

ЗРГИМ

XVII СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ СО
МЕЃУНАРОДНО УЧЕСТВО

ПОДЕКС – ПОВЕКС ’26

30 ÷ 31. 10. 2026 година
Охрид

ТЕХНОЛОГИЈА НА ПОДЗЕМНА И ПОВРШИНСКА ЕКСПЛОАТАЦИЈА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ

XVII СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ СО МЕЃУНАРОДНО УЧЕСТВО ПОДЕКС – ПОВЕКС ’26

од 30 ÷ 31. 10. 2026 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

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:
“МИКС” ДОО, Скопје

Година:
2026

Тираж:
150 примероци

Место на издавање:
Кавадарци

CIP - Каталогизација во публикација
Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

622.22/23:622.3(062)

ТЕХНОЛОГИЈА на подземна и површинска експлоатација на минерални суровини: зборник на трудови / XVII стручно советување со меѓународно учество Подекс-Повекс'26 од 30-31.10.2026 година, Охрид; [главен и одговорен уредник Стојанче Мијалковски]. - Кавадарци:

Здружение на рударски и геолошки инженери на Република Македонија, 2026.-236, [31] стр. : илустр.; 30 см

Библиографија кон трудовите
ISBN 978-608-67464-0-7

а) Рударство -- Експлоатација -- Минерални суровини -- Собири
COBISS.MK-ID 69894661

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

ОРГАНИЗАТОР:

ЗДРУЖЕНИЕ НА РУДАРСКИТЕ И ГЕОЛОШКИТЕ ИНЖЕНЕРИ НА РЕПУБЛИКА МАКЕДОНИЈА
www.zrgim.org.mk

КООРГАНИЗАТОРИ:

УНИВЕРЗИТЕТ “ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ” - ШТИП
ФАКУЛТЕТ ЗА ПРИРОДНИ И ТЕХНИЧКИ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЗА РУДАРСТВО

МАР МАКЕДОНСКА АСОЦИЈАЦИЈА ЗА РУДАРСТВО

НАУЧЕН ОДБОР

Претседател:
Проф. д-р **Зоран Панов,** Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, Северна Македонија.

Членови на научниот одбор:
Проф. д-р **Дејан Мираковски,** Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, Северна Македонија;
Проф. д-р **Стојанче Мијалковски,** Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, Северна Македонија;
Проф. д-р **Зоран Десподов,** Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, Северна Македонија;
Проф. д-р **Ѓорѓи Димов**, Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, Северна Македонија;
Проф. д-р **Радмила Каранакова Стефановска**, Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, С. Македонија;
Проф. д-р **Ристо Поповски**, Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, Северна Македонија;
Проф. д-р **Николинка Донева**, Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, Северна Македонија;
Проф. д-р **Благица Донева**, Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, Северна Македонија;
Проф. д-р **Иван Боев**, Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, Северна Македонија;
Проф. д-р **Ванчо Ациски**, Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”, Штип, Северна Македонија;
Проф. д-р **Виктор Гавриловски**, Машински факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Северна Македонија;
Проф. д-р **Милорад Јовановски**, Градежен факултет, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Северна Македонија;
Проф. д-р **Ивица Ристовиќ**, Рударско-геолошки факултет, Универзитет во Белград, Белград, Србија;
Проф. д-р **Владимир Живановиќ**, Рударско-геолошки факултет, Универзитет во Белград, Белград, Србија;
Проф. д-р **Владимир Павловиќ**, Рударско-геолошки факултет, Универзитет во Белград, Белград, Србија;
Проф. д-р **Раде Токалиќ**, Рударско-геолошки факултет, Универзитет во Белград, Белград, Србија;

Проф. д-р **Војин Чокорило**, Рударско-геолошки факултет, Универзитет во Белград, Белград, Србија;
Проф. д-р **Божо Колоња**, Рударско-геолошки факултет, Универзитет во Белград, Белград, Србија;
Проф. д-р **Радоје Пантовиќ**, Технички факултет во Бор, Универзитет во Белград, Србија;
Проф. д-р **Јоже Кортник**, Факултет за природни науки и инженерство, Универзитет во Љубљана, Љубљана, Словенија;
Проф. д-р **Владимир Бркиќ**, Факултет за рударство, геологија и нафта, Универзитет во Загреб, Загреб, Хрватска;
Проф. д-р **Кемал Гутиќ**, Факултет за рударство, геологија и градежништво, Универзитет во Тузла, Тузла, Босна и Херцеговина;
Проф. д-р **Кемал Зекири**, Факултет за геонауки, Универзитет "Иса Болетини", Митровица, Косово;
Д-р. **Андреј Лепавцов** – Инженерска институција на Македонија, Скопје, Северна Македонија;
Д-р **Кремена Дедељанова**, Научно – технички сојуз за рударство, геологија и металургија, Софија, Бугарија;

ОРГАНИЗАЦИОНЕН ОДБОР

Претседател:
Кристина Крстева, Рудник "Бучим", Радовиш.

Потпретседатели:
Митко Крмзов, Геомин, Струмица;
Пепи Мицев, ДИЕРМС, Скопје;
Проф. д-р **Стојанче Мијалковски**, ФПТН, УГД, Штип.

Генерален секретар:
м-р **Горан Сарафимов**, Рудник "Бучим", Радовиш.

Членови на организациониот одбор:
м-р **Драган Димитровски**, ДИЕРМС, Скопје;
м-р **Борче Гоцевски**, Рудник „САСА", М. Каменица;
м-р **Љупче Ефнушев**, Министерство за енергетика, рударство и минерални суровини, Скопје;
м-р **Андреј Кепевски**, Цементарница „Титан Усје", Скопје;
м-р **Лазе Атанасов**, ДИЕРМС, Скопје;
Ивица Карапетров, Рудник „Бучим", Радовиш;
Емил Јорданов, ГД „Гранит" АД Скопје
Мице Тркалески, „Мермерен комбинат", Прилеп;
Диме Петрески, „Тригон Мајнинг", Скопје
Велимир Стојановски, „Мактек", Скопје
Тони Митевски, Рудник „САСА", М. Каменица;
Мики Дамески, „МИСА-МГ", Скопје;
Сашко Дамески, „МИСА-МГ", Скопје;
Лазар Пончев, „Машинокоп Ресурсис", Кавадарци;
Виктор Шотаровски, „Метсо",Скопје;
Васко Саламовски, „Метсо", Скопје;
Илија Лозановски, „Теиком Тим", Битола

XVII СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ НА ТЕМА:

“ТЕХНОЛОГИЈА НА ПОДЗЕМНА И ПОВРШИНСКА ЕКСПЛОАТАЦИЈА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ”

- со меѓународно учество –

---

30 Октомври 2026, Охрид

Република Северна Македонија

ОРГАНИЗАТОР:

ЗДРУЖЕНИЕ НА РУДАРСКИТЕ И ГЕОЛОШКИТЕ ИНЖЕНЕРИ
НА РЕПУБЛИКА МАКЕДОНИЈА
www.zrgim.org.mk

КООРГАНИЗАТОРИ:

УНИВЕРЗИТЕТ “ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ” – ШТИП
ФАКУЛТЕТ ЗА ПРИРОДНИ И ТЕХНИЧКИ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЗА РУДАРСТВО
www.ugd.edu.mk

МАКЕДОНСКА АСОЦИЈАЦИЈА ЗА РУДАРСТВО
https://www.mchamber.mk/mk/home/asocijacii/3

XVII СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ НА ТЕМА:

“Технологија на подземна и површинска експлоатација на минерални суровини”

ПОДЕКС – ПОВЕКС ’26

ЗРГИМ

Охрид
30 ÷ 31. 10. 2026 год.

ПРЕДГОВОР

Меѓународното стручно советување за подземната експлоатација на минералните суровини (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 суровини и е именувано како ПОДЕКС-ПОВЕКС.
Стручното советување, на тема: технологија на подземна и површинска експлоатација на минерални суровини, 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 шеснаесет советувања (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2022, 2023, 2024 и 2025 год.) учествуваа повеќе автори од 13 држави, кои презентираа 454 стручни трудови.
За ова седумнаесето советување (ПОДЕКС - ПОВЕКС ’26) пријавени се 25 труда, на автори од 5 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 суровини, ќе продолжи и дека во идниот период ова советување ќе прерасне во меѓународен симпозиум.

Уредници

XVII EXPERT CONFERENCE THEMED:

"Technology of underground and surface mining of mineral raw materials"

PODEKS - POVEKS '26

AMGEM

Ohrid
30 ÷ 31. 10. 2026

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 13 countries participated in the previous sixteen conferences (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2022, 2023, 2024 and 2025) presenting 454 expert papers.
Twenty-five authors from 5 countries have registered their expert papers for the XVIIth conference (PODEKS - POVEKS '26).
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

XVII СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ НА ТЕМА:
Технологија на подземна и површинска експлоатација на минерални суровини
ПОДЕКС – ПОВЕКС ’26
ЗРГИМ
Охрид
30 ÷ 31. 10. 2026 год.

СОДРЖИНА

ПРИМЕНЕТИ ПРОГРАМИ ЗА ПРЕКАТЕГОРИЗАЦИЈА НА РУДНИ РЕЗЕРВИ КАЈ НАОЃАЛИШТЕТО “МАРКОВ КАМЕН” * Орце Петковски, Ванчо Ангелов, Ласте Ивановски, Бојан Ивановски..... 1

КАРБОНАТНИТЕ КАРПИ КАКО ВАЖНА СУРОВИНА ЗА АРХИТЕКТОНСКО УКРАСЕН И ГРАДЕЖЕН КАМЕН ВО ОКОЛИНАТА НА ПРИЛЕП * Бојан Ивановски, Ванчо Ангелов, Ласте Ивановски, Орце Петковски..... 12

FROM AUTONOMOUS MINERAL EXPLORATION TO AI-SUPPORTED PROCESSING AND BIOLEACHING REMEDIATION: EU-FUNDED INNOVATIONS ACROSS THE CRITICAL RAW MATERIALS VALUE CHAIN * Marko Komac..... 21

ЗАКОНСКА РЕГУЛАТИВА ПРИ ВРШЕЊЕ ИСТРАЖНИ РАБОТИ И ОБЕЗБЕДУВАЊЕ НА ДОЗВОЛА ЗА ЕКСПЛОАТАЦИЈА НА МИНЕРЛАНИ СУРОВИНИ * Звонко Кушоски, Александар Стоилков, Иван Трпески..... 32

STAKEHOLDER GROUPS IN THE SOCIAL MINING LICENSE AND THE DYNAMICS OF ENGAGEMENT * Ujmir Uka, Ariana Sadiku, Risto Dambov, Kemajl Zeqiri..... 38

ПРИМЕНА НА ВЕШТАЧКАТА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА ВО РУДАРСТВОТО – ПРЕДИЗВИЦИ, МОЖНОСТИ И НОВИ ПРАКТИКИ * Зоран Панов, Душан Биков, Радмила Каранакова Стефановска, Бојан Максимов..... 43

ПРИМЕНА НА ДАЛЕЧИНСКА ДЕТЕКЦИЈА ЗА 3D МОНИТОРИНГ ВО РУДАРСТВОТО * Игор Ивановски, Ѓорѓи Димов, Благица Донева, Стојанче Мијалковски, Радмила Каранакова Стефановска ….. 56

ДИГИТАЛИЗАЦИЈА НА РУДАРСТВОТО И КОНЦЕПТОТ „SMART MINING“: МОЖНОСТИ, ОГРАНИЧУВАЊА И ПЕРСПЕКТИВИ ЗА ПРИМЕНА ВО СЕВЕРНА МАКЕДОНИЈА * Наталија Угрева Тасева, Горанче Гроздаоски, Костадин Ѓорѓиев..... 70

ИНТЕГРИРАН САТЕЛИТСКИ ПРИСТАП ЗА РАНА ДЕТЕКЦИЈА НА ПРОМЕНИ И НАСОЧУВАЊЕ НА ТЕРЕНСКИТЕ АКТИВНОСТИ ВО ПОДРАЧЈА НА ПОВРШИНСКА ЕКСПЛОАТАЦИЈА * Бојан Максимов, Зоран Панов, Ристо Поповски, Радмила Каранакова Стефановска …… 81

АНАЛИЗА И ОЦЕНКА НА ПОТРЕБАТА ОД ОДВОДНУВАЊЕ И ЗАШТИТА НА ПК ЖИВОЈНО ВО ФАЗАТА НА ОТВОРАЊЕ * Александар Стоилков, Звонко Кушоски, Иван Трпески …… 91

TECHNOLOGY OF WORKING OF NEW MECHANIZATION AT THE SURFACE MINE "FIELD E" OF MINING BASIN "KOLUBARA" * Milos Živanovic, Milan Jovanović..... 98

ОПТИМИЗАЦИЈА НА ДУПЧЕЧКО-МИНЕРСКИТЕ РАБОТИ СО ПРИМЕНА НА СОФТВЕРОТ O-PITBLAST: КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА НА МИНСКИ СЕРИИ ВО БОРОВ ДОЛ И БУЧИМ * Горан Јованов, Пепи Мицев, Наталија Угрева Тасева..... 109

АНАЛИЗА НА РАБОТНИТЕ ПЕРФОРМАНСИ, ОДРЖУВАЊЕТО И ЕКСПЛОАТАЦИОНИОТ ВЕК НА ДАМПЕРСКИТЕ ГУМИ ВО РУДНИКОТ БОРОВ ДОЛ * Горан Сарафимов, Драган Димитровски, Марјан Томов….. 118

КОНФИГУРАЦИИ НА ПРОЦЕСНИ ДУПЧОТИНИ И НИВНА ПРИМЕНА ВО ТЕХНОЛОГИЈАТА НА ПОДЗЕМНА ГАСИФИКАЦИЈА НА ЈАГЛЕН * Радмила Каранакова Стефановска, Зоран Панов, Ристо Поповски, Благица Донева, Бојан Максимов……..... 126

ОПИСНИ МЕТОДОЛОГИИ ЗА ИЗБОР НА РУДАРСКИ ОТКОПНИ МЕТОДИ * Стојанче Мијалковски, Александар Петровски, Драги Пелтечки..... 138

ГЕОМЕХАНИЧКИ МЕТОДОЛОГИИ ЗА ИЗБОР НА РУДАРСКИ ОТКОПНИ МЕТОДИ * Стојанче Мијалковски, Зоран Десподов, Дражана Тошиќ, Николинка Донева, Драги Пелтечки..... 147

FROM INSTALLED TO VERIFIED: PRACTICAL QA/QC, ACTIVE GROUND SUPPORT AND MONITORING FOR DIFFICULT UNDERGROUND MINING CONDITIONS * Petr Čada, Štefan Súkeník……..……..…. 158

ПРИДОНЕС ВО УСОВРШУВАЊЕТО НА КАПИТАЛНАТА ПОДГОТОВКА ЗА ОТКОПУВАЊЕ НА ЖИЧНИ РУДНИ НАОЃАЛИШТА ВО РЕПУБЛИКА СЕВЕРНА МАКЕДОНИЈА * Зоран Десподов, Николинка Донева, Стојанче Мијалковски, Дарко Начковски……..……... 167

ВЛИЈАНИЕ НА *pH* НА ФЛОТАЦИСКИОТ МЕДИУМ ВРЗ СЕЛЕКТИВНОСТА НА ФЛОТАЦИЈАТА ПРИ ПРИСУСТВО НА ГЛИНЕСТИ МИНЕРАЛИ – МИНЕРАЛОШКО-ТЕХНОЛОШКА И ИНДУСТРИСКА АНАЛИЗА * Милена Дановска, Наталија Угрева Тасева, Игорче Трајанов……..…… 177

ОД ПРОЦЕНА НА РИЗИК ДО ПРИМЕНА НА БЕЗБЕДНОСНИТЕ МЕРКИ ВО ПОВРШИНСКИТЕ КОПОВИ (СОГЛЕДУВАЊА ОД ПРАКТИКАТА НА ВЕШТАЧЕЊЕ) * Младен Бошковски……..... 187

ВЛИЈАНИЕТО НА БЕЗБЕДНОСНАТА КУЛТУРА ВРЗ СТАПКАТА НА ЗАЧЕСТЕНОСТ НА ИНЦИДЕНТИ ПРИ РАБОТА – ТЕОРЕТСКО-АНАЛИТИЧКИ ПРИСТАП * Станке Тасковски, Стојанче Мијаловски, Марија Хаџи – Николова, Горан Андонов……..... 195

HEALTH AND SAFETY INSPECTIONS IN INDUSTRIAL SETTINGS, ACCIDENT INVESTIGATIONS AND REGULAR INSPECTIONS * Kemajl Zeqiri, Izet Zeqiri……... 205

КВАЛИТЕТ НА ВОЗДУХ ВО БЛИЗИНА НА РУДНИК ЗА БАКАР БУЧИМ – ПОВРШИНСКИ КОП БОРОВ ДОЛ * Марина Санева…… 213

AQUA GUARD AI: РАЗВОЈ НА ИНТЕЛЕГЕНТЕН РОБОТСКИ СИСТЕМ ЗА МОНИТОРИНГ НА ВОДИ ВО ПРИБЛИЖНО РЕАЛНО ВРЕМЕ * Ана Михаиловска, Весна Христовска, Афродита Зенделска, Дејан Мираковски, Сашо Коцески, Ѓорѓи Димов, Рубин Гулабоски..... 220

СЕИЗМОЛОШКИ ПОДАТОЦИ КАКО ОСНОВА ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЈА НА ПОТЕНЦИЈАЛНИ ГЕОХАЗАРДИ ВО ВАРДАРСКА СЕИЗМОГЕНА ЗОНА * Катерина Дрогрешка, Јасмина Најдовска, Драгана Черних, Свемир Горин, Благоја Марковски, Иван Радевски, Ирена Стојковска, Љубчо Јованов, Ивана Молеровиќ, Моника Андрееска, Арсе Кузмановски, Ерблина Зеќири Синани..... 228

ЗРГИМ

XVII ТО СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ НА ТЕМА:
Технологија на подземна и површинска експлоатација на минерални суровини

ПОДЕКС – ПОВЕКС ’26

Охрид
30 – 31. 10. 2026 год.

ПРИМЕНА НА ДАЛЕЧИНСКА ДЕТЕКЦИЈА ЗА 3D МОНИТОРИНГ ВО РУДАРСТВОТО

Игор Ивановски[1], Ѓорѓи Димов[1], Благица Донева[1], Стојанче Мијалковски[1], Радмила Каранакова Стефановска[1]

[1]Факултет за природни и технички науки – Штип, Македонија

Апстракт: *Дигитализацијата на рударството значително ја зголеми примената на далечински методи за 3D картирање, мониторинг и геотехничка проценка. Structure-from-Motion (SfM) фотограметријата и Light Detection and Ranging (LiDAR) овозможуваат брзо добивање густи облаци од точки од небезбедни, стрмни или тешко достапни површини, со што се намалува изложеноста на персоналот на опасности и се создава квантитативна основа за повторлив мониторинг. Во трудот се прикажани принципите на SfM и LiDAR, нивните предности и ограничувања, работните текови за отворени и подземни рудници и нивната примена во 3D картирање, структурна карактеризација и мониторинг. Досегашните истражувања укажуваат дека интегрирањето на UAV-SfM, TLS/UAV-LiDAR, SLAM-MLS и класичните геотехнички инструменти овозможува комбинирање на нивните различни просторни и временски предности. Битно е да се напомене дека далечинската детекција не ги заменува геолошките и геотехничките истражувања, туку значително ја проширува нивната просторна покриеност, повторливост и безбедност.*

Клучни зборови: *SfM, фотограметрија, LiDAR, UAV, TLS, SLAM, рудници, стабилност на косини, 3D облак од точки, мониторинг.*

APPLICATION OF REMOTE SENSING FOR 3D MONITORING IN MINING

Igor Ivanovski[1], Gorgi Dimov[1], Blagica Doneva[1], Stojance Mijalkovski[1], Radmila Karanakova Stefanovska[1]

[1]Faculty of Natural and Technical Sciences, Goce Delčev University, Štip, North Macedonia

Abstract: *The digitalization of mining has significantly increased the application of remote sensing methods for 3D mapping, monitoring, and geotechnical assessment. Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry and Light Detection and Ranging (LiDAR) enable the rapid acquisition of dense point clouds from unsafe, steep, or difficult-to-access surfaces, thereby reducing personnel exposure to hazards and providing a quantitative basis for repeatable monitoring. This paper presents the principles of SfM and LiDAR, their advantages and limitations, workflows for open-pit and underground mines, and their application in 3D mapping, structural characterization and monitoring. Current research indicates that an integrated approach combining UAV-SfM, TLS/UAV-LiDAR, SLAM-MLS, and conventional geotechnical instruments can exploit the complementary spatial and temporal advantages of these technologies. It is important to emphasize that remote sensing does not replace geological and geotechnical investigations; rather, it significantly extends their spatial coverage, repeatability, and safety.*

Keywords: *SfM, photogrammetry, LiDAR, UAV, TLS, SLAM, mine, slope stability, 3D point cloud, monitoring.*

1. ВОВЕД

Стабилноста на косините, контролата на деформациите и навременото препознавање на опасни геолошки структури се меѓу најважните задачи во современото рударство. Кај отворените копови, високите завршни косини, работните етажи, одлагалиштата и јаловиштата постојано ја менуваат геометријата, додека кај подземните рудници ризикот е поврзан со конвергенција на отвори, падови на карпи, деформации на подграда и ограничена видливост. Класичните методи – геолошко картирање, тотална станица, екстензометри, инклинометри, призми и радар – остануваат основа на геотехничкиот мониторинг, но често имаат ограничена просторна покриеност или бараат пристап до небезбедни зони (Jaboyedoff et al., 2012; Sturzenegger and Stead, 2009a; Le Roux et al., 2025).

Развојот на дигиталната фотограметрија, UAV (Unmanned Aerial Vehicle – беспилотно летало) платформите и компактните LiDAR системи овозможи создавање детални 3D модели со милиони точки во релативно краток период. SfM алгоритмите автоматски ја реконструираат положбата на камерата и тридимензионалната геометрија од серија преклопени фотографии, додека LiDAR директно го мери растојанието до површината преку ласерски импулси. Во инженерската геологија овие технологии се користат за одредување ориентација, растојание меѓу дисконтинуитетите и континуитет на дисконтинуитети, идентификација на потенцијални механизми на лом, волуметриски пресметки и споредба на повеќе временски епохи (Westoby et al., 2012; Lato et al., 2009b; Riquelme et al., 2014, 2015, 2018).

Во рударството дополнителна предност е можноста за снимање на површини без непосредно присуство на човек. UAV фотограметријата е особено погодна за отворени копови, додека мобилниот LiDAR со SLAM (Simultaneous Localization and Mapping – истовремена локализација и мапирање) станува клучна технологија во подземни простории каде GNSS (Global Navigation Satellite System – глобален навигациски сателитски систем) сигналот не е достапен. Современите прегледи покажуваат дека UAV-SfM и LiDAR веќе се користат не само за геометриска документација, туку и како основа за автоматска детекција на промени, геотехничка класификација и дигитални близнаци на рудници (Singh et al., 2023; Le Roux et al., 2025; Sarvi et al., 2026). Трудот има прегледно-синтетички карактер и ги анализира современите примени на SfM и LiDAR технологиите во површински и подземни рудници. Покрај избрани меѓународни примери, посебно се разгледани досегашните искуства од Македонија и е предложен практичен работен тек за интегриран 3D мониторинг.

2. ОСНОВИ НА ТЕХНОЛОГИИТЕ

2.1. Structure-from-Motion (SfM) фотограметрија

SfM (Сл. 1) е фотограметриска техника базирана на компјутерска визија која од повеќе фотографии снимени од различни позиции ги определува релативните позиции и ориентации на камерите и ја реконструира 3D структурата на сцената. Типичниот работен тек вклучува снимање со висок надолжен и попречен преклоп, автоматско препознавање на карактеристични точки, заедничко израмнување на снимките (bundle adjustment), создавање редок и густ облак од точки (sparse и dense point cloud), полигонална мрежа (mesh), ортомозаик и дигитален модел на површината. Westoby et al. (2012) ја дефинираат SfM како

флексибилен и релативно нискобуџетен пристап за високорезолуциско геоморфолошко снимање, а UAV платформите ја проширија примената на големи и тешко пристапни рударски површини.
За стрмни руднички косини класичното вертикално UAV снимање често е недоволно, бидејќи челата на етажите се приближно вертикални. Затоа се користат коси (oblique) фотографии, повеќенасочни патеки и комбинација од вертикално (надирско) снимање и странично снимање. Георефернцирањето може да се изведе со GCP точки, RTK/PPK позиционирање или со комбинација од UAV и TLS контрола. Интегрираниот пристап е особено корисен кај копови со високи етажи, каде различните сензори се надополнуваат во областите со оклузија (појава на засолнување на делови од набљудуваната површина, при што тие не се директно видливи за камерата или сензорот, што може да резултира со празнини во 3D облакот од точки) или слаба текстура (Tong et al., 2015; Sarvi et al., 2026).

2.2. LiDAR: TLS, UAV-LiDAR и мобилен/SLAM LiDAR

LiDAR (Сл. 1) е активна метода која користи емисии од ласерски импулси и според времето на нивното враќање ја пресметува далечината до површината. За геотехнички цели се применуваат статички терестријален ласерски скенер (TLS), мобилен ласерски скенер (MLS), UAV-LiDAR и SLAM-базирани рачни, возилни или роботски системи. TLS нуди висока геометриска точност и е погоден за повторлив мониторинг на конкретни косини, додека UAV-LiDAR овозможува широка просторна покриеност и е помалку зависен од текстура и осветлување од фотограметријата (Jaboyedoff et al., 2012; Le Roux et al., 2025).
Во подземни услови клучен проблем е отсуството на GNSS. SLAM ја оценува траекторијата на сензорот и истовремено создава 3D карта преку регистрација на последователни LiDAR скенови и, најчесто, инерцијални мерења. Zlot and Bosse (2014) демонстрирале мобилно 3D картирање на повеќе од 17 km подземни руднички простории за 113 min, што ја покажува оперативната предност во однос на статичкото скенирање. Поновите истражувања потврдуваат дека новата генерација SLAM скенери може да обезбеди сантиметарска точност во контролирани подземни траектории, но со поголем шум од статичките TLS системи (Fahle et al., 2022; Štroner et al., 2025). Во табела 1 е направена практична споредба помеѓу главните технологии за рударски мониторинг.



Слика 1. Концептуална споредба помеѓу SfM и LiDAR технологиите (авторска шема)

Табела 1. Споредба на главните далечински технологии за рударски и геотехнички мониторинг

Карактеристика	UAV-SfM	TLS	UAV-LiDAR	SLAM-LiDAR / MLS
Принцип	преклопени RGB фотографии + SfM/MVS	статичко ласерско мерење	LiDAR од UAV платформа	мобилен LiDAR + SLAM/IMU
Главна предност	ниска цена, текстура, голем опфат	висока локална точност и густина	активен сензор; добра геометрија и DTM	брзо снимање без GNSS
Главно ограничување	осветлување, текстура, оклузија	директна видливост; повеќе станици	цена, носивост и планирање на лет	акумулирана грешка во позиционирањето, затворање на јамката и повисок шум
Типична средина	отворен коп, одлагалиште	косина, етажа, тунел	отворен коп, одлагалиште	подземни рудници и тунели
Типична примена	волумени, ортофото, дисконтинуитети, детекција на промени	структурно картирање, деформации, одрон	DTM, геометрија, промени, вегетација	конвергенција, одрон, профили, дигитален близнак
Релативна продуктивност	висока	средна до ниска	висока	многу висока во долги подземни мрежи

2.3. Работен тек и контрола на квалитетот

За да може 3D моделот да се користи за геотехнички одлуки, процесот мора да биде повторлив и документиран. Кај UAV-SfM тоа значи однапред дефинирани висина и брзина на лет, надолжен и попречен преклоп, ориентација на камерата, GSD, RTK/PPK или GCP контрола и конзистентна фотограметриска обработка. Кај TLS се дефинираат стабилни скенерски позиции и таргети, а кај SLAM-LiDAR се планираат траектории што овозможуваат затворање на јамката и повторно поминување низ стабилни делови на рудникот. Без ваква контрола, разликите меѓу две епохи можат да содржат инструментални и регистрациски грешки што погрешно би се интерпретирале како деформација.

Следниот чекор е регистрација на епохите во заеднички координатен систем.

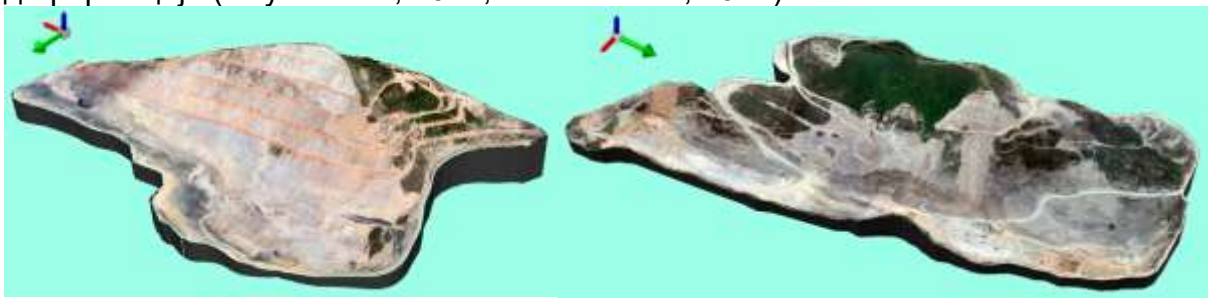
За квантификација на промените, едноставниот пристап за споредба облак-со-облак врз основа на најблизок сосед (cloud-to-cloud nearest-neighbour) е брз, но може да биде чувствителен на различната густина на точките и рапавоста на површината. M3C2 алгоритмот (Lague et al., 2013) ја мери разликата долж локалната нормала на површината и истовремено ја зема предвид локалната рапавост и регистрациската грешка, со што може да се дефинира праг на статистички значајна промена.

Контролата на квалитетот треба да вклучува најмалку: независни контролни точки или референтно скенирање, проценка на средноквадратната грешка (RMSE) и медијанската апсолутна девијација (MAD) при регистрацијата, просторна анализа на резидуалите, документирање на густината на точките и зоните со оклузија, како и определување на практичниот праг на детекција. Кај структурното картирање, дополнително се препорачува проверка на дел од автоматски издвоените рамнини со теренски геолошки компас. На овој начин се разграничуваат грешките поврзани со прибирањето на податоците, регистрацијата и геолошката интерпретација, што претставува предуслов за доверлива примена на производите добиени од облаци од точки при анализата на стабилноста на косините.

3. ПРИМЕНА ВО ОТВОРЕНИ РУДНИЦИ

Отворените копови се динамични 3D системи во кои со напредувањето на експлоатацијата постојано се менуваат етажите, рампите, челата, одлагалиштата и дренажните услови. UAV-SfM е погоден за периодично снимање на целиот коп, создавање ортомозаик, DEM/DSM, пресметка на ископани и одложени волумени и документирање на морфолошки промени.

Интеграцијата со TLS е особено корисна на стрмни етажни косини, каде UAV обезбедува широк опфат, а TLS подетална геометрија на вертикалните површини (Tong et al., 2015) (Сл. 2).
За геотехничка карактеризација, 3D облаците од точки овозможуваат определување на падот и правецот на падот, растојанието меѓу дисконтинуитетите, нивниот континуитет и должината на трагата. Sturzenegger and Stead (2009a, 2009b) покажуваат дека фотограметријата и TLS можат да дадат репрезентативни структурни информации на површини кои не можат безбедно да се измерат со класичен компас. Lato et al. (2009b) развиле процедури за автоматизирана структурна евалуација од LiDAR, а Riquelme et al. (2014) предложиле полуавтоматска класификација на фамилии на пукнатини од 3D облаци; подоцна методологијата е проширена кон растојание меѓу дисконтинуитетите и континуитет (Riquelme et al., 2015, 2018).
Комбинираната примена на UAV и TLS е потврдена и со директни споредби со теренско картирање. Во студија на високи карпести косини, стандардното отстапување помеѓу дигиталните и рачните мерења изнесувало околу 2,97° за пад и 2,86° за насока на падот, што е во граници погодни за инженерско-геолошка анализа и кинематичка проценка (Ismail et al., 2022). Таквите резултати се важни бидејќи покажуваат дека точноста на 3D методите може да биде споредлива со класичното мерење, но со многу поголема просторна покриеност.
Мултитемпоралните UAV или TLS епохи се користат за детекција на деформации и загуба/наталожување материјал. Наместо да се споредуваат само DEM (Digital Elevation Model – дигитален модел на релјефот) растери, 3D point-to-point, cloud-to-mesh или M3C2 (Multiscale Model to Model Cloud Comparison – повеќеразмерна споредба меѓу два 3D облаци од точки) пристапи овозможуваат мерење на промени во правец на локалната нормала на неправилни површини. Овој пристап е особено корисен кај стрмни карпести косини, каде вертикалната компонента сама по себе не ја опишува вистинската деформација (Royán et al., 2014; Kromer et al., 2017).



Слика 2. 3D модел на косини во површински рудник добиен со интеграција на UAV фотограметрија и терестричко ласерско скенирање (TLS) (според Tong et al., 2015)

4. ПРОЦЕНКА И МОНИТОРИНГ НА СТАБИЛНОСТА НА КОСИНИ

Примената на далечинската детекција кај косини може да се подели на три нивоа: (1) геометриска документација, (2) структурна и кинематичка проценка и (3) временски мониторинг на деформации (Сл. 3). Првото ниво обезбедува високорезолуциски 3D модел; второто ги идентификува релевантните рамнини и потенцијалните механизми на лом; третото бара повторливи епохи, стабилен координатен систем и квантитативна анализа на разлики. Само третото ниво овозможува проценка на брзината и развојот на деформацијата низ времето.

При UAV-SfM, квалитетот на мониторингот зависи од конзистентноста на патеката на лет, GSD, преклопот, положбата на GCP/RTK контролата и фотограметриската геометрија. При TLS/MLS особено се важни стабилноста на скенерските позиции, сигурната регистрација на повеќе епохи и дефинирањето на стабилни референтни зони. Систематските прегледи заклучуваат дека не постои една оптимална технологија за сите руднички косини: далечинските методи даваат голема просторна покриеност, додека теренските инструменти обезбедуваат континуирана и често попрецизна локална информација (Le Roux et al., 2025).

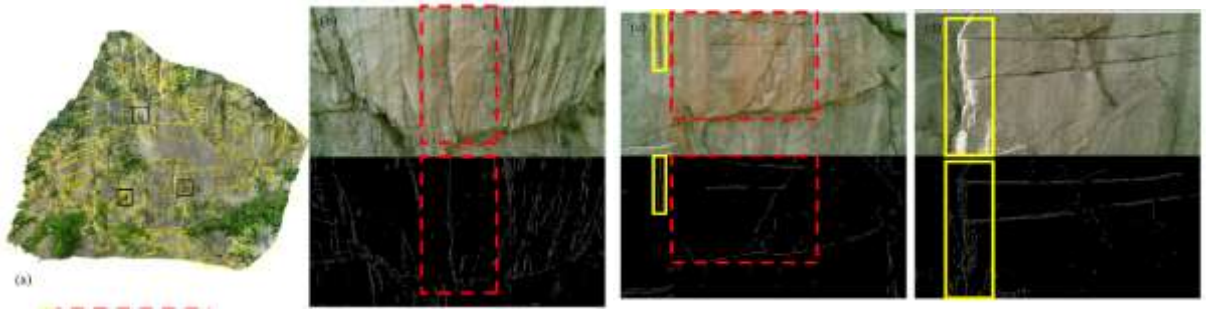


Слика 3. Препорачан работен тек за мултитемпорален мониторинг на руднички косини (авторска шема)

Најновите руднички примери покажуваат дека UAV-SfM може да се користи и за квантификација на големи 3D поместувања. López-Vinielles et al. (2026) анализирале бавно активна нестабилност на рекултивиран јагленов рудник во северозападна Шпанија во период од две години, комбинирајќи мултитемпорална UAV-SfM реконструкција со дигитална корелација на слики (DIC), InSAR и DGNSS. SfM-DIC дал 3D RMSE од 32,8 cm и регистрирал максимално 3D поместување од 306,7 cm на DGNSS контролните точки, блиску до 323,1 cm измерени со DGNSS. Комбинираната фузија на податоци дополнително го намалила 3D RMSE на 30,0 cm. Овој пример покажува дека UAV-SfM не е ограничен само на статичка документација, туку може да надополни InSAR во зони со голем градиент на деформација и фазно преклопување (phase aliasing).

Во активни одлагалишта, Mankar and Koner (2026) развиле повеќеразмерна UAV-SfM рамка што ги поврзува високорезолуциските 3D модели, временската детекција на промени и нумеричка стабилносна анализа. Во критичните делови на одлагалиштето биле утврдени локални вредности на фактор на сигурност што се приближуваат до 1,0 при активно одлагање. Важноста на таквиот пристап е во тоа што геометриските промени добиени со далечинска детекција директно се пренесуваат во геотехнички модел, наместо 3D снимањето да остане само документациска алатка.

Во практичен систем, UAV-SfM или UAV-LiDAR може периодично да ја документира целата косина, TLS да ги следи критичните сектори со поголема точност, а радар, призми, екстензометри и пиезометри да обезбедат висока временска резолуција на веќе идентификувани нестабилни зони (Сл. 4). Ваквата сензорска фузија е понадежна од ослонување на еден инструмент и овозможува геотехничкиот инженер да ги поврзе видливите промени со геолошка структура, вода, минирање и оперативни промени (Jaboyedoff et al., 2012; Kromer et al., 2017; Le Roux et al., 2025; Cui et al., 2025) .



Слика 4. Автоматска идентификација на дисконтинуитети од UAV-добиен 3D облак од точки на карпеста косина (a) преглед на резултатите од идентификацијата; (b) резултати од идентификацијата во прозорец a; (c) резултати од идентификацијата во прозорец b; (d) резултати од идентификацијата во прозорец c. (според Cui et al., 2025)

5. ПРИМЕНА ВО ПОДЗЕМНИ РУДНИЦИ

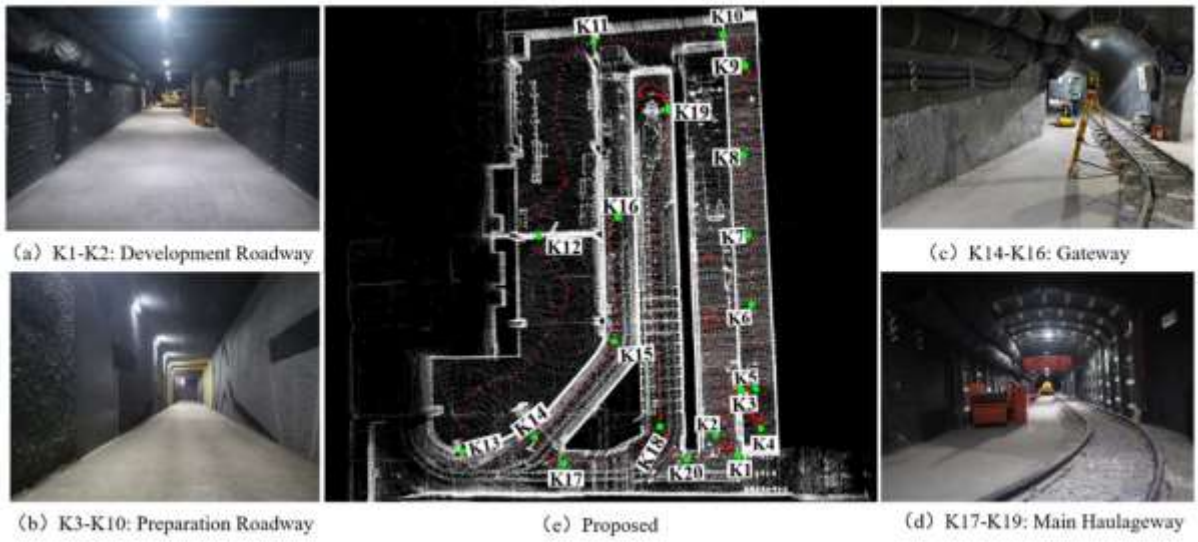
Подземната средина поставува различни барања од отворениот коп: нема GNSS, осветлувањето е ограничено, геометријата е издолжена и често повторлива, а прашина, вода и подвижна механизација можат да влијаат врз сензорите. Затоа класичната фотограметрија е посложена за долги работни простории, додека активниот LiDAR и SLAM се пофлексибилни. Singh et al. (2023) ги издвојуваат геолошкото картирање, геотехничкиот мониторинг, контролата на профилот, волуметриските анализи и навигацијата како главни области на примена на ласерското скенирање во подземни рудници.

Zlot and Bosse (2014) развиле мобилен 3D SLAM систем за Northparkes Mine во Австралија. Сензорскиот пакет, монтиран на лесно возило, картографирал повеќе од 17 km руднички ходници за 113 min, при брзини типични за руднички сообраќај. Дополнително, обработката автоматски генерирала траекторија и 3D облак од точки за време пократко од половина од времето на снимање. Овој пример ја покажува клучната оперативна предност на SLAM: континуирано снимање во движење без потреба од GNSS и без поставување на скенер на голем број статички позиции.

За геотехнички мониторинг, Fahle et al. (2022) тестирале две современи SLAM-MLS платформи во две подземни руднички средини. Затворањето на јамката (loop closure) ја намалило хоризонталната грешка на занос (drift) за околу 75%, а вертикалната за до 90%. При регистрација базирана на SLAM, авторите добиле медијанска точност во однос на вистинската вредност (trueness) од 0,4 cm и MAD-прецизност од 2,9 cm во споредба со статичко референтно скенирање, додека при споредба на две последователни Hovermap епохи прецизноста достигнала 1,36 cm. Истражувањето покажало дека системот може да детектира одрони од сантиметарски размер и конвергенција на подземните отвори, при што за детекција на промени е поважна релативната точност меѓу две временски епохи отколку апсолутната геодетска точност на целата мрежа.

Štroner et al. (2025) директно споредиле четири SLAM и два статички ласерски скенери во 120 m долг криволиниски руднички тунел. По примарно георeференцирање на контролни точки, RMSD за SLAM системите изнесувал 12–24 mm, а за статичките скенери 22–27 mm. Иако SLAM облаците покажале поголем локален шум, резултатите потврдуваат дека новата генерација мобилни системи може да достигне точност споредлива со статичко скенирање за голем број руднички задачи, со значително поголема брзина на аквизиција.

Покрај мониторингот, 3D моделите на подземни простории поддржуваат контрола на прекумерен и недоволен ископ, профили, волумени, документирање на подграда, планирање на механизација и автономна навигација. Интегрирањето на LiDAR, IMU и алгоритми за затворање на јамката и факторски графови (factor graph) ја намалува акумулираната грешка во позиционирањето, но долгите праволиниски ходници и повторливите геометрии остануваат предизвик бидејќи содржат малку уникатни геометриски карактеристики (Ren et al., 2019; Yang et al., 2023) (Сл. 5).



Слика 5. Примена на LiDAR-SLAM во подземен рудник: средина на снимање и генерирана 3D карта со траекторија на мобилниот робот (според Yang et al., 2023).

6. ИСКУСТВА ОД СВЕТОТ

Меѓународните искуства покажуваат дека далечинската детекција во рударството се развива во две паралелни насоки: високопрецизен мониторинг на ограничени критични зони и брзо mine-wide снимање. Следните примери ја илустрираат разликата во просторен размер, точност и оперативна цел (Таб. 2):

Табела 2. Избрани меѓународни примери со квантитативни резултати.

Студија / средина	Технологија	Клучен резултат	Практично значење
Zlot & Bosse (2014), Northparkes, Australia	SLAM-LiDAR + IMU монтиран на возило	>17 km тунели за 113 min	картирање на цел рудник со висока продуктивност
Fahle et al. (2022), две подземни руднички локации	SLAM-MLS, затворање на јамката, регистрација на повеќе временски епохи	до 90% намалување вертикална акумулирана грешка; прецизност од 1,36 cm при повторливи скенови	сантиметарска детекција на промени, одрон и конвергенција
Štroner et al. (2025), 120 m руднички тунел	4 SLAM + 2 статички ласерски скенери	RMSD 12–24 mm SLAM; 22–27 mm статички ласерски скенери	нова генерација SLAM може да биде споредлива со статички ласерски скенери
López-Vinielles et al. (2026), рекултивиран јагленов рудник, Шпанија	UAV-SfM + DIC + InSAR + DGNSS	3D RMSE 32,8 cm; 306,7 cm SfM-DIC vs 323,1 cm DGNSS максимално поместување	следење големи 3D поместувања и дополнување на InSAR
Mankar & Koner (2026), косина на одлагалиште во површински рудник	UAV-SfM + детекција на промени + LEM	3D модел со сантиметарска просторна резолуција; критични делови со FOS близу 1,0	директна врска меѓу далечинската детекција и моделот на стабилност

Примерите укажуваат дека „точност“ мора да се толкува во контекст на задачата. За структурно картирање на една етажа е потребна висока локална геометриска точност и густина, додека за подземна инспекција на ниво на цел рудник продуктивноста, повторливоста и релативната точност помеѓу епохите може да

бидат поважни од апсолутната позиција на секоја точка. Слично, кај многу големи поместувања на руднички косини, UAV-SfM може да даде корисна 3D информација дури и кога точноста не е на милиметарско ниво, затоа што мерените деформации се од редот на дециметри до метри.

7. ИСКУСТВА ОД МАКЕДОНИЈА

Во Република Македонија примената на далечинската детекција, фотограметријата и 3D технологиите во геологијата, патната инфраструктура и рударството во последните години постепено се зголемува. Иако бројот на студии е сè уште ограничен во споредба со меѓународната литература, веќе постојат повеќе примери во кои UAV-SfM фотограметрија, LiDAR, 3D облаци од точки и сателитски снимки се употребени за мониторинг, структурно картирање, геомеханичка анализа и следење на промени во руднички и инфраструктурни средини.

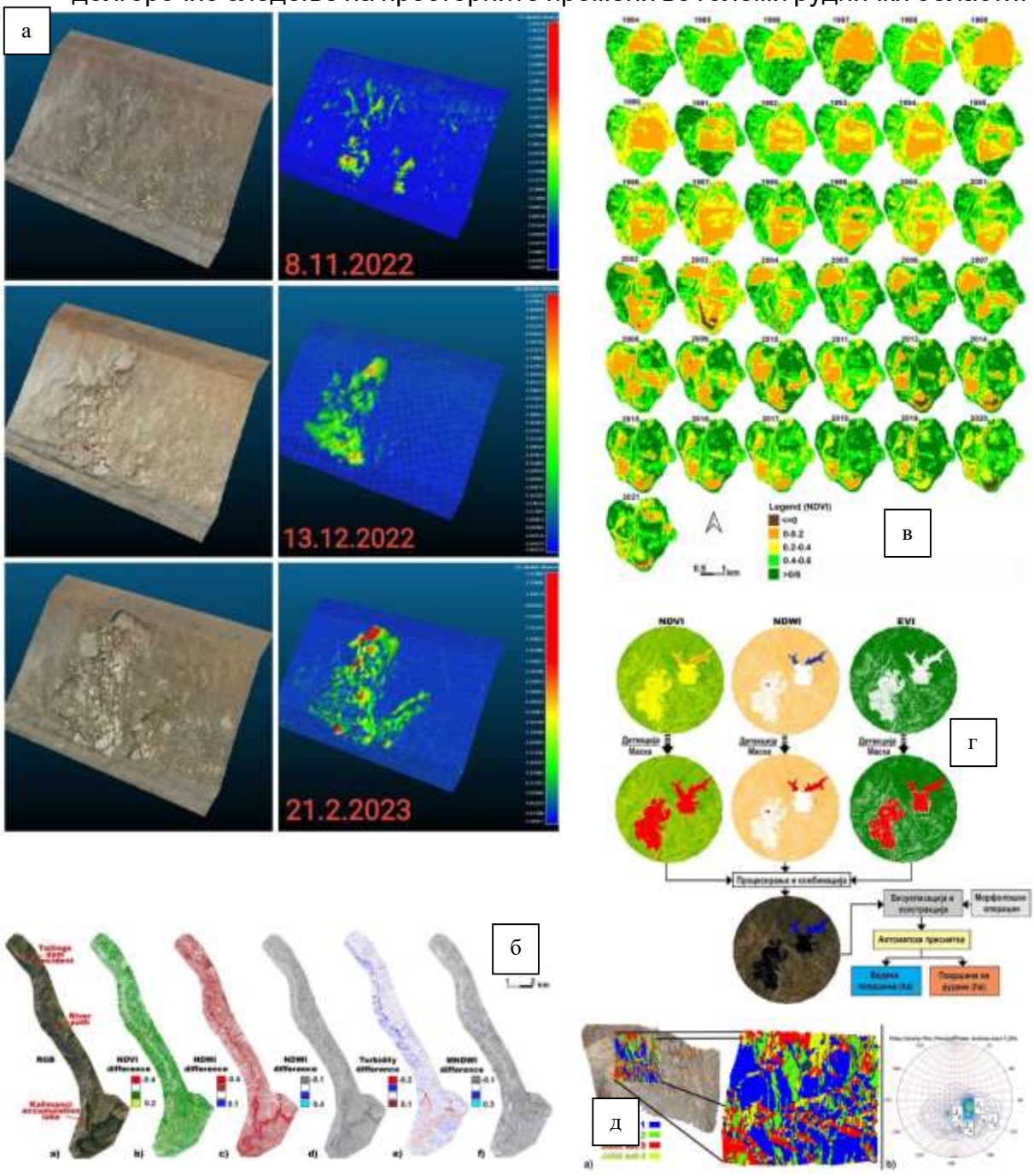
Во претходно истражување на првиот автор, Ivanovski et al. (2024), UAV-SfM фотограметријата е применета за мониторинг на нестабилна косина на експресниот пат А2 Крива Паланка–Страцин. При тоа, е анализиран дел од усек изграден во албит-епидот-хлоритски шкрилци, каде што биле изведени четири последователни снимања во период од пет месеци. Од UAV снимките биле генерирани повеќевременски 3D облаци од точки, а промените на теренот биле определени со споредба на облаците и со примена на M3C2 методот. Анализата покажала поместувања до приближно 70 cm, а резултатите укажале дека нестабилноста била активна и во текот на периодот на набљудување. Авторите ја истакнуваат можноста оваа методологија да се користи како брз, детален и далечински пристап за следење на нестабилни косини како кај патна инфраструктура, така и кај рудници.

Овој пример е значаен бидејќи покажува дека UAV-SfM може да се користи не само за еднократно 3D картирање, туку и за повторлив мониторинг, при кој геометриските промени меѓу различни временски епохи може квантитативно да се определат. Тоа е особено важно кај патни усеци и руднички косини, каде директниот пристап до нестабилните делови често е небезбеден или невозможен.

Во рударството, Adjiski et al. (2021) примениле фотограметриска методологија за 3D реконструкција на карпеста косина и геомеханичка анализа. Генерираниот ориентиран и размерен 3D облак од точки бил искористен за автоматско или полуавтоматско издвојување на дисконтинуитети, определување на нивната ориентација, нормално растојание и континуитет, а добиените резултати потоа биле употребени за пресметка на волуметрискиот број на пукнатини \(J_v\) и за подобрување на проценката на RQD. Овој пример е важен бидејќи покажува дека фотограметријата може да обезбеди не само визуелен 3D модел, туку и податоци што директно може да се користат во геомеханичка карактеризација на карпестата маса.

Покрај 3D фотограметриските и LiDAR методи, во македонското рударство се применуваат и пошироки техники на сателитска далечинска детекција. Adjiski and Zubiček (2023) ја анализирале рудничката област Осломеј со користење на Landsat временски серии, Google Earth Engine, NDVI, Random Forest и LandTrendr алгоритам за периодот 1984–2021 година. Со овој пристап биле следени активностите во површинскиот рудник, рекултивацијата на теренот и развојот на фотоволтаичните капацитети. Класификацијата на различните категории на

користење и покриеност на земјиштето постигнала точност поголема од 90%, што покажува дека сателитските временски серии се корисен инструмент за долгорочно следење на просторните промени во големи руднички области.



Слика 6. Примери од примената на далечинска детекција и 3D технологии во Македонија: а) Ivanovski et al. (2024), б) Adjiski and Zubiček (2025), в) Adjiski and Zubiček (2023), г) Adjiski and Mijalkovski (2023), д) Adjiski et al. (2021).

Дополнителен пример е методологијата на Adjiski and Mijalkovski (2023), развиена за определување на просторната распределба и површинскиот опфат на отворените копови во Република Северна Македонија. Во ова истражување се користат техники на далечинска детекција и спектрални индекси за автоматизирано издвојување и анализа на руднички површини. Ваквиот пристап

ја проширува примената на далечинската детекција од мониторинг на поединечна косина или рудник кон регионално и национално следење на рударските активности.
Далечинската детекција е применета и при анализа на руднички јаловишта и нивното влијание врз животната средина. Adjiski and Zubiček (2025) ја анализирале хаваријата на јаловиштето на рудникот Саса од 2003 година со Landsat 5 снимки и Google Earth Engine. При истражувањето биле комбинирани повеќе спектрални индекси, меѓу кои NDVI, NDMI, NDWI и MNDWI, со цел да се проценат промените во вегетацијата, влагата, водните површини и седиментниот товар по должината на погоденото подрачје. Овој пример покажува дека далечинската детекција може да има значајна улога и во постинцидентен мониторинг, проценка на влијанието и планирање на санацијата на руднички објекти.
Досегашните искуства во Македонија покажуваат дека примената на далечинските методи се развива во неколку паралелни насоки. На локално ниво, UAV-SfM и LiDAR овозможуваат високорезолуциско 3D картирање, структурна анализа и повеќевременски мониторинг на патни и руднички косини. На регионално ниво, сателитските снимки и платформите за обработка како Google Earth Engine овозможуваат следење на долгорочни промени во рудничките области, рекултивацијата, јаловиштата и влијанието врз животната средина. Со нивна интеграција со класични геолошки, геотехнички и геодетски методи може да се добие поцелосна и поповторлива слика за состојбата и развојот на рудничките и инфраструктурните објекти.

8. ДИСКУСИЈА: ПРЕДНОСТИ, ОГРАНИЧУВАЊА И ДОБРА ПРАКТИКА

Главната предност на SfM и LiDAR е преминот од дискретни мерни точки кон континуирана 3D документација. Тоа ја намалува субјективноста при избор на мерни места и овозможува повторно анализирање на истиот дигитален модел без повторно излегување на терен. Кај опасни косини или нестабилни подземни простории ова е директна придобивка за безбедноста. Методите базирани на 3D облаци од точки овозможуваат и автоматизација на задачи кои традиционално биле рачни: класификација на рамнини, извлекување на сетови, растојание меѓу дисконтинуитетите/ континуитет, профили, волумени и промени низ време (Riquelme et al., 2014, 2015, 2018; Cui et al., 2025).
Сепак, „висока густина на точки“ не е исто што и „висока геотехничка точност“. SfM може да има локални деформации ако геометријата на снимањето е слаба; LiDAR може да биде подложен на шум, ефекти од повеќекратно одбивање на сигналот (multipath) и оклузии, додека кај SLAM може да дојде до постепено акумулирање на грешка во позиционирањето (drift). Мултитемпоралниот мониторинг затоа мора да содржи контрола на регистрацијата, проценка на прагот на детекција и стабилни референтни зони. Пред да се интерпретира промена од неколку сантиметри како реална деформација, мора да се покаже дека таа е поголема од комбинираната несигурност на двете епохи (Kromer et al., 2017; Fahle et al., 2022).
Втората критична точка е геолошката интерпретација. Алгоритам може да детектира рамнина, но сам по себе не може сигурно да одлучи дали таа е слоевитост, шкрилавост, расед, пукнатина предизвикана од минирање или артефакт без дополнителен контекст. Затоа оптималниот пристап е „далечинска детекција + инженерска геологија“, а не далечинска детекција наместо

инженерска геологија. Истото важи и за стабилноста: 3D геометријата е влез во анализа, но факторот на сигурност зависи и од јакост, вода, напони, минирање и други параметри што мора да се определат со класични истражувања.
За оперативен рудник би бил добар хиерархиски систем: (1) редовно UAV-SfM/UAV-LiDAR снимање на целиот коп; (2) високорезолуциски TLS или мобилен LiDAR во критични сектори; (3) автоматска детекција на промени во 3D облаци од точки; и (4) интеграција со податоци од радар, призми, инклинометри, екстензометри и пиезометри. Во подземни рудници мобилен SLAM-LiDAR може да стане рутинска инспекциска платформа, особено ако скенерот е интегриран на возило или робот и ако обработката е полуавтоматска. На тој начин далечинската детекција создава просторен контекст, додека класичните инструменти обезбедуваат континуирано предупредување во критичните точки.

9. ЗАКЛУЧОК

SfM фотограметријата и LiDAR се комплементарни, а не конкурентни технологии. SfM е економичен и создава богат визуелен модел; LiDAR обезбедува директна геометрија и подобро работи во услови со слаба текстура или осветлување.
Кај отворени рудници најголем потенцијал имаат UAV-SfM/UAV-LiDAR за редовно 3D снимање и TLS за критични косини. Комбинацијата овозможува структурно картирање, кинематичка анализа, волуметриски пресметки и мултитемпорален мониторинг. Современите студии на случај покажуваат дека UAV-SfM може да регистрира и големи 3D поместувања и да се интегрира со InSAR и нумеричка стабилносна анализа.
Кај подземни рудници SLAM-базираниот мобилен LiDAR е особено перспективен поради работењето без GNSS и големата продуктивност. Објавените резултати покажуваат дека новата генерација SLAM системи може да обезбеди сантиметарска релативна точност, значително намалување на акумулираната грешка во позиционирањето преку затворање на јамката и брзо картографирање на руднички мрежи долги повеќе километри.
Најсигурните системи се интегрирани: далечинска детекција за просторна покриеност, класични геотехнички инструменти за висока временска резолуција и инженерско-геолошка интерпретација за правилно разбирање на механизмот. Идниот развој е насочен кон автоматско препознавање на дисконтинуитети и опасни промени, анализа облак-со-облак (cloud-to-cloud) во речиси реално време, автономни роботи/дронови и дигитални близнаци на рудници.

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

[1] Adjiski, V., Panov, Z., Popovski, R., Karanakova Stefanovska, R. (2021). Application of Photogrammetry for Determination of Volumetric Joint Count as a Measure for Improved Rock Quality Designation (RQD) Index. Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal, 2(1), 12–20.
[2] Adjiski, V., Zubiček, V. (2023). Continuous Monitoring of the Mining Activities, Restoration Vegetation Status and Solar Farm Growth in Coal Mine Region Using Remote Sensing Data. Mining Revue, 29(1), 26–41. https://doi.org/10.2478/minrv-2023-0003
[3] Adjiski, V., Mijalkovski, S. (2023). Methodology for Assessing the Spatial Distribution and Extent of Open-Pit Mines in R. N. Macedonia Through Remote Sensing Analysis. Podeks–Poveks 2023, Ohrid, Republic of Macedonia.

[4] Adjiski, V., Zubiček, V. (2025). Integrated Environmental Impact Assessment of the Sasa Tailing Dam Failure Using Remote Sensing Techniques. Archives of Mining Sciences, 70(3), 525–556. https://doi.org/10.24425/ams.2025.156297
[5] Cui, H., Chen, J., Wang, X., Zhao, Z., Han, J., Sun, Q., Zhang, W. (2025). Intelligent Recognition of Rock Mass Discontinuities on the Basis of RGB-Enhanced Point Cloud Features. Applied Sciences, 15(12), 6510. https://doi.org/10.3390/app15126510
[6] Fahle, L., Holley, E.A., Walton, G., Petruska, A.J., Brune, J.F. (2022). Analysis of SLAM-Based Lidar Data Quality Metrics for Geotechnical Underground Monitoring. Mining, Metallurgy & Exploration, 39, 1939–1960. https://doi.org/10.1007/s42461-022-00664-3
[7] Ismail, A., Ahmad Safuan, A.R., Sa'ari, R., Wahid Rasib, A., Mustaffar, M., Asnida Abdullah, R., Kassim, A., Mohd Yusof, N., Abd Rahaman, N., Kalatehjari, R. (2022). Application of combined terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle digital photogrammetry method in high rock slope stability analysis: A case study. Measurement, 195, 111161. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111161
[8] Ivanovski, I., Nedelkovska, N., Peševski, I., Petrov, G., Jovanovski, M., Nikolovski, T. (2024). Application of 3D Point Cloud Data for Cut Slope Monitoring. Geologica Macedonica, 38(1), 15–30. https://doi.org/10.46763/GEOL24381015i
[9] Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. Natural Hazards, 61, 5–28. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2
[10] Kromer, R.A., Abellán, A., Hutchinson, D.J., Lato, M., Chanut, M.-A., Dubois, L., Jaboyedoff, M. (2017). Automated terrestrial laser scanning with near-real-time change detection – monitoring of the Séchilienne landslide. Earth Surface Dynamics, 5, 293–310. https://doi.org/10.5194/esurf-5-293-2017
[11] Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 82, 10–26. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009
[12] Lato, M.J., Diederichs, M.S., Hutchinson, D.J., Harrap, R. (2009b). Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(1), 194–199. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.04.007
[13] Le Roux, R., Sepehri, M., Khaksar, S., Murray, I. (2025). Slope Stability Monitoring Methods and Technologies for Open-Pit Mining: A Systematic Review. Mining, 5(2), 32. https://doi.org/10.3390/mining5020032
[14] López-Vinielles, J., Herrera, G., Fernández-Merodo, J.A., Mateos, R.M., Sarro, R., García-Davalillo, J.C., et al. (2026). Post-processing UAV-based SfM data using digital image correlation: a complementary approach to InSAR for 3D slope monitoring in mining areas prone to phase aliasing. Engineering Geology, 109045. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2026.109045
[15] Mankar, A.K., Koner, R. (2026). Predictive risk profiling of slopes through multi-scale UAV-based spatiotemporal monitoring. Advances in Space Research, 77(12), 11914–11937. https://doi.org/10.1016/j.asr.2026.04.022
[16] Ren, Z., Wang, L., Bi, L. (2019). Robust GICP-Based 3D LiDAR SLAM for Underground Mining Environment. Sensors, 19(13), 2915. https://doi.org/10.3390/s19132915
[17] Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., Jaboyedoff, M. (2014). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. Computers & Geosciences, 68, 38–52. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014

[18] Riquelme, A., Abellán, A., Tomás, R. (2015). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. Engineering Geology, 195, 185–195. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009
[19] Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J.L., Abellán, A. (2018). Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. Rock Mechanics and Rock Engineering, 51, 3005–3028. https://doi.org/10.1007/s00603-018-1519-9
[20] Royán, M.J., Abellán, A., Jaboyedoff, M., Vilaplana, J.M., Calvet, J. (2014). Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR. Landslides, 11, 697–709. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0442-0
[21] Sarvi, A., Abedini, A., Dadrass Javan, F. (2026). A Review of UAV Photogrammetry Applications in Mining: Structural Mapping and Surface Monitoring. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, X-4/W8-2025, 683–692. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W8-2025-683-2026
[22] Singh, S.K., Banerjee, B.P., Raval, S. (2023). A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining. International Journal of Mining Science and Technology, 33(2), 133–154. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.09.022
[23] Štroner, M., Urban, R., Kremen, T., Braun, J., Michal, O., Jirikovsky, T. (2025). Scanning the underground: Comparison of the accuracies of SLAM and static laser scanners in a mine tunnel. Measurement, 242(A), 115875. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115875
[24] Sturzenegger, M., Stead, D. (2009a). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. Engineering Geology, 106(3–4), 163–182. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004
[25] Sturzenegger, M., Stead, D. (2009b). Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 267–287. https://doi.org/10.5194/nhess-9-267-2009
[26] Tong, X., Liu, X., Chen, P., Liu, S., Luan, K., Li, L., et al. (2015). Integration of UAV-Based Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Three-Dimensional Mapping and Monitoring of Open-Pit Mine Areas. Remote Sensing, 7(6), 6635–6662. https://doi.org/10.3390/rs70606635
[27] Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 179, 300–314. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021
[28] Yang, X., Lin, X., Yao, W., Ma, H., Zheng, J., Ma, B. (2023). A Robust LiDAR SLAM Method for Underground Coal Mine Robot with Degenerated Scene Compensation. Remote Sensing, 15(1), 186. https://doi.org/10.3390/rs15010186
[29] Zlot, R., Bosse, M. (2014). Efficient Large-scale Three-dimensional Mobile Mapping for Underground Mines. Journal of Field Robotics, 31(5), 758–779. https://doi.org/10.1002/rob.21504