



**ЗРГИМ**

**XVI СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ СО  
МЕЃУНАРОДНО УЧЕСТВО**

**ПОДЕКС – ПОВЕКС '25**

**03 ÷ 05. 10. 2025 година  
Охрид**

## **ТЕХНОЛОГИЈА НА ПОДЗЕМНА И ПОВРШИНСКА ЕКСПЛОАТАЦИЈА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ**

**XVI СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ СО МЕЃУНАРОДНО УЧЕСТВО ПОДЕКС – ПОВЕКС '25**

**од 03 ÷ 05. 10. 2025 година, Охрид**

## **ЗБОРНИК НА ТРУДОВИ**

Зборник на трудови:

**ТЕХНОЛОГИЈА НА ПОДЗЕМНА И ПОВРШИНСКА ЕКСПЛОАТАЦИЈА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ**

Издавач:

**Здружение на рударски и геолошки инженери на Република Македонија**

[www.zrgim.mk](http://www.zrgim.mk)

Главен и одговорен уредник:

**Проф. д-р Стојанче Мијалковски**

За издавачот:

**м-р Горан Сарафимов, дипл.руд.инж.**

Техничка подготовка:

**Проф. д-р Стојанче Мијалковски**

Изработка на насловна страна:

**Репресент Коммуникатионс ДОО Скопје**

Печатница:

**ДООЕЛ "АНДРИАНО", Прилеп**

Година:

**2025**

Тираж:

**200 примероци**

Место на издавање:

**Кавадарци**

CIP - Каталогизација во публикација

Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

622.22/23:622.3(062)

СТРУЧНО советување со меѓународно учество ПОДЕКС-ПОВЕКС'25 (16; 2025; Охрид)

Технологија на подземна и површинска експлоатација на минерални сировини: зборник на трудови / XVI

стручно советување со меѓународно учество ПОДЕКС-ПОВЕКС'25 од 03-05.10.2025 година, Охрид;

[главен и одговорен уредник Стојанче Мијалковски]. - Скопје:

Здружение на рударски и геолошки инженери на Република Македонија, 2025.-160 стр.: илустр.; 30 см

Библиографија кон трудовите

ISBN 978-608-65530-9-8

а) Рударство -- Експлоатација -- Минерални сировини -- Собири

COBISS.MK-ID 66936069

***Сите права и одговорности за одпечатените трудови ги задржуваат авторите. Не е дозволено ниту еден дел од оваа книга да биде репродуциран, снимен или фотографирен без дозвола на авторите и издавачот.***



## ОРГАНИЗАТОР:

**ЗДРУЖЕНИЕ НА РУДАРСКИТЕ И ГЕОЛОШКИТЕ  
ИНЖЕНЕРИ НА РЕПУБЛИКА МАКЕДОНИЈА**

[www.zrgim.org.mk](http://www.zrgim.org.mk)



## КООРГАНИЗАТОР:

**УНИВЕРЗИТЕТ "ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ" - ШТИП  
ФАКУЛТЕТ ЗА ПРИРОДНИ И ТЕХНИЧКИ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЗА РУДАРСТВО**

## НАУЧЕН ОДБОР

### **Претседател:**

Проф. д-р **Стојанче Мијалковски**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија.

### **Членови на научниот одбор:**

Проф. д-р **Зоран Десподов**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Зоран Панов**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Дејан Мираковски**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Благој Голомеов**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Блажо Боев**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Ристо Дамбов**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Орце Спасовски**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Војо Мирчовски**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Стојанче Мијалковски**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Николинка Донева**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Ѓорѓи Димов**, ФПТН, УГД, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Радмила Каранаква Стефановска**, ФПТН, УГД, Штип, С. Македонија;  
Проф. д-р **Ванчо Аџиски**, УГД, ФПТН, Штип, Северна Македонија;  
Проф. д-р **Милорад Јовановски**, Градежен факултет, УКИМ, Скопје, С. Македонија;  
Проф. д-р **Виктор Гавриловски**, Машински факултет, УКИМ, Скопје, С. Македонија;  
Проф. д-р **Ивица Ристовиќ**, РГФ, Белград, Р. Србија;  
Проф. д-р **Раде Токалиќ**, РГФ, Белград, Р. Србија;  
Проф. д-р **Војин Чокорило**, РГФ, Белград, Р. Србија;  
Проф. д-р **Радоје Пантовиќ**, Технички факултет во Бор, Р. Србија;  
Проф. д-р **Јоже Кортник**, Факултет за природни науки и инженерство, Љубљана, Словенија;  
Проф. д-р **Верослав Молнар**, БЕРГ Факултет, Технички Универзитет во Кошице, Р. Словачка;  
Проф. д-р **Иваило Копрев**, Мино-геолошки Универзитет, Софија, Р. Бугарија;  
Проф. д-р **Димитар Анастасов**, Мино-геолошки Универзитет, Софија, Р. Бугарија;  
Проф. д-р **Павел Павлов**, Мино-геолошки Универзитет, Софија, Р. Бугарија;  
Проф. д-р **Венцислав Иванов**, Мино-геолошки Универзитет, Софија, Р. Бугарија;  
Проф. д-р **Кемал Зекири**, Факултет за геонауки, Митровица, Косово;  
д-р **Кремена Дедељанова**, Научно – технички сојуз за рударство, геологија и металургија, Софија, Р. Бугарија;

## **ОРГАНИЗАЦИОНЕН ОДБОР**

### **Претседател:**

**Кристина Крстева**, Рудник “Боров Дол”, Радовиш.

### **Потпретседатели:**

Проф. д-р **Стојанче Мијалковски**, ФПТН, УГД, Штип;

**Емил Јорданов**, ГД “Гранит” АД, Скопје;

**Митко Крмзов**, Геомин, Струмица.

### **Генерален секретар:**

м-р **Горан Сарафимов**, Рудник “Боров Дол”, Радовиш.

### **Членови на организациониот одбор:**

м-р **Драган Димитровски**, ДИЕРМС, Скопје;

м-р **Борче Гоцевски**, Рудник “САСА”, М. Каменица;

**Филип Петровски**, Министерство за енергетика, рударство и минерални сировини;

м-р **Љупче Ефнушев**, Министерство за енергетика, рударство и минерални сировини;

**Ивица Карапетров**, Рудник “Боров Дол”, Радовиш;

**Тони Тоневски**, Булмак 2016, Пробиштип;

**Мице Тркалески**, Мермерен комбинат, Прилеп;

м-р **Лазе Атанасов**, ДИЕРМС, Скопје;

м-р **Горан Стојкоски**, ЗРГИМ, Прилеп;

м-р **Андреј Кепевски**, Цементарница “Усје”, Скопје;

**Владимир Чачаров**, Детоник, Радовиш

**Авдуш Јонузи**, ДИЕРМС Скопје;

**Велимир Стојановски**, Мактек, Скопје

**Драгана Керазоска Маркова**, Скопје

**George Mikropoulos**, SKM Drill, Кавадарци

**Тони Митевски**, Рудник “САСА”, М. Каменица;

**Пепи Мицев**, БЗР консалтинг груп, СКОПЈЕ

**Александар Стоилков**, АД ЕСМ;

**Мики Дамески**, МИСА-МГ, Скопје;

**Сашко Дамески**, МИСА-МГ, Скопје;

**Лазар Пончев**, Машинокоп Ресурсис, Кавадарци;

**Игор Трајанов**, Рудник “Боров Дол”, Радовиш;

**Виктор Шотаровски**, Metso, Скопје;

**Васко Саламовски**, Metso, Скопје;

**Илија Лозановски**, “Теиком Тим”, Битола;

**Сашко Барбареев**, “Цвет Компани”, Скопје;

**Борче Сандев**, Meristem Tobi, Кочани.

**XVI СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ НА ТЕМА:**  
**“ТЕХНОЛОГИЈА НА ПОДЗЕМНА И ПОВРШИНСКА ЕКСПЛОАТАЦИЈА**  
**НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ”**  
**- со меѓународно учество –**

---

**03 Октомври 2025, Охрид**  
Република Северна Македонија

**ОРГАНИЗАТОР:**

ЗДРУЖЕНИЕ НА РУДАРСКИТЕ И ГЕОЛОШКИТЕ ИНЖЕНЕРИ  
НА РЕПУБЛИКА МАКЕДОНИЈА  
[www.zrgim.org.mk](http://www.zrgim.org.mk)

**КООРГАНИЗАТОР:**

УНИВЕРЗИТЕТ “ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ” – ШТИП  
ФАКУЛТЕТ ЗА ПРИРОДНИ И ТЕХНИЧКИ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЗА РУДАРСТВО  
[www.ugd.edu.mk](http://www.ugd.edu.mk)



**ЗРГИМ**

## **XVI СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ НА ТЕМА:**

**“Технологија на подземна и површинска  
експлоатација на минерални сировини”**

# **ПОДЕКС – ПОВЕКС '25**

**Охрид**

**03 ÷ 05. 10. 2025 год.**

## **ПРЕДГОВОР**

Меѓународното стручно советување за подземната експлоатација на минералните сировини (ПОДЕКС), за првпат се одржа на 06.12.2007 год. во Пробиштип во организација на Сојузот на Рударските и Геолошките Инженери на Македонија (СРГИМ).

Од 2012 година советувањето е проширено со трудови од површинската експлоатација на минерални сировини и е именувано како ПОДЕКС-ПОВЕКС.

Стручното советување, на тема: технологија на подземна и површинска експлоатација на минерални сировини, традиционално се одржуваше секоја година во месец ноември. По пауза од три години, поради пандемијата од COVID-19, започнува со оддржување во октомври. На ова советување земаат учество голем број на стручни лица од: рударската индустрија, универзитетите, научно - истражувачките и проектантските организации, производителите на опрема и др.

На досегашните петнаесет советувања (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2022, 2023 и 2024 год.) учествуваа повеќе автори од 12 држави, кои презентираа 429 стручни трудови.

За ова шеснаесето советување (ПОДЕКС - ПОВЕКС '25) пријавени се 25 труда, на автори од 6 држави.

Големиот број на трудови од домашните автори произлезе како резултат на научно-истражувачката работа реализирана на високообразовните институции во Р. С. Македонија. Меѓутоа, посебно не радува учеството на автори од непосредното рударско производство, кои што презентираат постигнати резултати во рударската пракса.

Се надеваме дека традицијата за собирање на сите специјалисти од областа на подземната и површинската експлоатација на минералните сировини, ќе продолжи и дека во идниот период ова советување ќе прерасне во меѓународен симпозиум.

Уредници



**AMGEM**

**XVI EXPERT CONFERENCE THEMED:**

**“Technology of underground and surface mining of mineral raw materials”**

**PODEKS - POVEKS '25**

**Ohrid  
03 ÷ 05. 10. 2025**

**FOREWORD**

The International expert conference on underground mining of mineral raw materials (PODEKS), organized by the Association of Mining and Geology Engineers of Macedonia (AMGEM), was first held on 06.12.2007 in Probishtip.

Since 2012, in this counseling, surface exploitation of mineral resources is included too, and it is called PODEKS-POVEKS.

This expert conference called: Technology of underground and surface mining of mineral raw materials, traditionally, was been organized annually during November. After a three-year hiatus, due to the COVID-19 pandemic, starts taking place in October. A number of experts from the mining industry, universities, research institutions, planning companies, and equipment manufacturing companies participate in this conference.

Many authors from 12 countries participated in the previous fifteen conferences (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2022, 2023 and 2024) presenting 429 expert papers.

Twenty-five authors from 6 countries have registered their expert papers for the XVI<sup>th</sup> conference (PODEKS - POVEKS '25).

The large number of expert papers from the domestic authors has emerged as a result of the research work carried out at the higher education institutions in the Republic of North Macedonia. We are particularly delighted by the participation of the authors involved in the immediate mining production who will be presenting the achieved results in the mining practice.

We hope that the tradition of gathering of all specialists from the field of underground and surface mining of mineral raw materials will continue and that this conference will grow up to an international conference in the future.

The Editors



ЗРГИМ

ХVI СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ НА ТЕМА:  
Технологија на подземна и површинска експлоатација  
на минерални сировини

## ПОДЕКС – ПОВЕКС '25

Охрид  
03 ÷ 05. 10. 2025 год.

### СОДРЖИНА

|                                                                                                                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ХИДРОГЕОЛОШКА ФУНКЦИЈА НА ЗАСТАПЕНИТЕ ЛИТОЛОШКИ ЕДИНИЦИ И<br/>МОЖЕН ПРИЛИВ НА ПОДЗЕМНИ ВОДИ ВО РУДНИК КРСТОВ ДОЛ ОПШТИНА<br/>КРИВА ПАЛАНКА * Ласте Ивановски, Ванчо Ангелов, Никола Богатиновски, Бојан<br/>Ивановски.....</b> | <b>1</b>  |
| <b>MODELING THE GEOMORPHOLOGY OF ORE BODIES IN THE TREPÇA MINE USING<br/>GOLDEN SOFTWARE SURFER * Berat Sinani, Ivan Boev, Arianit Reka, Bahri Sinani, Elida<br/>Lecaj, Adelina Haskaj, Blazo Boev.....</b>                       | <b>9</b>  |
| <b>ГЕОЛОШКИ И ПЕТРОЛОШКИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА НИСКОКРИСТАЛЕСТИ КАРПИ<br/>НА УСЕЦИ ЗА ИЗГРАДБА НА АВТОПАТ КИЧЕВО-ОХРИД * Бојан Ивановски, Соња<br/>Лепиткова, Никола Богатиновски, Елена Ангелова, Радмила Мишова.....</b>            | <b>18</b> |
| <b>WEB КАЛКУЛАТОР ЗА ПРОЦЕНКА НА СТАБИЛНОСТ НА КОСИНИ НА<br/>ПОВРШИНСКИ КОП * Зоран Панов, Радмила Каранакова Стефановска, Душан Биков,<br/>Стојанче Мијалковски.....</b>                                                         | <b>25</b> |
| <b>DIGITAL MINING AND PREDICTIVE MAINTENANCE BASED ON THE POSTULATES OF<br/>INDUSTRY 4.0 (5.0) * Predrag Jovančić, Ivica Ristović, Nevena Stojković, Filip Miletić,<br/>Stevan Đenadić, Aleksandar Madžarević.....</b>            | <b>33</b> |
| <b>КОРИСТЕЊЕ НА ПРОГРАМСКИ ЈАЗИК PYTHON, ЗА ГЕНЕРИРАЊЕ НА СКРИПТА<br/>ПРИ ПРЕСМЕТКА НА ПОТРЕБЕН БРОЈ НА ДАМПЕРИ * Горан Сарафимов, Драган<br/>Димитровски, Игорче Трајанов.....</b>                                               | <b>40</b> |
| <b>ИСТРАЖУВАЊЕ НА ЕФЕКТИТЕ ОД МИНИРАЊЕ ВО ЗАВИСНОСТ ОД ДИЗАЈНОТ НА<br/>МИНСКИТЕ СЕРИИ И РАБОТНАТА СРЕДИНА * Горан Јованов.....</b>                                                                                                | <b>44</b> |
| <b>ИЗРАБОТКА НА СТОПА СО ДУПЧЕЊЕ И МИНИРАЊЕ ЗА ЖЕЛЕЗНИЧКИОТ<br/>КОРИДОР VIII БЕЉАКОВЦЕ – КРИВА ПАЛАНКА * Зоран Ужевски, Ненад Јовановски,<br/>Боро Томашевски, Миле Стефанов.....</b>                                             | <b>49</b> |
| <b>POSSIBILITIES OF USING DIMENSIONALITY REDUCTION METHODS FOR DECISION<br/>SUPPORT OF SURFACE BLASTING DESIGN * Dimitar Kaykov, Ljupcho Dimitrov.....</b>                                                                        | <b>54</b> |
| <b>ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ВРЕДНОСТА НА РЕЗОВИТЕ ПРИ СЕЧЕЊЕ НА КАРПЕСТА<br/>МАСА СО МАШИНИ ЗА СЕЧЕЊЕ * Игор Максимов, Драги Пелтечки.....</b>                                                                                             | <b>61</b> |
| <b>FORMATION OF AN EXTERNAL DUMP AT THE “DRMNO” SURFACE MINE FOR<br/>SUSTAINABLE AND SAFE COAL EXPLOITATION * Živanovic Miloš, Stojković Nevena.....</b>                                                                          | <b>66</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>НУМЕРИЧКИ МЕТОДОЛОГИИ ЗА ИЗБОР НА РУДАРСКА ОТКОПНА МЕТОДА *</b><br>Стојанче Мијалковски, Николинка Донева, Зоран Панов.....                                                                                                                                             | 73  |
| <b>МОЖНОСТИ ЗА ПРИМЕНА НА МЕТОДАТА СО ВЕШТАЧКО ЗАМРЗНУВАЊЕ НА ТЛО – СВЕТСКИ ИСКУСТВА И ПРАКТИКИ *</b> Николинка Донева, Зоран Десподов, Стојанче Мијалковски, Афродита Зенделска, Марија Хаџи-Николова.....                                                                | 80  |
| <b>THE UNDERGROUND EXPLOITATION OF DIMENSION STONE AT DEBELA GRIŽA QUARRY, SLOVENIA *</b> Miha Tavčar, Jože Kortnik.....                                                                                                                                                   | 87  |
| <b>ИНТЕГРИРАНА ТЕХНОЛОГИЈА ЗА ПОДЗЕМНА ГАСИФИКАЦИЈА НА ЈАГЛЕН СО IN SITU РЕТОРТИРАЊЕ НА НАФТЕНИ ШКРИЛЦИ *</b> Радмила Каранакова Стефановска, Зоран Панов, Ристо Поповски, Благица Донева.....                                                                             | 96  |
| <b>SYNTHESIZING LEADING AND LAGGING SAFETY INDICATORS IN MINING OPERATIONS – CASE STUDY KOSOVO’S MINING *</b> Kemajl Zeqiri, Izet Zeqiri, Ujmir Uka...                                                                                                                     | 100 |
| <b>APPLICATION OF BIOSENSORS WITH GPS LOCATORS FOR MONITORING THE HEALTH OF MINERS IN UNDERGROUND MINES: A COMPREHENSIVE FRAMEWORK FOR ENHANCED SAFETY AND OPERATIONAL EFFICIENCY *</b> Aleksandar Petrovski, Stojance Mijalkovski, Redzep Mustafovski .....               | 103 |
| <b>СВЕТСКИ ДЕН НА ЖИВОТНАТА СРЕДИНА ВО РУДНИК САСА КАМПАЊА “ДА СЕ СПРАВИМЕ СО ЗАГАДУВАЊЕТО ОД ПЛАСТИКА” *</b> Каролина Јанѓеловска Анастасовска, Катерина Николовска, Симона Ангеловска, Даме Спасевски, Марија Стојановска.....                                           | 112 |
| <b>РУДАРСТВО И ПЕЈЗАЖ: МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОЦЕНКА НА ВИЗУЕЛНИ ВЛИЈАНИЈА *</b> Радмила Каранакова Стефановска, Зоран Панов, Ристо Поповски.....                                                                                                                               | 118 |
| <b>КЛАСИФИКАЦИЈА НА ИНДУЦИРАНИ И ТЕКТОНСКИ ЗЕМЈОТРЕСИ ПО МАГНИТУДА *</b> Љубчо Јованов, Катерина Дрогрешка.....                                                                                                                                                            | 124 |
| <b>ДЕФИНИРАЊЕ НА СЕИЗМИЧКИТЕ АКТИВНИ ЕПИЦЕНТРАЛНИ ПОДРАЧЈА НА ТЕРИТОРИЈАТА НА РЕПУБЛИКА СЕВЕРНА МАКЕДОНИЈА КОРИСТЕЈЌИ МАКРОСЕИЗМИЧКИ ПОДАТОЦИ ЗА ПЕРИОД 2016-2020 ГОДИНА *</b> Катерина Дрогрешка, Јасмина Најдовска, Ивана Молеровиќ, Моника Андреевска, Драгана Черних.. | 131 |
| <b>ПРИМЕНА НА ПОВЕЌЕКРИТЕРИУМСКО ОДЛУЧУВАЊЕ ЗА ИЗБОР НА ОПТИМАЛНА РУТА ЗА ТРАНСПОРТ НА КОМУНАЛЕН ОТПАД *</b> Стојанче Мијалковски, Димитар Белиќ.....                                                                                                                      | 138 |
| <b>ВИЗУЕЛНА ЧИТЛИВОСТ И ПРОСТОРНА ПЕРЦЕПЦИЈА ВО ГЕОПАРКОВИ *</b> Катерина Деспот, Васка Сандева, Владица Николовска.....                                                                                                                                                   | 143 |
| <b>ЕКОЛОШКИ И ЕСТЕТСКИ ПРИНЦИПИ ВО ПРОЕКТИРАЊЕ НА МАЛИ АРХИТЕКТОНСКИ СТРУКТУРИ ВО ЗАШТИТЕНИ ПОДРАЧЈА *</b> Васка Сандева, Катерина Деспот, Владица Николовска.....                                                                                                         | 150 |
| <b>EVALUATION OF IRR IN MINING PROJECTS THROUGH THE USE OF MONTE CARLO SIMULATION *</b> Ujmir Uka, Risto Dambov, Kemajl Zeqiri.....                                                                                                                                        | 156 |



ЗРГИМ

XVI<sup>TO</sup> СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ НА ТЕМА:  
Технологија на подземна и површинска експлоатација на минерални  
суровини

**ПОДЕКС – ПОВЕКС '25**

Охрид

03 – 05. 10. 2025 год.

## МОЖНОСТИ ЗА ПРИМЕНА НА МЕТОДАТА СО ВЕШТАЧКО ЗАМРЗНУВАЊЕ НА ТЛО – СВЕТСКИ ИСКУСТВА И ПРАКТИКИ

**Николинка Донева<sup>1</sup>, Зоран Десподов<sup>1</sup>, Стојанче Мијалковски<sup>1</sup>, Афродита Зенделска<sup>1</sup>,  
Марија Хаџи-Николова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Факултет за природни и технички науки, Универзитет Гоце Делчев, Штип, Северна Македонија

**Апстракт:** Вештачкото замрзнување на тлото кај шахти и тунели во проекти за подземни железници, вода и канализација е фокус на многу истражувања. Сепак, малку се знае дека оваа техника за обезбедување привремена потпора на земјата и контрола на подземните води потекнува од рударската индустрија кон крајот на 19 век. Во овој труд се разгледани реализирани рударски проекти и проекти од тунелограбда каде што е усвоен иновативен пристап со употреба на вештачко замрзнување на земјата (AGF) за нивно успешно завршување.

**Клучни зборови:** Потпора на тлото, Замрзнато тло, Цврстина и деформација, Изградба на окна и тунели.

## POSSIBILITIES FOR APPLICATION OF THE ARTIFICIAL GROUND FREEZING METHOD – WORLD EXPERIENCES AND PRACTICES

**Nikolinka Doneva<sup>1</sup>, Zoran Despodov<sup>1</sup>, Stojance Mijalkovski<sup>1</sup>, Afrodita Zendelska<sup>1</sup>,  
Marija Hadzi-Nikolova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Natural and Technical Sciences, Goce Delcev University, Shtip, North Macedonia

**Abstract:** Artificial ground freezing for shafts and tunnels related to subway, water, and sewer projects has been the focus of much research. However, it is little known that this technique to provide temporary earth support and groundwater control originated in the mining industry in the late 1800s. This paper reviews past mining and tunnel construction projects where an innovative approach has been adopted using Artificial Ground Freezing (AGF) for their successful completion.

**Key Words:** Ground support, Frozen ground, Strength and deformation, Shaft construction.

### 1. ВОВЕД

Рударската индустрија во целиот свет се соочува со сè покомплексни геолошки и хидрогеолошки услови, предизвикани од исцрпувањето на лесно достапните ресурси и потребата за експлоатација на нови, подлабоки и често нестабилни подземни наоѓалишта. Во такви услови, потребата од примена на напредни технички решенија за стабилизација на работната околина станува суштинска. Една од најсофистицираните и најефикасни технологии што наоѓа широка примена во современото рударство е методот на вештачко замрзнување на околните карпи и почви.

Вештачко замрзнување на земјата при изградба на шахти и тунели кај проекти за подземни железници, водовод и канализација е обработено во многу трудови и статии на конференции во последниве години. Сепак, малку се знае дека оваа техника за обезбедување привремена поддршка на земјата и контрола на подземните води потекнува од рударската индустрија кон крајот на 19 век. Иако патентирана од Н. Poetsch од Германија во 1883, оттогаш процесот се применува на глобално ниво во рударството за изградба на длабоки окна и поткопи. Многу иновативни проекти биле успешни само со усвојување на методата со вештачко замрзнување на околните карпи и почви (artificial ground freezing-AGF), што ја илустрира важноста и суштинската вредност на оваа метода во рударскиот свет во текот на многу години [1].

Метода AGF се заснова на контролирано ладење на околниот медиум со цел да се создаде замрзната зона околу планираната рударска просторија. На овој начин се постигнува привремена стабилизација на нестабилни геолошки формации, се спречува продор на подземни води и се овозможува безбедна изработка на подземни конструкции. Замрзнатата зона, поради своите физички својства, има висока носивост, отпорност на ерозија и водонепропустливост, што ја прави од исклучителна важност во услови на заситени почви, песочни формации и испукани карпи [2].

Кај плитките окна, до длабочина од околу 100 метри, кои можат да се изградат со употреба на класични градежни методи од површината и генерално минуваат низ почви како што се песок, тиња и глина, AGF методата е потребна за зајакнување на тлото и за спречување на навлегување на подземни води за време на ископувањето. Кај подлабоките окна, како во рудниците, кои генерално минуваат низ компактни карпести слоеви, AGF методата е потребна само за запирање на подземната вода.

Двете главни области каде што треба да се фокусира истражувањето на локацијата кај проекти со примена на методата со замрзнување на тлото се прво, одредување на цврстината на замрзнатото тло и деформацијата под оптоварување (слегнување - бавно движење на материјалот предизвикано од смолкнување кое ја надминува цврстината на материјалот) и второ, можност за анализа на достигнување на замрзнатиот фронт во кое било време за споредба со измерените вредности за време на изградбата (термичка анализа на земјиштето)[3].

Вештачкото замрзнување на тлото (AGF) било фокус на клучната презентација на симпозиумот на ISSMGE – TC204 (Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground) 2022, во Кембриџ, Велика Британија. каде геотехничкиот консултант Виторио Манасеро од Италија дискутирал за методата AGF. Тој рекол дека е можно да се создадат замрзнати тела од земја со соодветна форма, дебелина и механички карактеристики за да служат како привремена потпора на земјата и/или за хидроизолација. Замрзнатото земјиште се однесува како конгломерат каде врзивата функција ја извршува замрзнатата вода – мразот – кој ги исполнува пукнатините во почвата. Манасеро исто така додал дека замрзнатото тело од земја е непропустливо и неговите механички карактеристики се значително подобрени во споредба со природната состојба на земјата пред започнување на градежниот проект, оваа технологија е применлива на секој вид на земја, под услов да има доволна количина на вода или влага што може да се замрзне [4].

## 2. МЕТОДА СО ВЕШТАЧКО ЗАМРЗНУВАЊЕ НА ТЛОТО

Методата за вештачкото замрзнување на земјиштето е техника на градење што се користи при реализација на проекти со големи ископи во рударството, понатаму при изградба на рударски простории, шахти и тунели. Со оваа метода се обезбедува привремена потпора на земјиштето и контрола на подземните води, кога другите конвенционални методи како што се одводнување, подградување и инјектирање или мешање на почвата не се изводливи. Замрзнувањето на земјата се користи и за да се обезбедат регионални бариери за подземните води околу подземните објекти. Процесот на замрзнување на земја вклучува дупчење и инсталирање на серија релативно тесно распоредени цевки и циркулација на течноста за ладење низ овие цевки.

Како разладна течност најчесто се користи раствор со калциум-хлорид или течен азот) кој преку мрежа од сонди во земјата или карпата ја спушта температурата под 0°C, што доведува до:

- Замрзнување на вода во порите,
- Затворање на капиларите и пукнатините,
- Формирање на издржлива и непропустлива почвена или карпеста маса.



Слика 1. Метода со вештачко замрзнување на тлото [5]

## 2.1 Фази во процесот на замрзнување

Фази во процесот на замрзнување се:

- Проектирање и поставување на сонди

Во оваа фаза се изработува геотехничка и хидрогеолошка анализа на теренот за да се утврдат физичките својства на почвата и/или карпите (порозност, влажност, топлинска спроводливост).

Потоа се дизајнира геометриски распоред на сонди (обично во круг или во решетка), со растојание 0,8–1,5 m, по што се дупчат длабоки отвори (сонди) во кои се вметнуваат двојни цевки – внатрешната е за довод, а надворешната за одвод на флуидот [6, 8].

- Циркулација на медиумот за ладење

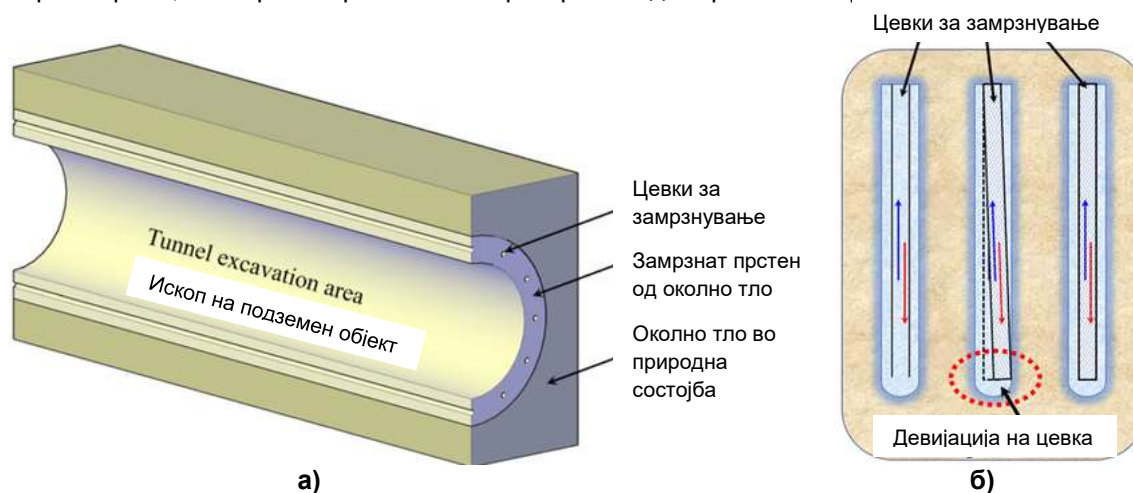
Во оваа фаза се инсталира централа за ладење во која се подготвува течноста за ладење (раствор  $\text{CaCl}_2$  кој се лади до  $-30$  до  $-40^\circ\text{C}$  или течен азот со температура  $-196^\circ\text{C}$ ) [7]. При што флуидот циркулира низ системот, ја апсорбира топлината од околината и постепено создава зона на замрзнување. Се следи термичката прогресија преку мерење на температурата во специјално поставени мониторинг-сонди.

- Формирање на ледена преграда

За да се формира ледена преграда потребно е замрзнатите зони од секоја сонда да се прошират и да се спојат во континуирана бариера. Потребното време за комплетно замрзнување зависи од: топлинската спроводливост на почвата/карпата, температурата на флуидот, хидрауличкиот градиент, и содржината на вода. Процесот трае од неколку недели до два месеци.

- Одржување на замрзнатата зона

Во оваа фаза температурата мора континуирано да се одржува, за да се спречи одмрзнување за време на изведбата на работите. За следење на состојбата се користат: автоматски сензори, термопарови, сензори за притисок и софтвер за моделирање на термодинамиката.



Слика 2. а) Шематски приказ на методата за вештачко замрзнување на тло б) Девијација на цевката на AGF систем [8]

## 2.2 Најчесто користени течности за ладење

Во централа за ладење се подготвува течноста за ладење, која најчесто е раствор од  $\text{CaCl}_2$  кој се лади на температура до  $-30$  до  $-40^\circ\text{C}$  или течен азот со температура  $-196^\circ\text{C}$  [9].

Во наредната табела се дадени предности и недостатоци [4] при реализација на проекти со примена на методата со вештачко замрзнување со погоре спомнатите видови на течност за ладење.

На светско ниво се применува и комбинирано замрзнување, кај кое се користат Комбинираното замрзнување користи како течност за ладење и раствор од  $\text{CaCl}_2$  или  $\text{NaCl}$  и течен азот. Оваа постапка се спроведува во две фази:

- Фаза I – Течен азот ( $\text{LN}_2$ ): Се користи за иницијално и брзо замрзнување на почвата/карпата до  $-196^\circ\text{C}$ .
- Фаза II – Солен раствор ( $\text{CaCl}_2$  или  $\text{NaCl}$ ): Откако ќе се постигне потребното замрзнување, се воведува циркулација на ладен раствор ( $-25^\circ\text{C}$  до  $-40^\circ\text{C}$ ) за долгорочно одржување на замрзнатиот волумен.

**Табела 1.** Предности и недостатоци од примена на различни течности за ладење

| Тип                                | Опис                                                                                                                                                                            | Предности                                                                                                                                                                                                                                              | Недостатоци                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Индуктивно замрзнување со раствор  | Користи течност како $\text{CaCl}_2$ на $-30^\circ\text{C}$<br>Ладилни единици го ладат растворот, кој потоа циркулира низ цевките за замрзнување (сонди) поставени во почвата. | Континуирано и стабилно одржување на температура.<br>Погодно за долготрајни проекти — замрзнување може да се одржува со месеци.<br>Пониски оперативни трошоци во споредба со течен азот.<br>Помала опасност од термални шокови и пукнатини во карпата. | Подолг период на иницијално замрзнување (може да трае неколку недели).<br>Поголема инфраструктура: бара ладилници, резервоари и пумпна станица.<br>Не е соодветно за итни или краткорочни проекти.                                 |
| Криогено замрзнување со течен азот | Течниот азот има температура од околу $-196^\circ\text{C}$ .<br>Се вбригува директно во замрзнувачките сонди, каде што испарува и експресно ја извлекува топлината од околината | Брзо замрзнување — идеално за итни интервенции.<br>Способност за постигнување длабоко и униформно замрзнување, дури и во тешко заситени подлоги.<br>Погодно за сложени урбани средини со ограничен пристап.                                            | Високи трошоци за материјал и логистика.<br>Брзо испарување — потребно е континуирано и интензивно доставување на течен азот.<br>Потенцијални ризици по безбедноста и здравјето, вклучително и хипотермија и недостиг на кислород. |

### 3. РЕАЛИЗИРАНИ ПРОЕКТИ

- Проект на тунелот Seattle Northgate Link

Замрзнувањето често е единствената метода за привремена поддршка на почвата и контрола на подземни води кај вкрстени премини кои се на голема длабочина и во почви со висока пропустливост. Типичен пример за тоа е преминот кој има должина од 3 до 8 m, CP-23 на тунелот Northgate Link во Сиетл. Во вакви случаи цевките за ладење можат да се инсталираат од внатрешноста на тунелите или од површината [10].



**Слика 3.** Замрзнат попречен премин CP-23

Бил користен модел од тродимензионалната мрежа на конечни елементи за симулирање на замрзнатата зона. Кога таа зона се активира во моделот користејќи вредност за волуменско ширење од лабораториските тестови, можат да се пресметаат сили и поместувања на тунелите со користење на PLAXIS. Кај оваа конкретна апликација, волуметриското ширење на замрзнатата почва било 3,1%, што резултирало со максимални сили од  $4,28 \text{ kN/m}^2$  и максимално поместување на сегментите на тунелот од 0,017 m. Со познавање на овие сили пред замрзнувањето, можеле да се преземат активности за зголемување на подградна конструкција преку додавање на дополнителни елементи како што е прикажано на слика 3.

➤ Проект во рудникот Quemont во Rouyn-Noranda, Quebec

Во рудникот Quemont во Rouyn-Noranda, Quebec, била завршена експлоатацијата и бил затворен пред неколку децении. При експлоатацијата било изоставено едно рудно тело во форма на столб, за кое било познато дека содржи приближно 11.000 m<sup>3</sup> цинк. Рудното тело било долго 24 до 37 m и под водоносна неконсолидирана јаловина од рудникот и многу мека глина [1].

По евалуација на неколку опции за површински коп со многу тесни косини и потенцијално одводнување, се размислувало за широк ископ. Концептот предвидувал голем сид од замрзната земја за да обезбеди привремена поддршка и контрола на подземните води. Единствениот проблем за овој проект била деформацијата зависна од времето.

Овој проект барал дизајнирање на поддршка за кружно ископување со дијаметар од 61 m и длабочина од 30 m. Лабораториските тестови покажале дека глинениот материјал има многу висока содржина на вода и е подложен на деформација зависна од времето, кога е замрзнат.

Биле спроведени тестови за притисок на замрзната земја и деформација зависна од времето за да се оцени јачината зависна од времето и деформација (Sopko et al. 2012). На база што се заклучило дека работниот век на предложените замрзнати земјени кесони би била ограничена поради карактеристиките на деформација зависна од времето на замрзнатата глина. Евалуација на ископот, минирањето и рударските распореди покажале дека ова ископување може да биде завршено за три месеци. Успешноста на проектот зависела од ограничување на внатрешните напрегања на 733 kN/m<sup>2</sup>, за што било потребно поставување на замрзнатиот земјен сид со дебелина не помала од 9,15 m.

Затоа бил проектиран сид од замрзната земја од 10 метри, а времето на ископување било ограничено на 120 дена.



Слика 4. Конфигурација на цевката за замрзнување

Операцијата за замрзнување започнала во септември и било предвидено со ископување да се започне на почетокот на јануари кога температурите се далеку под нулата.



Слика 5. Процес на ископување на рудното тело со форма на столб

Ископувањето трело од јануари до март. Кога температурите на амбиенталниот воздух почнале да растат било забележано одвојување на јужниот сид во област изложена на директна сончева светлина. На оваа површина биле поставени големи бетонски преслеки а за да се заштити челото на сидот од замрзна земја. Овој обид помогнал за да се продолжи со експлоатација на зинковата руда се до золемување температурите. Во почетокот на април се случило силно невреме со грмотевици, при што гром го оштетил трансформаторот на разладните постројки. По што било одлучено да се започне со засипување и прекинување на проектот, така што останале неоткопани минимални количини на руда.

➤ Рудник за злато Aquarius - Timmins, Ontario

Првата теренска имплементација била во рудникот за злато Aquarius во 1996 година. Имотот Aquarius првично бил во сопственост на Asarco и започнал да работи како подземен рудник во 1970-та година. Високите приливи на подземни води барале Asarco да се откаже рудникот, кој потоа бил продаден на Echo Bay Mines. Во 1996 година, Echo Bay продолжил со плановите за ископување на златото од голема отворена јама со конвенционален пристап користејќи бунари за одводнување со голем капацитет на периметар од околу 4-km. Хидрогеолошките студии покажале дека оваа масивна програма за одводнување има потенцијал да се исцрпи водата во неколку мали езера во провинциски парк во непосредна близина на проектот и неколку станбени бунари [1]. Била предложена и поставена бариера за замрзната земја околу периметарот од 4 километри. Системот од замрзната земја имал 2.335 поединечни цевки за замрзнување со дијаметар од 8,9 cm во основната карпа. Растојанието помеѓу цевките варираше во зависност од длабочината на основната карпа за да се компензира отстапувањето за време на дупчење. На некои локации, основата била плитка дури 42 m, но можела да биде длабока и до 153 m на локации на источната страна на проектот. Цевките на помалите длабочини биле распоредени на меѓусебно растојание од 2 m, додека кај подлабоката основа биле распоредени на 1 m. Цевките со помала длабочина имале помала девијацијата, која со зголемување на длабочината се зголемувала.



Слика 6. Систем за замрзнување на земјата во рудникот Aquarius

Системот за ладење се базирал на две постојани згради на северниот и јужниот крај на замрзната бариера. Секоја зграда имала пет компресори од 671 kW за комбинирана моќност на ладење од 8800 kW. Големите компресори користеле амонијак како примарен гас за ладење што го ладел циркуирачкиот раствор на калциум хлорид.

Системот за ладење на циркуирачка течност бил единствен предизвик за овој проект. Додека замрзнувањето на цевките и капацитетот за ладење биле олеснети со користење на термичко моделирање, секоја цевка за замрзнување барала минимум 4550 l/h од ладилниот раствор со калциум хлорид. Колекторот за дистрибуција на течноста за ладење бил поделен на четири делови, од кои секој бил долг приближно 1 km. Вкупните барања за хидрауличниот дизајн на овој систем се базирал на следново:

- 2335 поединечни цевки за замрзнување групирани во серија во кола;
- 574 кола;
- 304 m цевка за замрзнување во секое коло;
- Две до седум цевки за замрзнување по коло, во зависност од длабочината на цевката;
- 4000 m надградни цевководи;
- Пад на притисок од 965 kPa за секој дел од 1 km.

За да се обезбеди избалансиран проток низ секоја цевка или коло, неопходно било да има снабдување, враќање, и дистрибутивен колектор за повратно враќање (балансирачко).

Заради пад на цената на златото на берзата овој систем за замрзнување бил завршен, тестиран и ставен во режим на подготвеност. Четири последователни години, системот бил стартуван и тестиран. Покрај тоа што овој систем бил само делумно оперативен, обезбедил доволно податоци за потврди дека системите за замрзнување на земјата може да се инсталираат на големи проекти.

#### 4. ЗАКЛУЧОК

Методата за вештачкото замрзнување на земјиштето е техника на градење што се користи при реализација на проекти со големи ископи во рударството, понатаму при изградба на рударски простории, шахти и тунели. Со оваа метода се обезбедува привремена потпора на земјиштето и контрола на подземните води, кога другите конвенционални методи како што се одводнување, подградување и инјектирање или мешање на почвата не се изводливи.

Неопходно е последователно следење на сите фази од нејзино спроведување, а успешноста на истата зависи пред сè од спроведување на потребните геотехнички и хидрогеолошки анализи на теренот за да се утврдат физичките својства на почвата / карпите, како порозност, влажност, топлинска спроводливост и др.

Имајќи предвид дека рударската индустрија се соочува со сè покомплексни геолошки и хидрогеолошки услови, неопходно потребна е примена на напредни технички решенија за стабилизација на работната околина како што е методата за вештачко замрзнување на околните карпи и почви.

#### КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Sopko, F. A. Auld (2024). Innovative mine projects using artificial ground freezing (AGF) on a large scale, *Frontiers in Built Environment*;
- [2] Newman, G., Newman, L., Chapman, D., and Harbict., T. (2011). Artificial Ground Freezing: An Environmental Best Practice at Cameco's Uranium Mining Operations in Northern Saskatchewan, Canada. *Proceedings: IMWA, Aachen, Germany*;
- [3] F. A. Auld, S. Hashemi, J. A. Sopko (2023). Site investigation for shaft sinking projects requiring artificial ground freezing (AGF) for ground stability control and or groundwater ingress prevention, 11th International Symposium on Ground Freezing, London;
- [4] Key points in artificial ground freezing techniques (2022), Technical | waterproofing & control, ISSMGE – TC204 (Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground), Cambridge, UK;
- [5] Joseph Sopko (20223) Topic: The Importance of Artificial Ground Freezing (AGF) for Shaft Sinking and Tunneling, Keller webinar series;
- [6] Neil Smith (2012) Principles of Design and Construction, Book Chapter: Artificial ground freezing Available to Purchase, *Applied Geotechnical Engineering*;
- [7] Z. Joudieh, O. Cuisinier and F. Masroui (2024). Artificial Ground Freezing—On the Soil Deformations during Freeze–Thaw Cycles, *Geotechnics* 2024, 4(3), 718-741;
- [8] Y. Liu, K. Li, D. Li and X. Tang (2021). Wuhan University Coupled thermal–hydraulic modeling of artificial ground freezing with uncertainties in pipe inclination and thermal conductivity, *Acta Geotechnica* 17(2);
- [9] M. Partenio, C. Green, W. Greenwood (2012). Ground Freezing. *Geoengineer*;
- [10] J.A. Sopko (2020). Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art (Book). Design of ground freezing for cross passages and tunnel adits (Chapter).