 4, което ще е своеобразен тест дали технологията ще бъде приложима за условията на производствения процес на „Елаците-Мед“. Проведената бърза трансмисионна рентгенография с полеви рентгенометър показва доста сходни резултати с тези от химическия анализ на отделните дневни проби. Това затвърждава констатацията, че Проби №3 и 4 са надежден индикатор за евентуалния успех на лабораторния тест. Нежеланото желязо тук отново не показва статистически различни руда от стерил при сортирания материал.

Таблица 3. Бърза трансмисионна рентгенография на несмлени зърна (руда и стерил) – метални съдържания

Стрит материал № / дата	Руда (1)/ Стерил (2)	Cu, %	Mo, %	Fe, %	Ag, g/t
№1 /27.02.2026/	1	0.031	0.0010	2.26	
	2	0.064	0.0019	2.30	
№2 /02.03.2026/	1	0.052	0.0008	2.22	
	2	0.066	0.0006	2.85	
№3 /04.03.2026/	1	0.135	0.0016	2.41	14
	2	0.021	0.0007	2.61	14
№4 /05.03.2026/	1	0.185	0.0015	2.44	
	2	0.012	0.0007	2.19	22
№5 /06.03.2026/	1	0.159	0.0018	2.52	18
	2	0.198	0.0023	2.71	

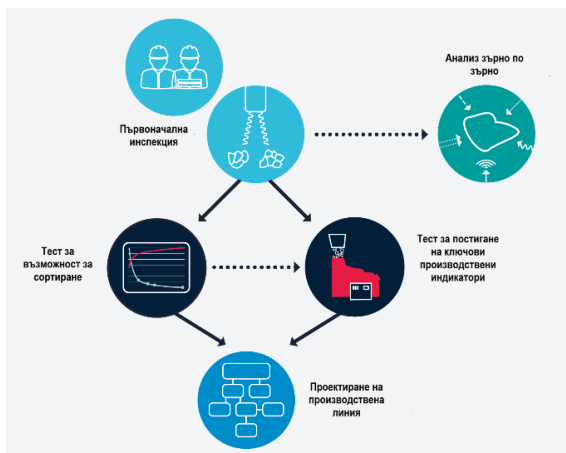
ПРЕДЛОЖЕНИЕ ЗА ВЪВЕЖДАНЕ В ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА ПОДСИСТЕМА НА ПРОЦЕСА НА СМИЛАНЕ

Чрез контролните химически анализи на Проби №3 и 4 ще се следи дали ще има реален ефект от автоматичния процес. Данните от експеримента ще се използват за оценка на възможното спестяване на електроенергия от целогодишния мелничен процес. Минималният очакван резултат би бил отделяне на около 4.5% от несмлени зърна, което при годишната производителност на мелничния цех би означавало около 9000 t скален материал, който би се извадил от скрапта подавана за досмилане. Всякакви резултати над тези нива биха били допълнителен стимул за въвеждане в експлоатация на подсистема за автоматично сортиране чрез трансмисионна рентгенография. Чрез периодичен контрол с химически анализи че може да се гарантира, че действително от скрапта за повторно смилане се изваждат стерилни зърна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И БЪДЕЩА РАБОТА

С настоящото изследване се доказва възможен потенциал за икономическа целесъобразност от въвеждане в експлоатация на подсистема за автоматично сортиране чрез трансмисионна рентгенография. Проведеното ръчно сортиране под стерео микроскоп-бинокуляр констатира значимост в разликите на концентрациите за Cu в сортираните зърна руда и стерил, с явен превес при рудата в Проби №3 и 4. Това ще бъде използвано за контрол на лабораторния автоматичен тест. При успешен лабораторен тест се очаква да бъде проведен пилотен производствен тест с детайлна оценка за цена/полза на/от въвеждане в експлоатация на подсистема за автоматично сортиране чрез

трансмисионна рентгенография. Ще бъде следена зърнометрията на захранвания материал, количествата сортиран материал и неговите метални съдържания, съответно и нивата на извличане на ценни метали в тези компоненти – било то оставащи във веригата на флотация или изваждани от нея. На Фигура 4 е показана последователността от въвеждане в експлоатация на подобна система.



Фигура 4. Последователност за оценка на постижимост и предварително проектиране на производствена линия (Anonymous, 2026)

БЛАГОДАРНОСТИ

Инж. Петрослав Петров спомогна за реализирането на настоящата статия с експертизата си и управлението от него полеви рентгенов анализатор. Инж. Александър Димитров съдейства за представяне на технологичната компоновка на един мелничен агрегат.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. Anonymous, 2026, Test work – Description and Instructions, Anonymous Company.
2. Caesar, E., 2020, THE ROCK - A company set up by a female diamond hunter is finding some of the biggest uncut gems in history, *The New Yorker*, Vol. 95, No. 47, pp. 32-45.

ЕТИЧНИ ПОСЛАНИЯ ЗА ЧОВЕШКОТО ПОВЕДЕНИЕ В УСЛОВИЯТА НА ОБЩЕСТВЕНИЯ И ДИГИТАЛНИЯ ПРЕХОД

Веселина Александрова, доц. д-р*, Ваня Тагарева, д-р**, Виолета Василева, д-р***
*Военна академия "Г. С. Раковски", v.gagamova@rndc.bg, **Столичен общински съвет,
Университет за национално и световно стопанство, vtagareva@abv.bg, ***XU Exponential
University of Applied Sciences, violetta.ziv@gmail.com

ETHICAL CONSIDERATIONS FOR HUMAN BEHAVIOUR IN TERMS OF SOCIAL AND DIGITAL TRANSITION

Veselina Aleksandrova, Assoc. Prof., PhD*, Vanya Tagareva PhD**, Violeta Vasileva, PhD***
*Rakovski National Defence College, v.gagamova@rndc.bg, ** Sofia Municipal Council, University of
National and World Economy, vtagareva@abv.bg, ***XU Exponential University of Applied Sciences,
violetta.ziv@gmail.com,

ABSTRACT

This paper examines the role of universal moral values in shaping ethical behaviour during the social and digital transition. Drawing on the ideas of renowned philosophers, scholars, and public figures, it identifies principles that support the development of ethical culture within the information society, e-government, and ethical governance in the cyber environment. Particular attention is paid to the ethical challenges associated with artificial intelligence, including transparency, fairness, protection of fundamental rights, and human oversight in the use of intelligent digital systems. The paper argues that integrating traditional moral values with the principles of cyber ethics and AI ethics is essential for building a sustainable, secure, and human-centred digital society.

Keywords: ethics, cyberethics, information society, digital transition, values, ethical behavior.

1. Въведение

Съвременното общество преминава през динамични социални и технологични промени, които оказват влияние върху начина на живот, комуникацията и ценностната система на хората [1]. Дигитализацията и развитието на информационните технологии създават нови възможности, но едновременно с това пораждат и нови етични предизвикателства. В тази среда значението на нравствените принципи, обществената отговорност и културата на поведение придобива особена актуалност.

Настоящият доклад разглежда универсалните етични послания като средство за формиране на поведение, основано на уважение, доверие, отговорност и справедливост, които са фундаментални както за реалната, така и за виртуалната среда. В доклада се анализира ролята на универсалните философски нравствени ценности и тяхното значение за формирането на етично поведение в условията на обществения и дигиталния преход. На основата на мисли и послания на световно признати философи, учени и общественици се извеждат принципи, които могат да бъдат използвани при изграждането на етична култура в съвременното информационно общество, при развитието на електронното управление и при разработването на концептуални модели за етично управление в киберсреда. Специално внимание е отделено на етичните предизвикателства, произтичащи от навлизането на технологиите, базирани на изкуствен интелект, необходимостта от прозрачност, справедливост, защита на основните права и човешкия надзор при използването на интелигентни цифрови системи. Обосновано е становището, че съчетаването на традиционните нравствени

ценности с принципите на киберетиката и етиката на изкуствения интелект е ключова предпоставка за изграждане на устойчиво, сигурно и ориентирано към човека дигитално общество [4].

2. Етичните ценности като основа на общественото развитие

Още от възникването на човешката цивилизация нравствените ценности са възприемани като фундамент за развитието на обществото и за изграждането на устойчиви взаимоотношения между хората. Независимо от различията между отделните култури и исторически епохи, честността, справедливостта, уважението, умереността, отговорността и стремежът към знание неизменно присъстват сред основните добродетели, определящи развитието на личността и обществото. Именно тези универсални ценности формират моралната основа на съвременните демократични общества и намират своето отражение в концепциите за етично управление, киберетика и отговорно използване на цифровите технологии.

Значението на знанието като основа на нравственото развитие е подчертано още от античните мислители. **Платон** определя книгата като „ням учител“, а **Цицерон** отбелязва, че „Дом без книги е като тяло, лишено от душа.“, Книгата те кара да мислиш преди да действаш, той, казва, че „Да живееш, значи да мислиш“. Мисълта е предпоставка за успех, а успехът прави хората добри „Между добрите хора, всичко се нарежда добре“, допълва Цицерон. Не случайно в сборника „Мъдростта на вековете“ знанието е представено не само като средство за интелектуално развитие, а като основа за нравствен избор и обществена отговорност. Както отбелязват авторите, **„истинската мъдрост се проявява тогава, когато знанието служи на човека и на обществото“**. Това разбиране съответства на съвременните концепции за етично използване на цифровите технологии и изкуствения интелект, при които технологичният напредък следва да бъде подчинен на човешките ценности. **Томас Едисон** допълва, че най-важната задача на цивилизацията е да научи човека да мисли [8]. Тези мисли показват, че образованието не се изчерпва с придобиването на знания, а включва изграждането на ценностна система и чувство за обществена отговорност. В контекста на информационното общество тези послания придобиват нов смисъл [2]. Днес книгата има своя цифров еквивалент – електронните библиотеки, научните бази данни и интелигентните информационни системи. Независимо от формата обаче знанието остава основната предпоставка за изграждане на морално отговорни личности и за вземане на етични решения.

В информационното общество ролята на знанието придобива още по-голямо значение. Огромният обем информация, достъпна чрез интернет и цифровите технологии, създава нови възможности за обучение и научно развитие, но същевременно поставя въпроса за способността на човека да различава достоверната информация от манипулацията, фактите от дезинформацията и знанието от мнението. Следователно съвременната дигитална грамотност трябва да бъде съчетана с нравствена култура, критично мислене и чувство за обществена отговорност. **Конфуций** свързва доброто управление с личната нравственост на човека, а **Сократ** приема самопознанието като първа стъпка към мъдростта.

Съвременните концепции за етика на изкуствения интелект стъпват върху същите принципи. Независимо, че алгоритмите подпомагат вземането на решения, моралната отговорност остава човешка. Ето защо международните организации поставят в основата на развитието на изкуствения интелект принципите на прозрачност, справедливост, отчетност, защита на човешките права и човешки надзор. По този начин традиционните нравствени ценности намират своето естествено продължение в съвременната киберетика.

3. Етични предизвикателства в условията на обществения и дигиталния преход

Преходът към демократично общество и пазарна икономика след 1989 г., съчетан с ускореното развитие на цифровите технологии, промени значително обществените отношения, начина на общуване и ценностната система на хората. Наред с положителните процеси се наблюдават явления

като намаляване на общественото доверие, отслабване на междуличностната солидарност, агресивно поведение, разпространение на дезинформация и език на омразата както в реалната, така и във виртуалната среда.

Общественият и дигиталният преход поставя нови етични предизвикателства, свързани с промяната: дигитализацията; социалните мрежи; изкуственият интелект; кризата на доверието; дезинформацията; езикът на омразата; киберрисковете.

Преходът към информационно общество променя начина на общуване, работа и управление. Наред с положителните процеси се наблюдават явления като: намаляване на общественото доверие; агресия в публичното и онлайн пространството; отслабване на уважението към институциите; дефицит на гражданска и дигитална култура. Тези процеси показват, че технологичното развитие не може да бъде устойчиво без паралелно развитие на етичната култура.

В условията на тези динамични промени все по-голямо значение придобиват универсалните нравствени ценности, формирани през вековете. Както отбелязва **Конфуций**, „Благородният човек е взискателен към себе си, а посредственият – към другите.“ Това послание подчертава личната отговорност като основа на общественото доверие и етичната култура. В условията на дигиталното общество то придобива ново измерение – всеки гражданин, държавен служител, разработчик на информационни системи и технологии с изкуствен интелект, както и всеки потребител на цифрови услуги, носи отговорност за информацията, която създава, обработва, използва и разпространява, както и за последствията от своите действия в киберпространството.

Идеите на **Конфуций** за личната дисциплина, почтеността и уважението към другите намират естествено продължение в съвременните принципи на киберетиката. В същия дух е и посланието, представено в „**Мъдростта на вековете**“, че „**силата на обществото се измерва не само с неговите технологии, а преди всичко с нравствеността на хората, които ги използват**“. Днес тази идея придобива особено значение, тъй като цифровите технологии и изкуственият интелект не могат сами да гарантират справедливост, прозрачност и доверие. Те остават зависими от човешките решения и моралната отговорност. Етичното поведение в цифровата среда започва не с технологиите, а с ценностите и личния избор на човека. Именно затова развитието на електронното управление, цифровите обществени услуги и системите, базирани на изкуствен интелект, следва да бъде съпътствано от високи стандарти за прозрачност, отчетност, справедливост и човешки надзор.

Развитието на технологиите, включително системите с изкуствен интелект, не отменя необходимостта от спазване на фундаменталните етични принципи. Напротив, колкото по-сложни стават технологичните решения, толкова по-важно става те да бъдат изградени и използвани в съответствие с принципите на почтеност, справедливост, отчетност, прозрачност и човешки надзор. Именно поради това универсалните нравствени послания на философите и мислителите от различни епохи продължават да бъдат актуални и днес, като предлагат ценностна основа за изграждането на етично поведение и отговорно управление в съвременната киберсреда.

Динамиката на цифровите комуникации поставя въпроса за отговорността на словото. Социалните мрежи и електронните медии предоставят възможност за свободно изразяване на мнение, но същевременно улесняват разпространението на невярна информация, манипулации и език на омразата. Още **Хораций** предупреждава, че „*Веднъж изпусната, думата назад не се връща*.“ Днес тази мисъл има още по-голяма тежест, тъй като всяко публикувано съдържание може за секунди да достигне до милиони потребители и да окаже трайно въздействие върху общественото мнение.

В същия контекст актуално звучи и разбирането на **Плутарх**, че човек има „две уши и един език“, за да слуша повече, отколкото говори. В дигиталната среда това означава необходимост от критично мислене, проверка на фактите и уважение към различните гледни точки. Отговорното общуване е предпоставка за изграждане на доверие, както между отделните граждани, така и между обществото и публичните институции.

Друг сериозен **проблем** на дигиталния преход е **загубата на мярката** при използването на технологиите. Неограниченият достъп до информация, социалните мрежи и системите с изкуствен интелект създават предпоставки за информационно пренасищане, зависимост от цифровите технологии и затруднения при разграничаването на достоверната информация от манипулативното съдържание. В тази връзка предупреждението на **Демокрит**, че *„Прехвърлиш ли мярката и най-приятното става неприятно“*, остава напълно актуално и днес. Това послание има особена актуалност в съвременната дигитална среда, където липсата на умереност при използването на социалните мрежи, цифровите технологии и системите с изкуствен интелект, може да доведе до зависимост, разпространение на невярна информация и нарушаване на личното пространство. Следователно **умереността** следва да се разглежда като основен принцип на етичното поведение както в реалния, така и във виртуалния свят. Тя следва да се разглежда като фундаментален принцип на дигиталната култура и на отговорното използване на информационните технологии[5] .

Съществено място сред етичните предизвикателства заема и развитието на изкуствения интелект. Все по-често алгоритмите подпомагат или автоматизират процеси, свързани с анализ на данни, административни услуги, подбор на информация и вземане на решения. Това поставя въпроси относно прозрачността на алгоритмите, недопускането на дискриминация, защитата на личните данни и необходимостта от човешки контрол върху автоматизираните решения [3]. Независимо от степента на технологично развитие, моралната отговорност остава отговорност на човека. Поради това съвременните принципи на етиката на изкуствения интелект – прозрачност, отчетност, справедливост и човешки надзор – могат да бъдат разглеждани като естествено продължение на универсалните нравствени ценности, формирани през вековете.

Особено значение за публичната администрация има въпросът за лидерството и личния пример. **Лев Толстой** отбелязва, че *„Всеки мисли как да промени света, но никой не мисли как да промени себе си.“* Това послание подчертава, че етичното управление започва от личната почтеност, професионалната компетентност и готовността за поемане на отговорност. В условията на електронното управление доверието към институциите зависи не само от технологичните решения, но и от поведението на хората, които ги създават и използват. Тези идеи показват, че устойчивото обществено развитие започва не толкова с промяната на законите, колкото с изграждането на морално отговорни личности.

Особено важни стават принципите на умереност, уважение и отговорност при публичната комуникация. Мъдростите на **Питагор** за мярката (*„Ако можеш да си орел, не се напъвай да си пръв сред гаргите“*). *„Колкото и да са кратки думите да и не, те изискват най-сериозният размисъл“*, *„Спестявайте сълзите на децата си, за да могат някога да ги леят на гроба ви“*, *„Шегата, подобно на солта, се използва умерено“*), на Солон (*„Приемай в ръцете си власт само тогава, когато се научиш да прощаваш“*.) за прощката и на **Махатма Ганди** за силата на помирението (*„Слабите не могат никога да простят. Прощката е качество на силните“*) показват, че устойчивите обществени отношения могат да бъдат изградени единствено върху взаимно уважение и диалог. Същите принципи следва да бъдат прилагани и при електронното управление, където общественото доверие е основна предпоставка за успешното функциониране на цифровите публични услуги.

Съществено значение има и разбирането за лидерството като морална отговорност. Според **Махатма Ганди** истинското лидерство означава да умееш да се разбираш с хората, а щастието настъпва тогава, когато мислите, думите и действията са в хармония. **Омир** допълва, че добрият управник е този, който умеє да ръководи, а не само да упражнява власт. В условията на дигиталната администрация тези принципи означават прозрачност при вземането на решения, отчетност пред обществото и защита на общественния интерес. Съвременните комуникации изискват не само технологични умения, но и висока култура на диалог. **Никола Тесла** отбелязва, че неразбирателствата между хората често произтичат от неспособността да се оцени гледната точка на другия. В условията на глобалната цифрова свързаност тази идея придобива особено значение, тъй като изграждането на

доверие, толерантност и уважение към различните мнения е ключова предпоставка за устойчивото развитие на информационното общество.

Следователно общественят и дигиталният преход не следва да се разглеждат единствено като процес на технологична модернизация. Те представляват преди всичко ценностна трансформация, която поставя човека в центъра на цифровото развитие. Универсалните нравствени послания, достигнали до нас чрез философи, учени и общественици, не губят своята актуалност. Напротив, те придобиват ново значение като основа за изграждането на киберетика, етика на изкуствения интелект и концептуални модели за етично управление в съвременната киберсреда. Именно върху тези принципи могат да бъдат изградени устойчиви механизми за обществено доверие, прозрачност, отговорност и защита на човешките права в условията на цифровата трансформация. В таблица 1 е представен вариант на изведените „Универсални нравствени послания, дефинирани като етични принципи и тяхното приложение в съвременната киберетика.

Таблица 1. Универсални нравствени послания и тяхното приложение в съвременната киберетика:

Послание	Етичен принцип	Приложение в киберсредата
Демокрит	Умереност	Отговорно използване на AI и социалните мрежи
Конфуций	Лична отговорност	Етично поведение на държавните служители
Хораций	Отговорност на словото	Противодействие на дезинформацията
Лев Толстой	Личен пример	Етично лидерство
Ганди	Уважение и хармония	Доверие в електронното управление

4. Универсалните послания като модел за етично поведение и управление

Мъдростите се обобщават в следните направления, на базата на които могат да се дефинират принципи на етичното управление: знание и образование; лидерство; справедливост; честност; отговорност; умереност; уважение; комуникация; възпитание; прошка; служене на обществото.

Анализът на универсалните нравствени послания показва, че независимо от историческата епоха те се основават на общи морални ценности, които и днес са актуални за развитието на информационното общество, електронното управление и киберсредата. Макар формулирани в различни исторически периоди, посланията на философи, учени и общественици се допълват и могат да бъдат обединени в система от основни принципи, формиращи концептуалната основа на съвременното етично управление.

Първият принцип е уважението към човешкото достойнство. Той обединява ценностите на уважението към човека, толерантността, прошката, взаимното разбиране и обществената солидарност. Посланията на Конфуций, Махатма Ганди, Плутарх и Никола Тесла показват, че устойчивото общество се изгражда чрез уважение към личността, умение за диалог и приемане на различните гледни точки. В цифровата среда този принцип намира израз в защитата на човешките права, недопускането на дискриминация, етичното използване на технологиите и ориентирания към човека подход при разработването и използването на системи с изкуствен интелект.

Вторият принцип е отговорността и самоконтролът. Той включва личната отговорност за собствените действия, дисциплината, умереността и способността за самоконтрол. Посланията на Конфуций, Демокрит и Лев Толстой подчертават, че всяка обществена промяна започва от личния пример. В условията на цифровата трансформация този принцип означава отговорно използване на

информацията, социалните мрежи и изкуствения интелект, както и поемане на отговорност за последствията от взетите решения.

Третият принцип е справедливостта и прозрачността. Справедливостта е неизменна основа на доброто управление още от античността. Днес тя намира своето продължение в прозрачността на управленските процеси, отчетността на публичните институции и обяснимостта на алгоритмите, използвани при автоматизираното вземане на решения. Етичните стандарти изискват всяко решение да бъде проследимо, аргументирано и подчинено на обществения интерес.

Четвъртият принцип е доверието. Общественото доверие се изгражда чрез честност, последователност и почтеност. Посланията на Хораций за силата на словото и на Плутарх - за умението да слушаме показват, че доверието започва от начина, по който общуваме. В условията на цифровото общество този принцип предполага достоверност на информацията, защита на личните данни, противодействие на дезинформацията и открит диалог между администрацията и гражданите.

Петият принцип е стремежът към знание и непрекъснато усъвършенстване. Платон, Цицерон и Томас Едисон разглеждат знанието като основен фактор за развитието на човека и обществото. В информационната епоха този принцип означава не само придобиване на нови знания, но и развитие на дигитална грамотност, критично мислене и способност за етична оценка на информацията и интелигентните технологии.

Шестият принцип е човешкият надзор върху технологиите. Развитието на изкуствения интелект променя начина на вземане на решения, но не отменя моралната отговорност на човека. Независимо от степента на автоматизация окончателната отговорност следва да остане в ръцете на човека. Поради това системите с изкуствен интелект трябва да бъдат прозрачни, обясними, контролируеми и използвани единствено в съответствие с човешките ценности и основните права.

Седмият принцип е устойчивостта. Той обединява всички останали принципи и отразява стремежа към балансирано развитие на обществото, основано на справедливост, доверие, отговорност и уважение към човека. Устойчивото цифрово развитие предполага технологичните иновации да бъдат съобразени с обществените потребности, етичните норми и дългосрочната защита на човешкото достойнство.

Систематизирането на универсалните нравствени послания в тези седем взаимосвързани принципа показва, че класическите философски идеи запазват своята актуалност и в условията на обществен и дигитален преход. Те могат да бъдат използвани като концептуална основа при разработването на модели за етично поведение и управление в съвременната киберсреда, като същевременно подпомагат изграждането на обществено доверие, ефективно електронно управление и отговорно използване на изкуствения интелект.

5. Приложение на универсалните етични принципи в управлението на съвременната киберсреда

В условията на дигиталното управление етичните принципи придобиват практическо значение при:

- защитата на личните данни;
- прозрачността на административните решения;
- използването на изкуствен интелект;
- електронното управление;
- противодействието на дезинформацията;
- изграждането на обществено доверие;
- етичното лидерство в публичната администрация.

Тези направления формират на концепцията за етично управление на силите и средствата на държавната и местната администрация в съвременната киберсреда.

Развитието на цифровите технологии, електронното управление и системите, базирани на изкуствен интелект, създава нови възможности за повишаване на ефективността на държавната и

местната администрация. Наред с технологичните предимства обаче възникват и редица етични предизвикателства, свързани със защитата на основните права на гражданите, сигурността на информацията, прозрачността при вземането на решения и отговорното използване на интелигентните цифрови системи. В тази среда универсалните нравствени принципи, разгледани в предходните раздели, придобиват конкретно практическо приложение и се превръщат в основа за изграждане на етично управление в киберпространството. Този подход намира отражение и в Регламент (ЕС) 2024/1689 за изкуствения интелект (AI Act), който поставя човека в центъра на разработването и използването на системите с изкуствен интелект. Регламентът изисква прозрачност, отчетност, управление на риска, защита на основните права и ефективен човешки надзор върху високорисковите AI системи. По този начин съвременната европейска нормативна рамка потвърждава универсалната валидност на нравствените принципи, формулирани още от класическите философи и развити в съвременните концепции за киберетика [6][7].

Едно от най-важните направления е **защитата на личните данни и неприкосновеността на личния живот**. Все по-широкото използване на електронни административни услуги, облачни технологии и интелигентни информационни системи изисква от публичните институции да осигуряват високо ниво на информационна сигурност и да гарантират законосъобразното обработване на личните данни. Това предполага не само спазване на нормативните изисквания, но и изграждане на организационна култура, основана на уважение към човешкото достойнство, отговорност и доверие.

Съществено значение има и **прозрачността** на административните решения. Използването на цифрови платформи и автоматизирани системи следва да бъде съпроводено с яснота относно начина на вземане на решения, възможност за проследимост на административните процеси и отчетност на институциите пред обществото. Особено актуално това изискване става при внедряването на системи с изкуствен интелект, чиито алгоритми трябва да бъдат обясними, проверими и свободни от дискриминационни ефекти. Независимо от степента на автоматизация, крайната отговорност за управленските решения следва да остане в ръцете на човека.

Навлизането на изкуствения интелект в публичния сектор поставя нови изисквания към етичното управление. Възникват въпроси, свързани с **алгоритмичната справедливост**, защитата на личните данни, прозрачността на автоматизираните решения и необходимостта от човешки надзор. Поради това прилагането на технологии с изкуствен интелект следва да се основава на принципите на законност, етичност, отчетност, сигурност и защита на основните права на гражданите.

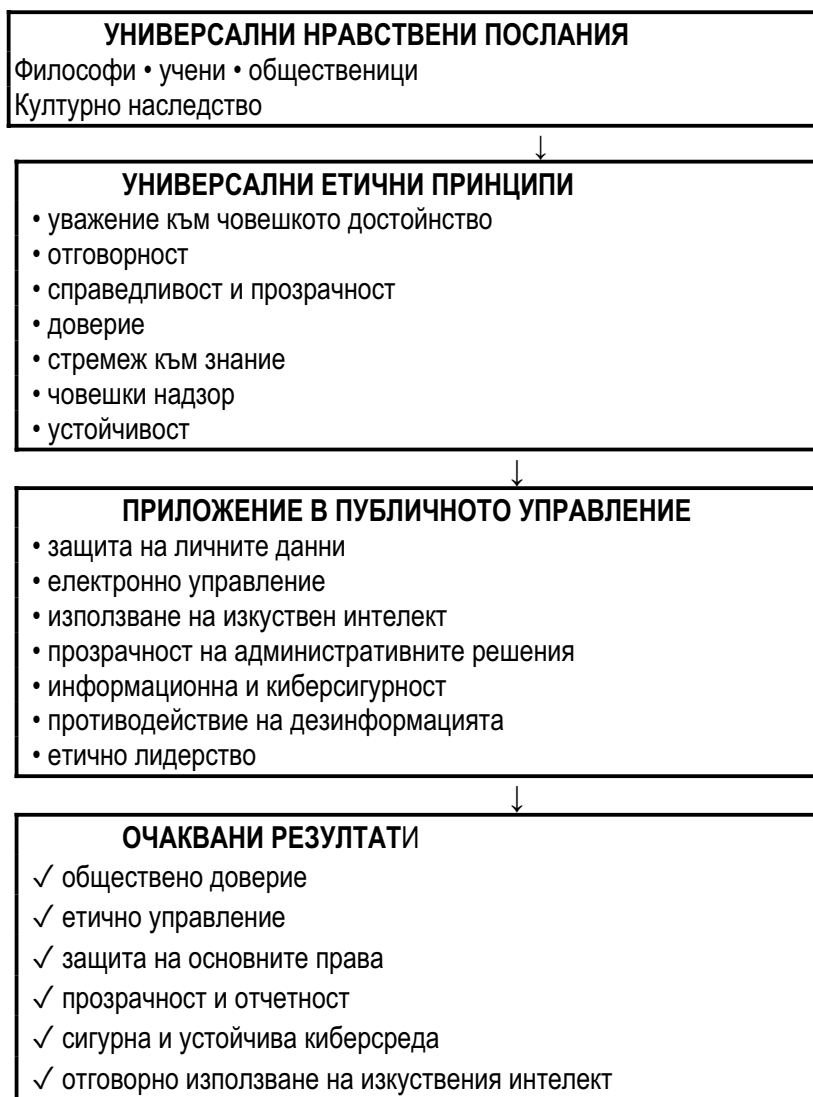
Особено значение за устойчивото функциониране на електронното управление има **противодействието на дезинформацията** и манипулативното съдържание в цифровото пространство. Разпространението на неверни или подвеждащи сведения може да доведе до загуба на обществено доверие, затруднения при вземането на управленски решения и създаване на предпоставки за социално напрежение. Ето защо държавните институции следва да насърчават прозрачната комуникация, своевременното предоставяне на достоверна информация и развитието на дигиталната и медийната грамотност на гражданите.

Не по-малко важно направление е изграждането на обществено **доверие** към цифровите публични услуги. Доверието е стратегически ресурс за успешното функциониране на електронното управление и зависи както от качеството на технологичните решения, така и от почтеността, компетентността и отговорността на служителите в публичната администрация. Само при наличие на прозрачност, справедливост и ефективна защита на информацията гражданите могат да възприемат цифровите услуги като надежден инструмент за взаимодействие с държавните институции.

Следователно важен компонент на етичното управление е и **етичното лидерство** в публичната администрация. Ръководителите следва не само да осигуряват законосъобразното функциониране на организациите, но и да формират организационна култура, основана на професионална почтеност, уважение към човека, социална отговорност и открит диалог. Личният пример, справедливото отношение към служителите, прозрачността при вземането на решения и

готовността за поемане на отговорност създават условия за устойчиво развитие на институциите и повишаване на общественото доверие.

Концептуален модел за приложение на универсалните етични принципи в управлението на съвременната киберсреда е представен на фигура 1. Той включва универсални нравствени ценности, етични принципи (уважение, отговорност, справедливост, прозрачност, доверие, човешки надзор, устойчивост), практическо приложение (AI, електронно управление, защита на данните, противодействие на дезинформацията, етично лидерство).



Фигура 1. Концептуален модел за приложение на универсалните етични принципи

Практическото приложение на универсалните етични принципи в условията на обществения и дигиталния преход не се изчерпва със спазването на нормативните изисквания. То предполага изграждането на цялостна система за етично управление, основана на уважение към човешкото достойнство, справедливост, прозрачност, отговорност, доверие, човешки надзор и устойчивост. Именно тези принципи могат да бъдат разглеждани като концептуална основа за разработването на модел за етично поведение и управление на силите и средствата на държавната и местната администрация в съвременната киберсреда,

Заклучение

Универсалните нравствени послания могат да бъдат разглеждани не само като част от културното наследство на човечеството, но и като методологична основа за разработването на концептуални модели за етично управление в съвременната киберсреда. Именно върху тях могат да се изградят устойчиви механизми за добро управление, обществено доверие и отговорно използване на цифровите технологии и изкуствения интелект в интерес на човека и обществото. Развитието на информационното общество изисква не само технологични иновации, но и висока етична култура, която гарантира устойчивост, обществено доверие и защита на човешките ценности..

Благодарности. Докладът е написан благодарение на финансиране от Министерство на образованието и науката в изпълнение на Националната стратегия за развитие на научните изследвания 2017 – 2030 по Национална научна програма „Сигурност и отбрана“, приета с решение на Министерски съвет № 731 от 21 октомври 2021 г.

Литература

- [1] Алвин и Хайди Тофлър, Революционното богатство, изд. Обсидиан, София 2007.
- [2] Стоянова, Е. Ролята на обучението на служителите по сигурност като проактивен подход за предотвратяване на актове на незаконна намеса в гражданското въздухоплаване. Военен журнал, брой 1/2026, . София: ВА „Г. С. Раковски“, 97 - 107. ISSN (print) 0861-7392; ISSN (online) 2534-8388.
- [3] Стоянова, Е. (2023). Контролът на качеството – основен компонент за ефективното функциониране на системата за сигурност в гражданското въздухоплаване. Военен журнал, 2, 180–192. ISSN 2534-8388
- [4] Стоянова, Е. (2022). Заплахата от вътрешен човек като риск за гражданското въздухоплаване. Военна академия. В Сборник доклади от научна конференция „110 години знания, умения, компетенции“, Военна академия „Г. С. Раковски“, 71–78. ISBN (print) 978-619-7711-03-5, ISBN (online) 978-619-7711-04-2
- [5] Стоянова, Е. (2025). Положителната култура на сигурност, основен фактор за устойчивото развитие на авиационната сигурност в гражданското въздухоплаване. Военна академия. В Сборник доклади от научна конференция „Съвременни аспекти на сигурността - предизвикателства, подходи, решения“, Военна академия „Г. С. Раковски“, Факултет "Командно-щабен", 158-167. ISSN 2738-7526
- [6] Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act) / Регламент (ЕС) 2024/1689 на Европейския парламент и на Съвета от 13 юни 2024 година за установяване на хармонизирани правила относно изкуствения интелект и за изменение на регламенти (ЕО) № 300/2008, (ЕС) № 167/2013, (ЕС) № 168/2013, (ЕС) 2018/858, (ЕС) 2018/1139 и (ЕС) 2019/2144 и директиви 2014/90/ЕС, (ЕС) 2016/797 и (ЕС) 2020/1828 (Акт за изкуствения интелект) (Текст от значение за ЕИП) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/TXT/?uri=CELEX:32024R1689>.
- [7] UNESCO. Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence. Paris, 2021. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380455>.
- [8] Мъдростта на вековете, Мисли, афоризми, крилати изречения и народни мъдрости от 30 столетия, Сборник, Наука и изкуство, 1979 г.

ПОЛИТИКАТА ЗА ЗДРАВЕ, БЕЗОПАСНОСТ И ОКОЛНА СРЕДА

инж. Владислав Стойков
v.stoykov@me.government.bg;

ABSTRACT

The health, safety and environment policy is a priority commitment to protect people and nature. It ensures safe working conditions and reduces the harmful impact on the environment. The goal is to prevent accidents and comply with high environmental and labor standards. On the one hand, the documentation ensures that important information about working conditions is available to all stakeholders in the enterprise and guarantees the commitment of management and employees to implement the measures, and on the other hand, it demonstrates to interested and competent authorities and persons that the provision of healthy and safe working conditions in the enterprise is in accordance with the requirements of the legislation.

Политиката за Здравето, безопасността и околната среда (ЗБОС/HSE) Мотивите за изработването на Политика по ЗБОС са свързани с няколко ключови думи: работещи (работна сила), здраве и работоспособност. Работната сила е гръбнакът на икономиката във всяка държава. Не просто за физическото здраве, а за професионално здраве, целта му е: „превенция и поддържане най-висока степен на физическо, душевно и социално благополучие на работниците от всички професии; превенцията на отклонения в здравето на работниците, причинени от условията им на труд; защитата на работниците в местоработата им от рискове, дължащи се на вредни за здравето им фактори; поставяне и поддържане на работника в работна среда, адаптирана към неговите физиологични и психологични възможности, или обобщено: адаптацията на работата към човека и всеки човек към работата му“.

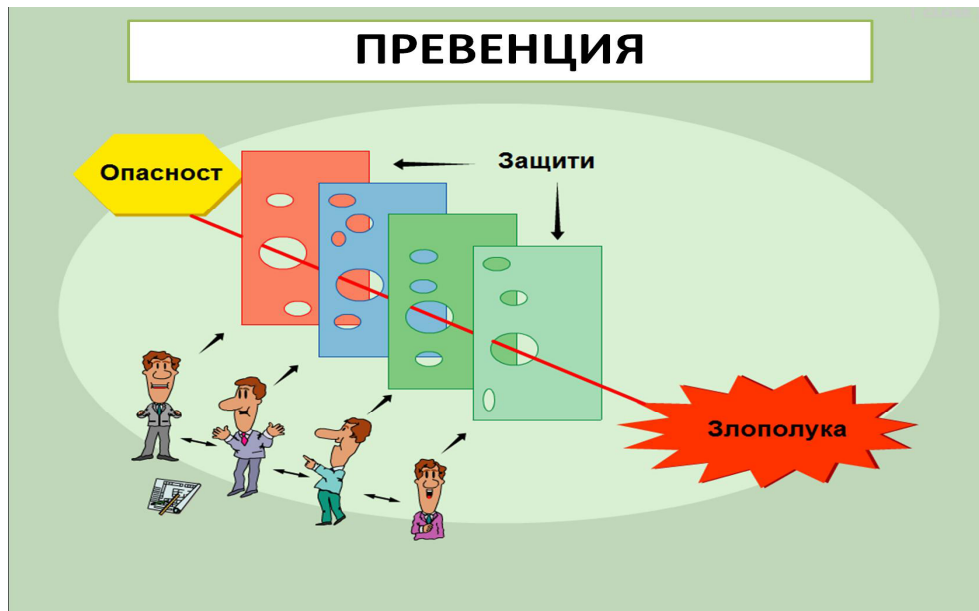
Тази политика се основава на три основни стълба:

1. Здраве и безопасност на работното място:

"Здравословни и безопасни условия на труд" са такива условия на труд, които не водят до професионални заболявания и злополуки при работа и създават предпоставка за пълно физическо, психическо и социално благополучие на работещите лица.



- **Превенция на риска:** „Превенция“ са всички мерки, които се предприемат или планират на всички етапи на работа в предприятието, за предотвратяване, ограничаване и/или отстраняване на професионалните рискове.



- Оценяване и намаляване на опасностите на работното място за недопускане на инциденти, които да доведат до вреда.
- "Опасно събитие" е ситуация, в която човек е изложен на опасност, която довежда до вреда.
 - "Опасност" е възможен източник на вреда.
 - ❖ "Вреда" е физическо нараняване и/или увреждане на здравето.
- "Професионален риск" ("риск") е вероятността от възникване на неблагоприятни последици за здравето и безопасността на работещите лица при конкретно въздействие на вредни фактори при работа и степента на последиците.
-



- ✓ Оценката на риска е задължително изискване на всички системи за управление
 - ✓ Анализ на контекста;
 - ✓ Оценка на риска;
- ✓ Идентификация на ролите и отговорностите (собственици на риска);
 - ✓ Мониторинг и периодичен преглед на рисковете.

Управление на риска – защо!



“... прилагането на управление на риска не гарантира, че ще успеете, но липсата на управление на риска обикновено е добра предпоставка за провал”.

Управление на риска – как?



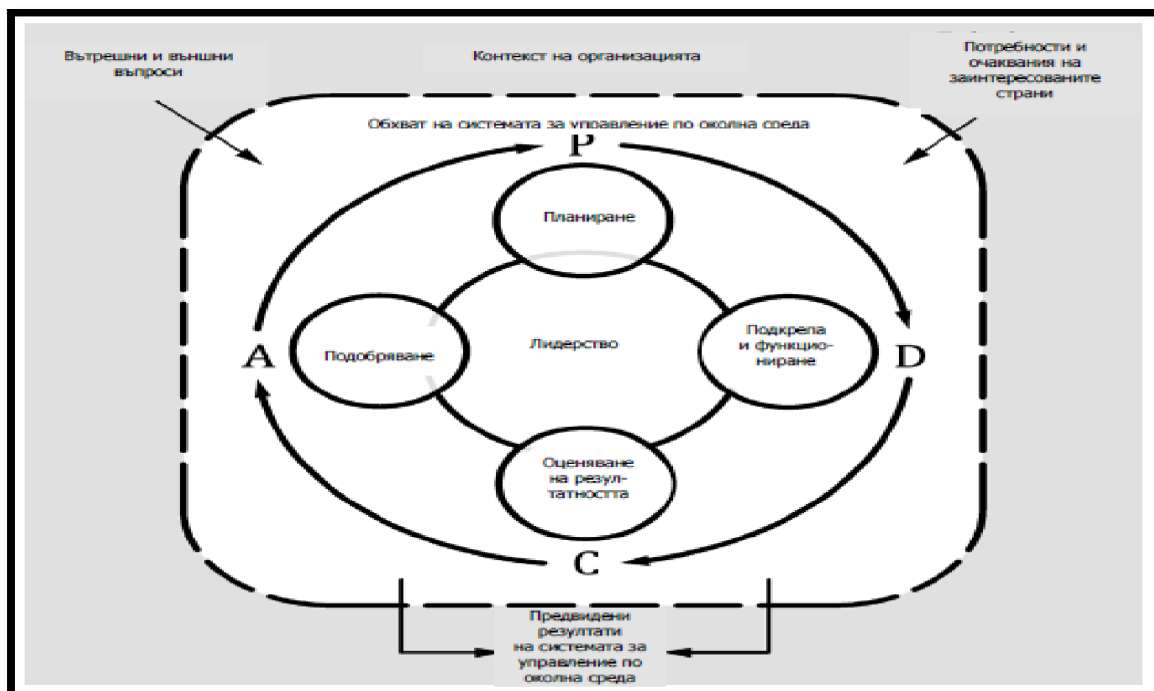
1. Да разберем **кои сме ние, какво правим, как го правим и за кого го правим** (вътрешен контекст);
 2. Да разберем **ситуацията, в която се намираме** (външен контекст);
 3. Да направим анализ на неопределеността, която въздейства на организацията ни, с възможни негативни последствия, които може да причини и да решим дали е или не е приемлив (**оценка на риска**);
 4. Да решим какво отношение да вземем към неприемливите рискове (**въздействие на риска**);
 5. Да оценим и подобрим възможностите на организацията да се развива (**мониторинг и подобрене**);
 - "Елементи на риска" са тежестта на вредата и вероятността за възникване на тази вреда.
- **Обучение:** осигурява на всеки работещ, подходящо обучение и инструктаж по безопасност и здраве при работа, в съответствие със спецификата на професията/извършваната дейност и на работното място, като се отчитат възможните опасности и резултатите от оценката на риска.



- **Здраве и благосъстояние:** Осигуряване на ергономични условия и подкрепа за физическото и психическото здраве.

2. Опазване на околната среда

- **Намаляване на отпадъците:** Използване на методи като рециклиране и повторна употреба.
- **Пестене на ресурси:** Оптимизиране на разхода на енергийните и природните ресурси - вода, ток, хартия и други консумативи.
- **Намаляване на вредните емисии:** Контрол на въглеродния отпечатък за борба с климатичните промени.
- **Подкрепа за превантивните подходи в опазването на околната среда.**
- **Подемане на инициативи, стимулиращи поемането на по-голяма отговорност към околната среда.**
- **Насърчаване развитието и разпространението на технологии, щадящи околната среда.**



3. Законодателство и стандарти

- **Спазване на правилата:** Покриване на всички минимални изисквания на нормативните актове, поднормативните актове и норми, както и международните изисквания (например международните стандарти - ISO 9001, ISO 14001 и ISO 45001).

- Прилагане-внедряване на **Политика за ЗБОС** във вашата компания, или търсите информация за конкретен **нормативен акт** или **стандарт (ISO)**?

ПОЛИТИКА ЗА ЗДРАВЕ, БЕЗОПАСНОСТ И ОКОЛНА СРЕДА

"Минимални изисквания за осигуряване на здравословни и безопасни условия на труда" са най-малките допустими изисквания за опазване на здравето на работещите и осигуряването на тяхната безопасност при работа. Работодателят може да реализира по-високи изисквания, с което да осъществи по-добро ниво на предпазване на работещите, но не и по-ниски от минималните изисквания.

Защитата на здравето и безопасността на работното място, благосъстоянието на хората и опазването на околната среда и биоразнообразието са основни ценности при управлението и развитието на един бизнес.

Политиката по ЗБОС се прилага за всички дейности извършвани от работодателя.

➤ Когато Конкретния работодател няма оперативен контрол, върху всички бизнес партньори на един обект, работно помещение или оборудване, работна площадка или работно място, когато се използват от няколко предприятия или организации (например поддържащи фирми, доставчици и др.) се очаква да спазват принципите, посочени в Политика по ЗБОС.

С намерението да допринесат за глобалните цели на ООН, стратегиите за устойчиво развитие на успешен и печеливш бизнес се стремят към непрекъснато подобряване на здравето и безопасността при работа и на екологичните аспекти, в съответствие с ценностите и в съответствие с моделите за устойчиво развитие, предвидени от:

- ❖ Глобалния договор на ООН;
- ❖ Международната организация на труда в рамките на нейната "Декларация за основните принципи и права при работа";
- ❖ "Декларацията от Рио де Жанейро относно околната среда и развитието"; новата стратегия за растеж на Европейския съюз (известна като "Зеления пакт"), строго съчетана със "Стратегията за устойчивост в областта на химикалите", която има за цел да насърчи устойчивостта и иновациите в химическия сектор и да защити човешкото здраве и околната среда от опасни вещества; много международни договори, свързани със защитата на човешкото здраве и околната среда, "Базелската конвенция за контрол на трансграничното движение на опасни отпадъци и тяхното обезвреждане".

По-конкретно Политиката по ЗБОС:

- ✓ се задължава да управлява дейността си по отношение на защитата на здравето и безопасността при работа и околната среда в пълно съответствие с приложимите международни, национални и местни закони и разпоредби и всички подписани доброволни ангажменти, както и в съответствие с най-високите международни стандарти за управление;
- ✓ преследва целите за "нулев брой инциденти" и "без наранявания" в работна среда, чрез непрекъснато идентифициране, оценка, превенция и защита от рискове за здравето и безопасността при работа, бързо отстраняване на потенциалните причини за злополуки и прилагане на планове за наблюдение на здравето на персонала във връзка с изпълнението на конкретни задачи;
- ✓ подкрепя разработването на програми за подобряване на психическото и физическото благосъстояние и на баланса между професионалния и личния живот;
- ✓ определя, следи и съобщава на заинтересованите страни конкретни цели за непрекъснато подобряване на здравето и безопасността при работа и на екологичните показатели, свързани с процесите, продуктите и услугите, през целия им жизнен цикъл;
- ✓ интегрира оценката на здравето, безопасността и околната среда в комплексната проверка (например на доставчиците) и в дейностите по сливания и придобивания;
- ✓ се ангажира да разработва продукти и производствени процеси в съответствие с принципите на кръговата икономика, изразени в подхода "5R" (Re-think - Refuse - Reduce - Reuse - Recycle; повторно обмисляне - отказване - намаляване – повторно използване - рециклиране), за да се стреми към смекчаване на изменението на климата и постепенна декарбонизация по веригата на стойността,

отговорно използване и намаляване на потреблението на природни ресурси и минимизиране на емисиите на замърсители;

- ✓ разработва и прилага програми за управление на извънредни ситуации, предназначени да предотвратят вреди за хората и околната среда в случай на произшествия;

- ✓ упълномощава, обучава и мотивира служителите си как да работят по безопасен и екологосъобразен начин, като включва всички нива на организацията в постоянна програма за обучение и информиране, предназначена да насърчава културата на безопасност и здраве при работа и опазване на околната среда, както и да гарантира, че отговорностите и процедурите в тези области са подходящо актуализирани, съобщени и разбрани;

- ✓ се стреми към опазване на околната среда чрез непрекъснато идентифициране, оценка, предотвратяване и намаляване на екологичните рискове по цялата верига на дейности;

- ✓ се ангажира да сведе до минимум въздействието върху биологичното разнообразие, екосистемите и свързаните с тях екосистемни услуги, като възприеме принципа "Без нетна загуба на биологично разнообразие", чрез "йерархията на смекчаване на въздействието" (т.е. избягване, свеждане до минимум, възстановяване и регенериране, компенсиране);

- ✓ да сведе до минимум дейността си в защитени зони и/или места, които са от значение за биологичното разнообразие; и/или със специален интерес/стойност, и гарантира, че изборът на нови производствени обекти се извършва при отчитане на защитените територии, като се гарантира запазването на биологичното разнообразие, екосистемните услуги и предотвратяването на обезлесяването;

- ✓ поставя екологични цели и задачи за намаляване на въздействието на своите продукти и услуги през целия им жизнен цикъл върху въздуха, почвата и водата, като например: Обекти, имащи отношение към биологичното разнообразие - Обекти, които съдържат значимо биологично разнообразие на глобално, регионално или национално равнище ("критично биологично разнообразие"): зони/местообитания/защитени видове; видове, класифицирани като критично застрашени, застрашени или уязвими в Червения списък на IUCN, ендемични видове; международно признати зони (обекти на световното наследство, влажни зони съгласно Рамсарската конвенция, програмата на ЮНЕСКО "Човекът и биосферата"). целта "нулево количество отпадъци за депониране", насочена към максимално оползотворяване и рециклиране;

- ✓ насърчава консултациите и участието на работниците и техните представители по въпросите на безопасността и здравето при работа

- ✓ активно си сътрудничи на национално и международно равнище с институционални, академични, неправителствени организации, занимаващи се с регулирането, изучаването и устойчивото управление на въпросите, по безопасност;

- ✓ изисква от доставчиците си да прилагат същия отговорен подход в своите обекти и по веригата на доставки по отношение на здравето и безопасността при работа, грижата за околната среда, опазването на биоразнообразието и екосистемите, предотвратяването на обезлесяването, опазването и отговорното използване на природните ресурси и материали, в съответствие с международните стандарти и законите и разпоредбите на държавите, в които работят. Въвеждането на интегрирани, структурирани и динамични системи за управление, насочени към непрекъснато подобряване, основани на най-добрите практики и съответните признати международни стандарти.

✓

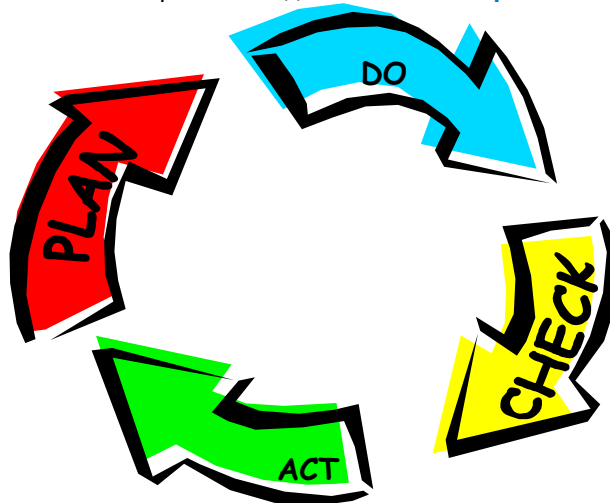
ЛИДЕРСТВО/УПРАВЛЕНИЕ И КОНТРОЛ

Висшето ръководство подкрепено от звеното "Здраве, безопасност и околна среда", както и от други звена, участващи по различен начин (като неизчерпателен пример - отделите за околна среданаучноизследователска и развойна дейност, устойчивост, покупки, качество, производство, управление на риска на предприятието), има стратегическа роля в пълното прилагане на тази Политика, като осигурява участието на целия персонал и на тези, които са контрагенти, така че да изразяват поведение, съответстващо на ценностите, съдържащи се в нея.



Плановите и резултатите в областта "Здраве, безопасност и околна среда" се обсъждат и одобряват от Комитет по условия на труд (КУТ)/Групата по условия на труд (ГУТ) (орган, председателстван от Работодателя, който заседава поне веднъж на тримесечие) и са част от плановите и резултатите в областта на устойчивото развитие, представени и обсъдени от съответния орган на ръководно ниво, а след това представени, обсъдени и одобрени от Висшето ръководство.

ПОЛИТИКАТА ПО ЗБОС се базира на методологията **планиране – изпълнение – проверка – действие**.



Планиране: установяване на целите и процесите, необходими за получаване на резултати.

Изпълнение: въвеждане на процесите.

Проверка: наблюдение и измерване на процесите спрямо политиката по ЗБР, целите, задачите, правните и другите изисквания и докладване на резултатите.

Действие: предприемане на действия за непрекъснато подобряване на резултатите на системата за управление на ЗБР.

Плановите и резултатите се отчитат в Годишен доклад след одобрение от Висшето ръководство.



ПОДАВАНЕ НА СИГНАЛИ, ПОВЕРИТЕЛНОСТ, ЗАБРАНА ЗА ОТВЕТНИ ДЕЙСТВИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ В СЛУЧАЙ НА НАРУШЕНИЕ

Насърчава прилагащите на Политиката по ЗБОС, да сигнализируют добросъвестно, дори и анонимно, за всяко действие или бездействие от страна на когото и да било, в отношения с нея или от нейно име, което представлява или може да представлява нарушение или подтикване към нарушаване на принципите, съдържащи се в Политиката по ЗБОС.

В Политиката за подаване на сигнали за нарушения се определя процедурата за подаване на сигнали, начинът на тяхното управление и гарантирането на поверителност и липса на ответни действия с цел отмъщение.

В случай на нарушение на настоящата Политика - независимо дали то е установено чрез процеса на подаване на сигнали или по различни начини се предприеме подходящи действия в зависимост от тежестта на случая, в съответствие с приложимата правна, регулаторна, договорна и дисциплинарна система.

Когато мислиш за положителни и хубави неща, ти ги привличаш към себе си.“
Прентис Мълфорд

Модел на система за управление на здравето и безопасността при работа



СПИСЪК НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ ИНФОРМАЦИОННИ ИЗТОЧНИЦИ

1. Европейска директива 89/391 от 12 юни 1989 г.
2. Закон за здравословни и безопасни условия на труд, обн., ДВ, бр. 124 от 23.12.1997 г.
3. Закон за професионалното образование и обучение, обн., ДВ, бр. 68 от 30.07.1999 г.
4. Закон за подземните богатства (обн., ДВ, бр. 23 от 1999 г., последно изм. и доп., ДВ, бр. 17 от 2021 г.).
5. Интернет страница на Изпълнителна агенция „Главна инспекция по труда“, <http://www.gli.government.bg/>
6. Интернет страница на Българска минно-геоложка камара, <http://www.bmgk-bg.org/>
7. Кодекс на труда.
8. Наредба № 5 от 11 май 1999 г. за реда, начина и периодичността на извършване на оценка на риска.
9. Наредба РД-07-2 от 16.12.2009 г. за условията и реда за провеждането на периодично обучение и инструктаж на работниците и служителите по правилата за осигуряване на здравословни и безопасни условия на труд.
10. Наредба № 7 от 1999 г. за минималните изисквания за здравословни и безопасни условия на труд на работните места и при използване на работното оборудване.
11. Наредба за специфичните изисквания за управление на минните отпадъци, Обн., ДВ, бр. 10/6.02.2009 г.
12. Правилник за безопасността на труда при взривни работи.
13. Правилник за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин, 1996 г.



Proceedings of the XII International Geomechanics Conference 7 – 11 September 2026, Varna, Bulgaria

14. Правилник по безопасността на труда при разработване на рудни и нерудни находища по подземен начин.
15. Правилник за минноспасителната и газоспасителната дейност, 1994 г.
16. *Ramsar Convention of Wetlands*, 2 февруари 1971 г.
17. Глобалният договор на ООН, 1999 г.
18. *(International Union for Conservation of Nature, IUCN).*

