



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΕ

***ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ & ΔΙΚΤΥΩΣΗ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΑ ΕΡΓΑ***  
***COMMUNICATION & NETWORKING IN UNDERGROUND MINES***

Πτυχιακή Εργασία

της

*Θεανώ Αποστολίδου Ge05332*

που υποβάλλεται στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων  
του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας  
για τη μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης  
του Πτυχίου Μηχανικού Γεωτεχνολογίας Περιβάλλοντος ΤΕ



Κοζάνη, Ιούνιος 2024

Θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Καπαγερίδη Ιωάννη.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την ατελείωτη υποστήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνση τους. Χωρίς τη δική τους συμπαράσταση, η πορεία μου θα ήταν πολύ πιο δύσκολη.

## *Περίληψη*

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η βιβλιογραφική έρευνα για τις ανάγκες επικοινωνίας και δικτύωσης στα μεταλλευτικά έργα, εστιάζοντας στα υπόγεια μεταλλεία. Στο πρώτο κεφάλαιο, παρέχω γενική επισκόπηση των αναγκών επικοινωνίας και δικτύωσης σε μεταλλευτικά έργα, καθώς και πληροφορίες για τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Στο δεύτερο κεφάλαιο, εξετάζω τις υπόγειες μεθόδους εκμετάλλευσης, συμπεριλαμβάνοντας τη δομή των μεταλλείων, τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται και το προσωπικό που εμπλέκεται. Στο τρίτο κεφάλαιο, εστιάζω στα συστήματα επικοινωνίας και δικτύωσης στα υπόγεια μεταλλεία, συμπεριλαμβάνοντας τις ανάγκες επικοινωνίας του προσωπικού και των μηχανημάτων και θέματα ασφάλειας. Στο τέταρτο κεφάλαιο, εξετάζω τις νέες τεχνολογίες εκμετάλλευσης, με έμφαση στις ανάγκες που δημιουργούνται από τη χρήση αυτόνομων συστημάτων εκμετάλλευσης, τις ανάγκες για δίκτυα μεγάλης ταχύτητας και τηλεμετρία. Στο τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζω τα συμπεράσματά μου, ενώ στο τέλος περιλαμβάνω τη βιβλιογραφία που χρησιμοποίησα. Κατά την ολοκλήρωση της εργασίας, ο στόχος μου είναι να προσφέρω μια ολοκληρωμένη και εμπειριστατομένη κατανόηση των αναγκών επικοινωνίας και δικτύωσης στα υπόγεια μεταλλεία, καθώς και των προκλήσεων και επιλύσεων που σχετίζονται με αυτές τις ανάγκες.

## *Abstract*

This thesis explores the communication and networking needs in mining projects, with a specific focus on underground mines. The first chapter provides a general overview of communication and networking requirements in mining projects, as well as information about underground operations. Subsequent chapters delve into underground mining methods, including the structure of mines, machinery used, and personnel involved. The thesis also examines communication and networking systems in underground mines, addressing the needs of personnel and equipment communication, as well as safety considerations. Furthermore, it discusses emerging technologies in mining operations, highlighting the additional needs arising from the use of autonomous mining systems, high-speed networks, and telemetry. In conclusion, the thesis offers comprehensive insights into the communication and networking requirements in underground mines, along with the challenges and solutions associated with meeting these needs.

## Πίνακας περιεχομένων

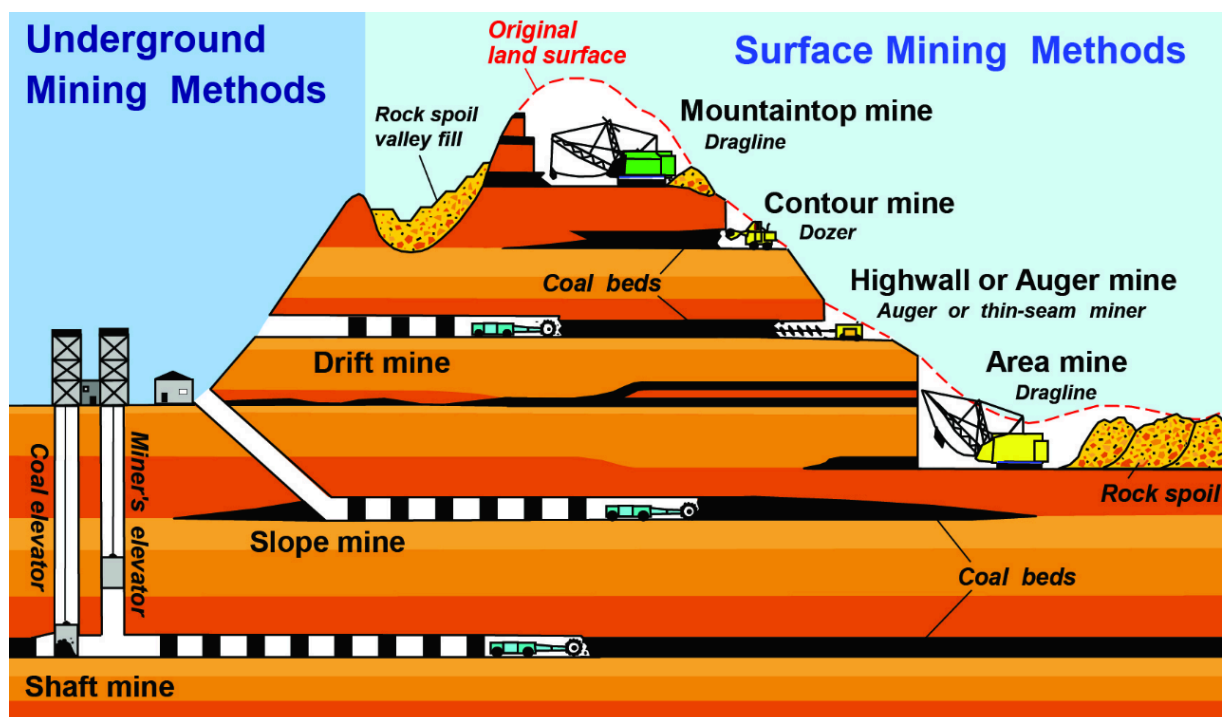
Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα μεταλλευτικά έργα.....	7
1.1 Οι ανάγκες της επικοινωνίας και τα δίκτυα.....	8
1.2 Σκοπός της εργασίας.....	9
Κεφάλαιο 2: Σύντομη παρουσίαση της σημασίας των υπόγειων μεθόδων εκμετάλλευσης....	10
2.1 Δομή των υπόγειων μεταλλείων.....	13
2.2 Μέθοδοι εξόρυξης.....	15
2.2.1 Θάλαμοι και Στύλοι - Room and Pillar mining.....	17
2.2.2 Μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων - Cut and Fill mining...	19
2.2.3 Μέθοδος σε ευθύγραμμο επίμηκες μέτωπο - Longwall mining method.....	21
2.2.4 Μέθοδος των διαδοχικών ορόφων με κατακρήμνιση οροφής - Sublevel caving method.....	23
2.3 Μηχανήματα υπόγειας εξόρυξης.....	25
2.3.1 LHD (load, haul, dump).....	25
2.3.2 Longwall Shearers.....	26
2.3.3 Continuous Miners.....	27
2.3.4 Roof Bolters.....	28
2.3.5 Jumbo Drills.....	29
2.3.6 Shotcrete Machines.....	29
2.3.7 Shuttle Cars.....	31
2.3.8 Rock Dusters.....	32
2.3.9 Ventilation Fans.....	33
2.4 Προσωπικό.....	33
Κεφάλαιο 3: Συστήματα επικοινωνίας και δίκτυα.....	37
3.1 Ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας.....	37
3.2 Επικοινωνία στα υπόγεια μεταλλεία.....	41
3.2.1 Επικοινωνία μέσω της Γης (TTE).....	41
3.2.2 Επικοινωνία μέσω του καλωδίου (TTW).....	42
3.2.3 Επικοινωνία μέσω του αέρα (TTA).....	42
3.2.4 Υβριδική τεχνική επικοινωνίας.....	43
3.3 Ζητήματα που επηρεάζουν την επικοινωνία.....	43
3.3.1 Ακραία απώλεια διαδρομής.....	43
3.3.2 Ανάκλαση/ διάθλαση.....	44
3.3.3 Διάχυση πολλαπλών διαδρομών.....	44
3.3.4 Ταχύτητα διάδοσης.....	44
3.3.5 Φαινόμενο κυματοδηγού.....	44
3.3.6 Θόρυβος.....	44
Κεφάλαιο 4: Νέες τεχνολογίες.....	46

4.1 Ο ρόλος του δικτύου Mesh.....	47
4.1.1 Η χρήση του δικτύου mesh στα υπόγεια ορυχεία.....	49
4.1.2 Προσομοίωση δικτύου σε ορυχείο.....	51
4.2 Ο ρόλος του δικτύου ZigBee.....	55
4.2.1 Η χρήση του δικτύου ZigBee στα υπόγεια ορυχεία.....	57
4.2.2 Ορυχείο Angas Zinc στη Νότια Αυστραλία.....	60
4.2.3 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στο ορυχείο Angas.....	63
4.3 Τηλεμετρία.....	67
4.3.1 Ορυχείο χρυσού Casa Berardi.....	71
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....	73
Βιβλιογραφία.....	74

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα μεταλλευτικά έργα

Μαζί με τη γεωργία, η εξόρυξη θεωρείται ένα από τα από τις αρχαιότερες προσπάθειες της ανθρωπότητας. Παρά τη μεγάλη της ιστορία, η εξόρυξη εξακολουθεί να διατηρεί τη σημασία της στη σύγχρονη ζωή υποστηρίζοντας την ανθρωπότητα με ενέργεια (π.χ. πετρέλαιο, ουράνιο κ.λπ.) και πολύτιμους πόρους (π.χ. νερό, σίδηρο, χρυσό κ.λπ.). Με μια ευρύτερη έννοια, το ορυχείο ορίζεται ως "μια εκσκαφή που γίνεται στη γη για την εξόρυξη ορυκτών", ενώ η εξόρυξη ορίζεται ως "η δραστηριότητα, το επάγγελμα και η βιομηχανία που ασχολείται με την εξόρυξη ορυκτών"(Moridi, M. A., & Jang, H. D. 2018).

Η εξόρυξη μπορεί να χωριστεί σε δύο ομάδες ανάλογα με τον τρόπο εκσκαφής: Την επιφανειακή εξόρυξη και την υπόγεια εξόρυξη. Δύο σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτών των ομάδων είναι τα μηχανήματα εξόρυξης και οι άνθρωποι που εργάζονται στο έδαφος μαζί, όπως και το ότι οι εργασίες πρέπει να διεξάγεται κάτω από το έδαφος.



**Σχήμα 1.1:** Υπόγεια εξόρυξη (ορυχείο ολίσθηση, κλίσης, φρεατίου) & Επιφανειακή εξόρυξη (ορυχείο σε κορυφή βουνού, περιφερειακή εκμετάλλευση & με γεωτρύπανο).

Η υπόγεια εξόρυξη μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε υποομάδες ανάλογα με την μέθοδο πρόσβασης στο ορυκτό που πρόκειται να εξορυχθεί. Κύριες υποομάδες στις μεθόδους υπόγειας εκμετάλλευσης: Μέθοδος των θαλάμων και στύλων, Μέθοδος διαδοχικών

υποορόφων με κατακρήμνιση οροφής, Μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κ.α.

Η υπόγεια εξόρυξη είναι ένα από τα πιο ακραία επαγγέλματα από διάφορες απόψεις. Πρώτον, οι εργασίες εξόρυξης διεξάγονται σε πολύ επικίνδυνα περιβάλλοντα. Ορισμένοι σημαντικοί τύποι κινδύνου είναι τα ατυχήματα με οχήματα εντός του ορυχείου, οι πτώσεις σε οροφές, η πυρκαγιά, οι εκρήξεις, τα τοξικά αέρια και οι πλημμύρες. Οποιοδήποτε ατύχημα μπορεί να καταλήξει σε θανάτους ή αναπηρίες σε τέτοια περιβάλλοντα υπό αυτές τις συνθήκες (Singh, A., & Kumar, D. 2018).

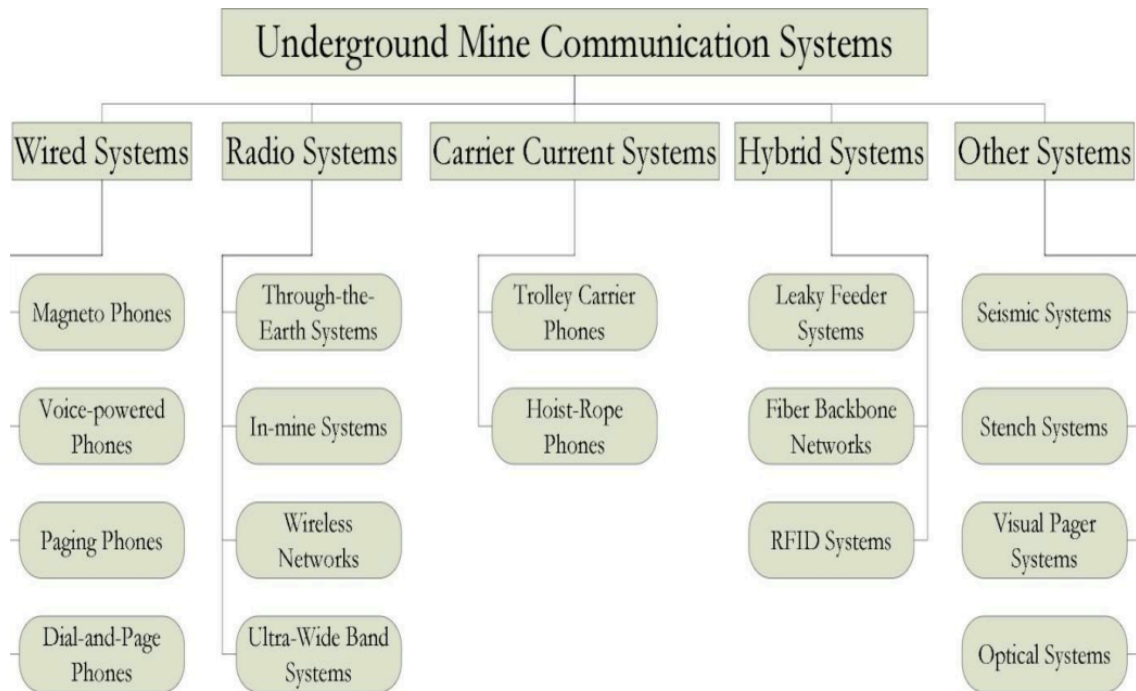
Δεύτερον, όταν ένα σοβαρό ατύχημα γίνει κατά τη διάρκεια των εξορυκτικών εργασιών, η αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης για υπόγεια ορυχεία είναι πολύ πιο δύσκολη από άλλους τύπους εργασιακών περιβαλλόντων. Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι η δομή των υπόγειων ορυχείων δεν επιτρέπει την άμεση αντιμετώπιση των ατυχημάτων. Παρά τις ακραίες αυτές περιβαλλοντικές συνθήκες, η αποδοτικότητα και η παραγωγικότητα είναι δύο ουσιώδεις επιδιώξεις που πρέπει πάντα να τηρούνται κατά τη διάρκεια των μεταλλευτικών εργασιών (Ranjana, A., & Misra, P. 2020).

### *1.1 Οι ανάγκες της επικοινωνίας και τα δίκτυα*

Η επικοινωνία είναι το σημείο τομής όλων των προαναφερόμενων ανησυχιών και εκτιμήσεων, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται σε κάθε στάδιο των εργασιών εξόρυξης. Καθημερινές εργασίες, εξόρυξης και μετακίνησης του μεταλλεύματος διεκπεραιώνονται με τη βοήθεια των επικοινωνιών, γεγονός που αυξάνει την παραγωγικότητα. Η εξ αποστάσεως παρακολούθηση και ο έλεγχος εξαρτώνται επίσης πλήρως από τις επικοινωνίες. Επίσης είναι ζωτικής σημασίας η επικοινωνία όταν συμβαίνει ένα ατύχημα. Η ροή πληροφοριών, συμπεριλαμβανομένου του συντονισμού των εργαζομένων και τον εντοπισμό τους, πραγματοποιείται μέσω των επικοινωνιών σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (Wang, J., Zhou, L. 2018).

Ανάλογα τόσο με τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά όσο και με τη συμπεριφορά της μεθόδου μετάδοσης (π.χ. ραδιοφωνική ή σεισμική μετάδοση), διάφορες κατηγορίες επικοινωνίας μπορούν να σχηματιστούν. Μερικές κατηγορίες επικοινωνίας υπόγειων ορυχείων, μπορεί να είναι οι εξής: 1. Ενσύρματα συστήματα επικοινωνίας, 2. Συστήματα ραδιοεπικοινωνίας, 3. Συστήματα επικοινωνίας με ρεύμα φορέα, 4. Υβριδικά συστήματα, 5. Άλλα συστήματα (Serhan Y, Sabih G, Huseyin A, and R R. Murphy. 2009)





**Σχήμα 1.2:** Ταξινόμηση των μεθόδων επικοινωνίας σε υπόγεια ορυχεία.

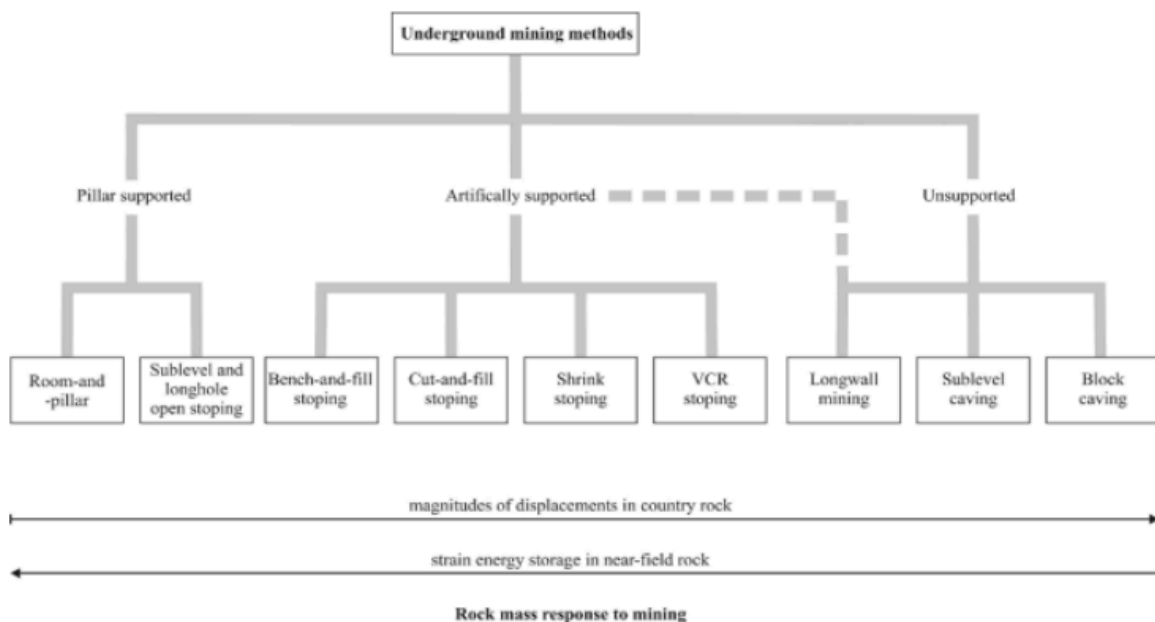
## 1.2 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη και η βιβλιογραφική έρευνα για τις ανάγκες επικοινωνίας και δικτύωσης στα μεταλλευτικά έργα, με έμφαση στα υπόγεια μεταλλεία. Η εργασία αποσκοπεί να προσφέρει μια ολοκληρωμένη κατανόηση των επικοινωνιακών αναγκών στα υπόγεια μεταλλευτικά έργα, εστιάζοντας στις διάφορες τεχνολογίες που ενισχύουν την ασφάλεια και την αποδοτικότητα των εργασιών. Κατά την ολοκλήρωση της εργασίας, το έργο αναμένεται να παρέχει χρήσιμες προτάσεις και λύσεις για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που συναντιούνται, ώστε να βελτιωθεί η επικοινωνία και δικτύωση στα υπόγεια μεταλλευτικά περιβάλλοντα.

## Κεφάλαιο 2: Σύντομη παρουσίαση της σημασίας των υπόγειων μεθόδων εκμετάλλευσης.

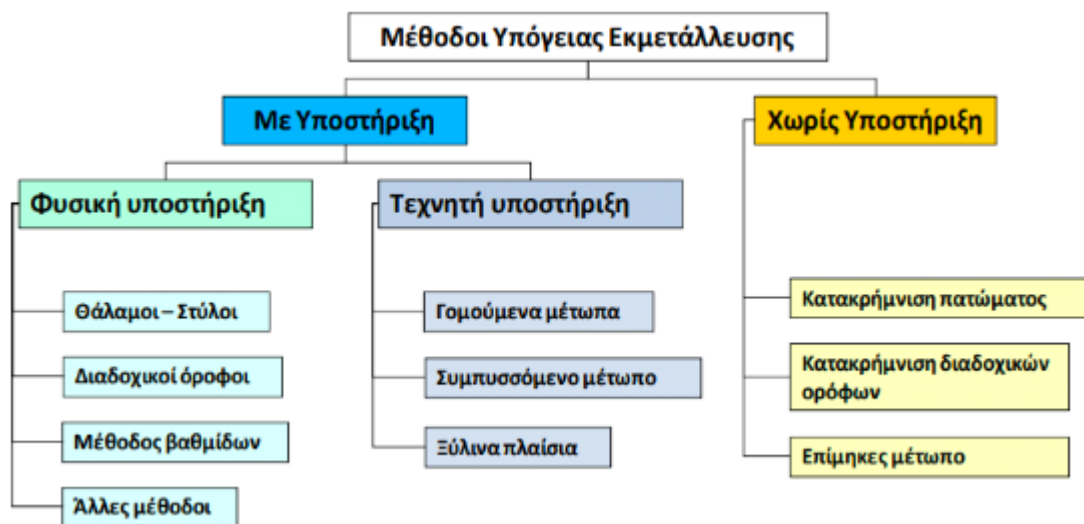
Η ανάπτυξη κοιτασμάτων σε μεγάλα βάθη κυρίως βάθη για τα οποία η εκμετάλλευσή τους από την επιφάνεια δεν μπορεί να γίνει με θετικό οικονομικό αποτέλεσμα οδηγεί στην διερεύνηση της εκμεταλλευσιμότητάς τους με υπόγειες μεθόδους. Οι υπόγειες μέθοδοι εκμετάλλευσης ουσιαστικά επιτυγχάνουν την πρόσβαση στο χώρο ανάπτυξης του κοιτάσματος μέσω έργων προσπελάσεως (στοές, φρέατα, κεκλιμένα και ελικοειδή κεκλιμένα) και την προσβολή και απόσπαση του μεταλλεύματος χωρίς να απαιτείται η μαζική μετακίνηση των υπερκείμενων στειρών πετρωμάτων (Patri, A., & Jayanthu, S. 2019).

Ο κύριος στόχος των μεθόδων υπόγειας εξόρυξης είναι ο διαχωρισμός του κοιτάσματος από τον μητρικό βράχο για να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή ασφάλεια εργαζομένων και έργων, η βελτιστοποίηση της απόληψης (του ποσοστού του κοιτάσματος που μπορεί να αποσπαστεί) και να ελαχιστοποιεί το λειτουργικό κόστος (Bandyopadhyay, L. K., & Mishra, P. K. 2019).



**Σχήμα 2.1:** Ταξινόμηση των μεθόδων υπόγειας εξόρυξης και της σχετικής αντίδρασης της βραχώμαζας στην εξόρυξη.

Οι μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται σήμερα είναι πάρα πολλές μπορούν όμως να καταταγούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες και πιο συγκεκριμένα, τις μεθόδους εκμετάλλευσης: με κενά μέτωπα (open stopes), στις οποίες ο χώρος που απομένει, παραμένει μετά την απόσπαση του μεταλλεύματος, διατηρείται κενός με συνηθέστερα με φυσική υποστήριξη, δηλαδή η υποστήριξη παρέχεται κυρίως από το πέτρωμα. Με γομούμενα μέτωπα (filling stopes), στις οποίες ο χώρος του κοιτάσματος που εκμεταλλεύεται αναπληρώνεται στη συνέχεια με τεχνητό τρόπο συνήθως από στείρα υλικά. Με κατακρημιζόμενα μέτωπα (caving stopes), στις οποίες ο χώρος που έχει πραγματοποιηθεί η απόσπαση του μεταλλεύματος αναπληρώνεται με υλικά μέσω της κατακρήμισης της οροφής του κοιτάσματος (Forooshani, A. E., & Noghianian, S. 2021).



**Σχήμα 2.2:** Διάκριση των βασικών μεθόδων υπόγειας εκμετάλλευσης

Η επιλογή της μεθόδου εκμετάλλευσης ενός κοιτάσματος επηρεάζεται από συγκεκριμένους παράγοντες Την θέση του κοιτάσματος στον χώρο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του (σχήμα, μέγεθος, κλίση). Τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος και των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Την ποιότητα και την αξία του μεταλλεύματος. Τους επιθυμητούς ρυθμούς παραγωγής. Το κόστος του παραγόμενου προϊόντος. Την προστασία του περιβάλλοντος (Ranjan, A., & Misra, P. 2020)

Η εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος πραγματοποιείται σε τρεις βασικές φάσεις:

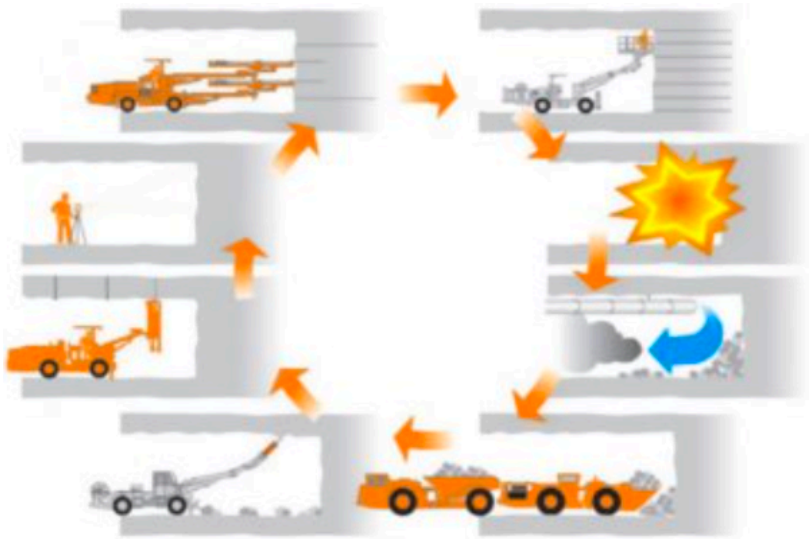
**Προσπέλαση:** Πρόκειται για το πρώτο στάδιο, κατά το οποίο διανοίγονται οδοί πρόσβασης στην περιοχή του κοιτάσματος.

Περιχάραξη: Αφορά στα προπαρασκευαστικά έργα εντοπισμού/ επιβεβαίωσης των ορίων του κοιτάσματος καθώς και στην ανάπτυξη των υποστηρικτικών έργων (στοές, κεκλιμένα, κ.λπ.) που θα χρησιμοποιηθούν για την απόσπαση του κοιτάσματος από το μητρικό πέτρωμα. Μπορεί να γίνεται εντός και εκτός του χώρου ανάπτυξης του κοιτάσματος.

Εξόφληση: Αποτελεί την τρίτη και πλέον αποδοτική φάση, κατά την οποία γίνεται η εκμετάλλευση της μάζας του κοιτάσματος, σύμφωνα με τις προδιαγραφές και παραδοχές της εκάστοτε ακολουθούμενης μεθόδου.

Οι εργασίες εκμετάλλευσης, σε οποιαδήποτε φάση και αν ανήκει αυτή, γίνονται ως επί το πλείστον με τη χρήση εκρηκτικών υλών με τη μέθοδο διάτρησης – ανατίναξης (drill-and-blast). Ουσιαστικά, εισάγονται εκρηκτικές ύλες εντός της μάζας του πετρώματος, η ανατίναξη των οποίων θραύει το πέτρωμα. Πρόκειται για ένα κύκλο παραγωγής, ο οποίος επαναλαμβάνεται συνεχώς μέχρι το πέρας του έργου.

Τα βασικά στάδια του κύκλου εργασιών με τη μέθοδο διάτρησης ανατίναξης είναι τα ακόλουθα (σχήμα 2.3) (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)



**Σχήμα 2.3:** Κύκλος εργασιών για την εξόρυξη

Διάτρηση: Η εξόρυξη διατρημάτων (οπών) με τη βοήθεια ενός διατρητικού φορείου υπογείων από το μέτωπο εκσκαφής εντός της μάζας του πετρώματος ώστε να τοποθετηθούν εκρηκτικά. Γόμωση: Η διαδικασία τοποθέτησης εκρηκτικών υλών στα διατρήματα.

Πυροδότηση: Η ανατίναξη των εκρηκτικών υλών ώστε να επιτευχθεί η διάρρηξη της συνοχής του πετρώματος. Αερισμός: Η απαγωγή των αερίων της ανατίναξης και του

αεροφερόμενου κονιορτού (σκόνης) και η βελτίωση της ποιότητας αέρα στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής. Αποκομιδή (μεταφορά): Η διαδικασία απομάκρυνσης των προϊόντων της ανατίναξης (θραυσμένου υλικού) από την περιοχή του μετώπου προς την επιφάνεια.

Ξεσκάρωμα: Η διαδικασία εκούσιας και ελεγχόμενης απόσπασης επισφαλών και ασταθών τμημάτων/όγκων της οροφής ώστε να αποφευχθεί η μη ελεγχόμενη πτώση τους στο μέλλον.

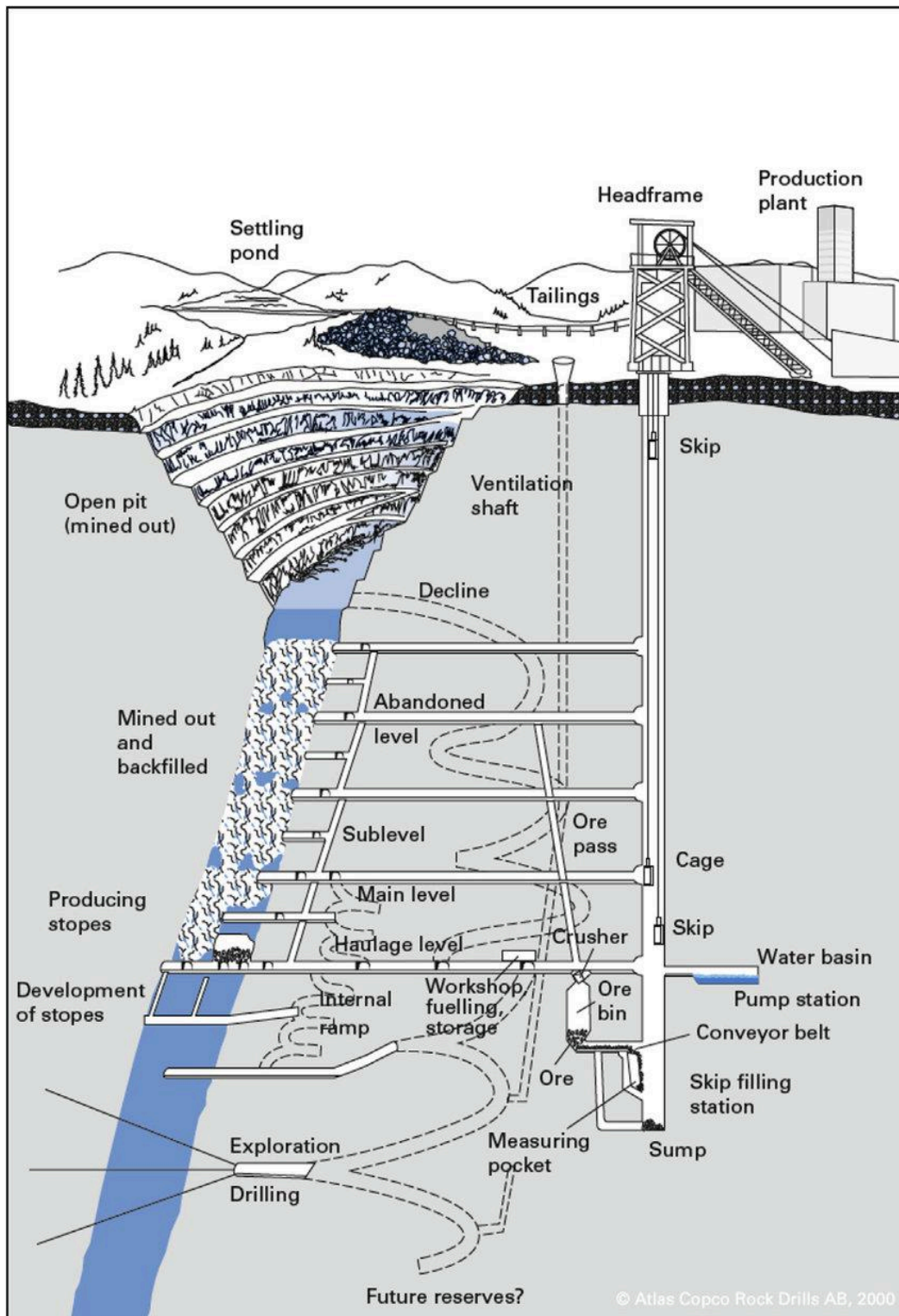
Υποστήριξη: Η διαδικασία κατά την οποία εφαρμόζονται τεχνητά μέτρα ενίσχυσης της αντοχής του πετρώματος και κυρίως της οροφής. Γίνεται κυρίως είτε με την κοχλίωση της οροφής (εισαγωγή μεταλλικών ράβδων εντός διατρημάτων) είτε με την εφαρμογή ξύλινων ή μεταλλικών πλαισίων που υποστηρίζουν την διατομή του υπογείου έργου.

## *2.1 Δομή των υπόγειων μεταλλείων*

Τα υπόγεια ορυχεία είναι η εναλλακτική λύση στα επιφανειακά ορυχεία. Στα επιφανειακά ορυχεία σκάβουν από πάνω προς τα κάτω, μια μέθοδος που μπορεί να καταστεί αναποτελεσματική σε βάθη μεγαλύτερα από περίπου 60 μέτρα. Τα υπόγεια ανθρακωρυχεία μπορούν να φτάσουν στα 750 μέτρα μέσα στη γη και κάποια ακόμη βαθύτερα, τα ορυχεία ουρανίου μπορούν να φτάσουν τα 2 χιλιόμετρα. Αλλά αυτά τα βάθη είναι ακραία, τα περισσότερα φτάνουν στην κορυφή (ή στον πυθμένα) περίπου στα 300 μέτρα. (Bandyopadhyay, L. K., & Mishra, P. K. 2019).

Η εξόρυξη έχει αλλάξει πολύ από τις εικόνες που έχουμε από τον 19ο αιώνα, όταν οι άνδρες με τα φτυάρια κουβαλούσαν καναρίνια για να βεβαιωθούν ότι ο αέρας κάτω από το έδαφος δεν ήταν τοξικός. Τα σύγχρονα ορυχεία διαθέτουν εκτεταμένα συστήματα εξαερισμού και αποχέτευσης νερού, δίκτυα επικοινωνίας υψηλής τεχνολογίας και ολοένα και περισσότερο μηχανογραφημένα μηχανήματα που μειώνουν τον αριθμό των ανθρώπων που απαιτούνται κάτω από τη γη (Patri, A., & Jayanthu, S. 2019).

Όλα τα υπόγεια ορυχεία έχουν κάποια κοινά κρίσιμα στοιχεία: φρεάτια εξαερισμού για την απομάκρυνση των τοξικών αναθυμιάσεων από τις γεωτρήσεις και τις ανατινάξεις, οδεύσεις διαφυγής, φρεάτια πρόσβασης για τη μεταφορά των εργαζομένων και του εξοπλισμού, σήραγγες μεταφοράς μεταλλεύματος, φρεάτια ανάκτησης για τη μεταφορά του ανασκαμμένου μεταλλεύματος στην επιφάνεια και συστήματα επικοινωνίας για την αποστολή πληροφοριών μεταξύ της επιφάνειας και των ανθρώπων που βρίσκονται βαθιά στη γή (Forooshani, A. E., & Noghhanian, S. 2021).



**Σχήμα 2.4:** Τυπικές υποδομές υπόγειων ορυχείων και προσβάσεις (Atlas Copco, 2007).

Ένα τυπικό υπόγειο μεταλλείο, όπως απεικονίζεται από την Atlas Copco το 2007, εικόνα 2.4 έχει τα παρακάτω κύρια στοιχεία και τις υποδομές. Ο κύριος Άξονας (Main Shaft): Ένας κεντρικός κατακόρυφος άξονας που επιτρέπει την πρόσβαση στα διάφορα επίπεδα του

μεταλλείου. Συνήθως περιλαμβάνει ανελκυστήρες για τη μεταφορά εργαζομένων, εξοπλισμού και εξορυγμένων υλικών. Επίπεδα (Levels): Οριζόντιες επιφάνειες σε διαφορετικά βάθη, όπου πραγματοποιείται η εξόρυξη και η μεταφορά υλικών. Τα επίπεδα συνδέονται με τον κύριο άξονα μέσω σήραγγων. Σήραγγες (Drifts και Crosscuts): Οι κύριες σήραγγες (Drifts) συνδέουν τον κύριο άξονα με τα επίπεδα, ενώ οι δευτερεύουσες σήραγγες (Crosscuts) διασταυρώνονται με τις κύριες για την πρόσβαση σε συγκεκριμένες ζώνες εξόρυξης. Ζώνες Εξόρυξης (Stopes): Περιοχές όπου πραγματοποιείται η εξόρυξη του μεταλλεύματος. Μπορεί να είναι οριζόντιες, κάθετες ή κεκλιμένες ανάλογα με τη γεωλογία του κοιτάσματος. Συστήματα Αερισμού (Ventilation Systems): Υποδομές για την παροχή φρέσκου αέρα και την απομάκρυνση των τοξικών αερίων. Περιλαμβάνουν ανεμιστήρες και σήραγγες αερισμού. Συστήματα Μεταφοράς (Transportation Systems): Χρησιμοποιούνται βαγόνια, ταινιόδρομοι και φορτηγά για τη μεταφορά υλικών και εργαζομένων. Υποστήριξη των στοών (Tunnel Support): Χρησιμοποιούνται μεταλλικά πλαίσια, μετόν ή ξύλινες κατασκευές για να αποτραπεί η κατάρρευση των στοών. Αντλίες και Αποχετευτικά Συστήματα: Για την απομάκρυνση των υδάτων που μπορεί να εισρεύσουν στο μεταλλείο.

Υπάρχουν υπόγεια ορυχεία με σκληρά πετρώματα και υπόγεια ορυχεία με μαλακά πετρώματα. Τα κοιτάσματα άνθρακα, για παράδειγμα, βρίσκονται σε σχετικά μαλακά ιζηματογενή πετρώματα. Τα κοιτάσματα χρυσού ζουν σε πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα, τα οποία είναι σχετικά σκληρά, όπως και τα διαμάντια, ο χαλκός, ο άργυρος, το νικέλιο και ο ψευδάργυρος (Ranjan, A., & Misra, P. 2020).

Ακόμη και στην κατηγορία των σκληρών πετρωμάτων, ο σχεδιασμός και οι μέθοδοι εξόρυξης ποικίλλουν, αλλά σχεδόν όλες περιστρέφονται γύρω από μερικές βασικές τεχνικές (Sadeghi, S., & Nasirzadeh, F. 2022):

Η μέθοδος των θαλάμων και στύλων - Room and Pillar

Η μέθοδος του ευθύγραμμου επιμήκους μετώπου - Cut and Fill

Η μέθοδος εξόρυξης σε ευθύγραμμο επιμήκη μέτωπα - Longwall

Η μέθοδος διαδοχικών υποορόφων με κατακρήμνιση οροφής - sublevel caving

## 2.2 Μέθοδοι εξόρυξης

Οι αρχές και οι μέθοδοι εξόρυξης που θα αναλυθούν παρακάτω, έχουν εξελιχθεί για να αντιμετωπίσουν τα γεωτεχνικά και λειτουργικά προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την

ανάκτηση των κοιτασμάτων που χαρακτηρίζονται από ένα ευρύ σύνολο γεωλογικών και γεωμετρικών παραμέτρων. Μια κοινή βιομηχανική απαίτηση είναι να καθοριστεί η καταλληλότερη μέθοδος εξόρυξης για ένα μεταλλευτικό σώμα ή τμήμα ενός μεταλλεύματος και να προσαρμοστεί στις ειδικές συνθήκες που ισχύουν στον προβλεπόμενο τομέα εξόρυξης. Εκτός από τα χαρακτηριστικά του μεταλλευτικού σώματος που επηρεάζουν την επιλογή της μεθόδου, οι διάφορες μέθοδοι εξόρυξης έχουν και οι ίδιες συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν άμεσα το πεδίο εφαρμογής τους. Τα λειτουργικά αυτά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν την κλίμακα εξόρυξης, τον ρυθμό παραγωγής, την επιλεκτικότητα, τις απαιτήσεις πρόσβασης ατόμων και την ευελιξία εξόρυξης. Η τελική επιλογή της μεθόδου εξόρυξης θα αντικατοπτρίζει τόσο τις τεχνικές ιδιότητες του μεταλλευτικού σώματος και του περιβάλλοντός του, όσο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των διαφόρων μεθόδων. (B.H.G. Brady & E.T. Brown 2006)

Μερικές φορές φαίνεται ότι η επιλογή της μεθόδου για μια συγκεκριμένη εξόρυξη μπορεί να παρουσιάσει μεγάλη τεχνική δυσκολία. Με την εξαίρεση που αναλύεται παρακάτω, αυτό δεν ισχύει συνήθως. Στην πραγματικότητα, η επιλογή των πιθανών μεθόδων εκμετάλλευσης ενός κοιτάσματος περιορίζεται γρήγορα, καθώς οι προτεινόμενες μέθοδοι αποκλείονται βάσει συγκεκριμένων ιδιοτήτων του μεταλλευτικού σώματος και του περιβάλλοντός του. Κατά συνέπεια, η ανάπτυξη διαφόρων συστημάτων επιλογής, που βασίζονται στον προσδιορισμό μιας "βαθμολογίας" η οποία υποτίθεται ότι αντικατοπτρίζει τα ακαθάριστα χαρακτηριστικά εξόρυξης ενός μεταλλεύματος, είναι περιττή. Μια τέτοια προσέγγιση συνεπάγεται ότι, για ένα μεταλλευτικό σώμα, οποιαδήποτε μέθοδος εξόρυξης είναι υποψήφια μέθοδος. Αυτό είναι σαφώς αντίθετο με τη φιλοσοφία και την ιστορική εξέλιξη της μηχανικής εξόρυξης. Οι μέθοδοι εξόρυξης αναπτύχθηκαν για να προσαρμοστούν και να εκμεταλλευτούν συγκεκριμένες συνθήκες εξόρυξης. Μια καταλληλότερη διαδικασία που θα έπρεπε να αναπτυχθεί για την επιλογή μεθόδων θα μπορούσε να περιλαμβάνει την τυπική εφαρμογή της εξαλειπτικής λογικής που χρησιμοποιείται στα συστήματα εμπειρογνομόνων που βασίζονται σε υπολογιστές. (B.H.G. Brady & E.T. Brown 2006)

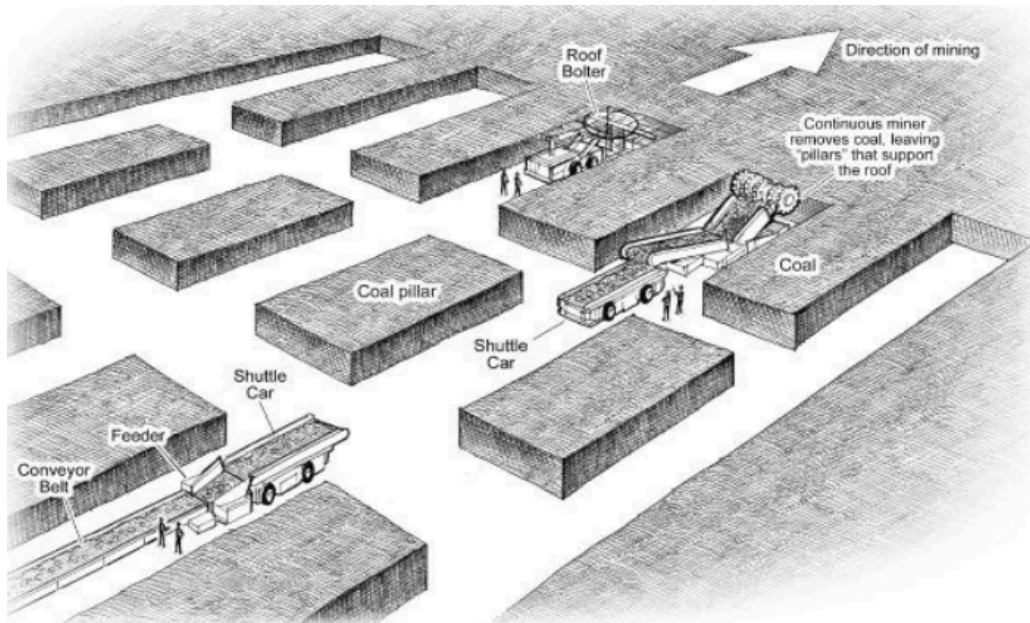
Μια περίπτωση στην οποία η επιλογή μεθόδου εξόρυξης μπορεί να παρουσιάζει δυσκολίες είναι αυτή των μεγάλων, συχνά χαμηλής περιεκτικότητας μεταλλευμάτων που πρέπει να εξορυχθούν με μεθόδους μεγάλης κλίμακας. Ο Hustrulid (2000) δείχνει ότι η εφαρμογή των μεθόδων αξιολόγησης που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο είναι πιθανόν να προσδιορίσει τις μεθόδους block caving, υποεπίπεδης σπηλαίωσης και ανοικτής διάνοιξης ως τις υποψήφιες μεθόδους εξόρυξης σε τέτοιες περιπτώσεις. Σε γενικές γραμμές, η block



caving θα ήταν η προτιμώμενη μέθοδος, λόγω των χαμηλών απαιτήσεων σε εργατικό δυναμικό, του χαμηλού κόστους ανά τόνο και άλλων ευνοϊκών τεχνικών πτυχών. Οι βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται είναι ότι η σπηλαιογένεση μπορεί να ξεκινήσει στο μεταλλευτικό σώμα και ότι θα διαδίδεται σταθερά μέσα στο μεταλλευτικό σώμα καθώς το μετάλλευμα αντλείται από το επίπεδο εξόρυξης. Η πρόβλεψη του δυναμικού σπηλαίωσης ενός μεταλλευτικού σώματος δεν είναι απλή υπόθεση, όπως δείχνει η πλήρης αποτυχία σπηλαίωσης ενός μεταλλευτικού όγκου σε ορισμένες περιπτώσεις και η εφαρμογή συστημάτων "υποβοηθούμενης σπηλαίωσης" σε άλλες. Εδώ και μερικά χρόνια, η πρακτική μέθοδος αντιμετώπισης αυτού του ζητήματος είναι η χρήση μιας μεθόδου που αναπτύχθηκε από τον Laubscher (1994), στην οποία χρησιμοποιείται ένα τροποποιημένο σύστημα αξιολόγησης της βραχώμαζας ως δείκτης της δυνατότητας σπηλαίωσης για μια δεδομένη γεωμετρία υποσκαφής. Αν και η προσέγγιση αυτή είχε χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τα ασθενέστερα και μεγαλύτερα μεταλλεύματα για τα οποία αναπτύχθηκε αρχικά, η πιο πρόσφατη εμπειρία δείχνει ότι μπορεί να μην είναι πάντα σε θέση να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ισχυρότερα, μικρότερα και απομονωμένα ή περιορισμένα μπλοκ ή μεταλλεύματα (Brown, 2003). (B.H.G. Brady & E.T. Brown 2006)

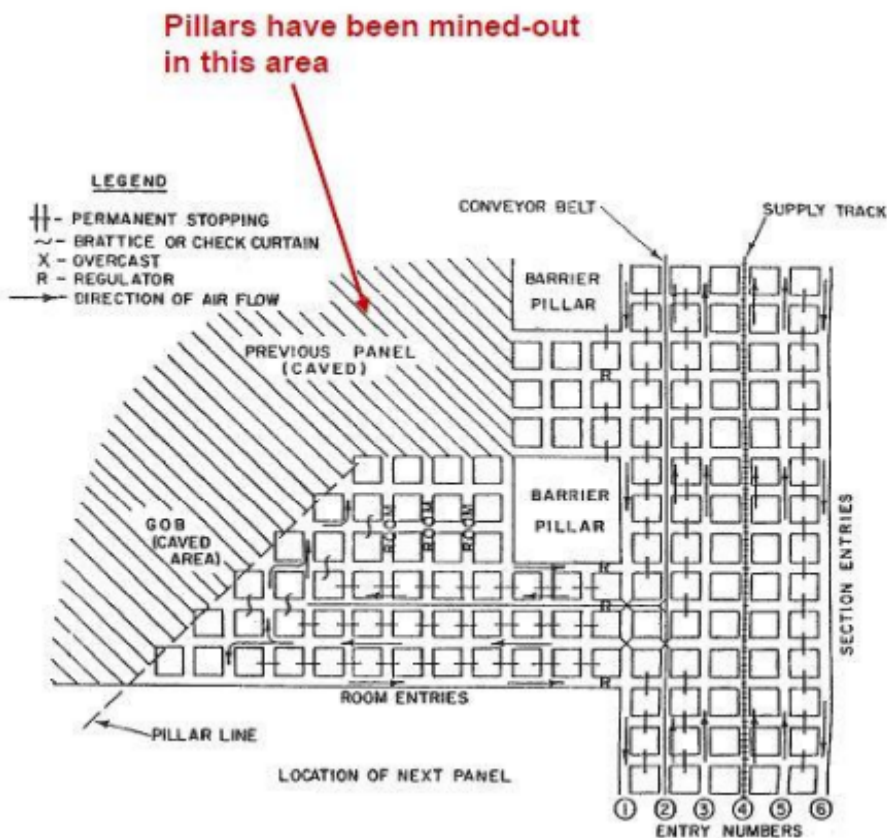
### 2.2.1 Θάλαμοι και Στύλοι - Room and Pillar mining

Είναι η πιο κοινή μέθοδος υποστηριζόμενου πυλώνα, σχεδιασμένη και χρησιμοποιούμενη κυρίως για την εξόρυξη επίπεδων κοιτασμάτων, ή κοιτασμάτων με ελαφρά βύθιση και περιορισμένο πάχος (όπως άνθρακα, σχιστόλιθο, ασβεστόλιθο, φωσφορικά, αλατούχα, τροπα, ποτάσα και μεταλλεύματα ουρανίου). Οι μέθοδοι δωματίου και στύλου είναι καλά προσαρμοσμένες στη μηχανοποίηση και προτιμάτε να εφαρμοστεί για ιζηματογενή κοιτάσματα (όπως σχιστόλιθοι, ασβεστόλιθος, δολομίτης ή ψαμμίτης) που περιέχουν χαλκό, μόλυβδο, ανθρακικές φλέβες, στρώματα φωσφορικών αλάτων και στρώματα εξατμίσεων (αλάτι και ποτάσα). Οι πυλώνες παραμένουν στη θέση τους σε ένα κανονικό μοτίβο, ενώ τα δωμάτια εξορύσσονται. Η στήριξη της οροφής παρέχεται από φυσικούς πυλώνες του ορυκτού που αφήνονται όρθιοι σε ένα συστηματικό μοτίβο. Η κοιλότητα εξόρυξης υποστηρίζεται, διατηρείται ανοιχτή από τη δύναμη των υπολειμμάτων (στύλων) του μεταλλεύματος που δεν έχουν εξορυχθεί. (R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)



**Σχήμα 2.5:** μέθοδος εξόρυξης room-and-pillar

Η μέθοδος εξόρυξης room-and-pillar έχει χαμηλό ποσοστό ανάκτησης (ένα μεγάλο ποσοστό του μεταλλεύματος παραμένει σε θέση στο υπέδαφος). Σε πολλά ορυχεία δωματίου και πυλώνων, οι πυλώνες αφαιρούνται ξεκινώντας από το πιο απομακρυσμένο σημείο από το πρόσβαση στο κοίτασμα, επιτρέποντας στην οροφή να καταρρεύσει και να γεμίσει το κοίτασμα. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη ανάκτηση, καθώς λιγότερο μέταλλευμα μένει πίσω στους πυλώνες. Είναι μια πλεονεκτική μέθοδος εξόρυξης για ρηχά μεταλλευτικά σώματα -ως μέσο αποτροπής της επιφανειακής καθίζησης. Τα ιστορικά, εξαιρετικά ρηχά υπόγεια ανθρακωρυχεία (<30 m) χαρακτηρίζονται ωστόσο από επιφανειακές καθιζήσεις στις περιοχές μεταξύ των πυλώνων (π.χ. ανθρακωρυχείο Witbank, Νότια Αφρική). Μερικές φορές οι πυλώνες εξορύσσονται κατά την υποχώρηση από μια περιοχή εργασίας, προκαλώντας το κλείσιμο και την κατάρρευση αυτών των πλαισίων εργασίας και αυξάνοντας τον κίνδυνο επιφανειακών καθιζήσεων.(R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)



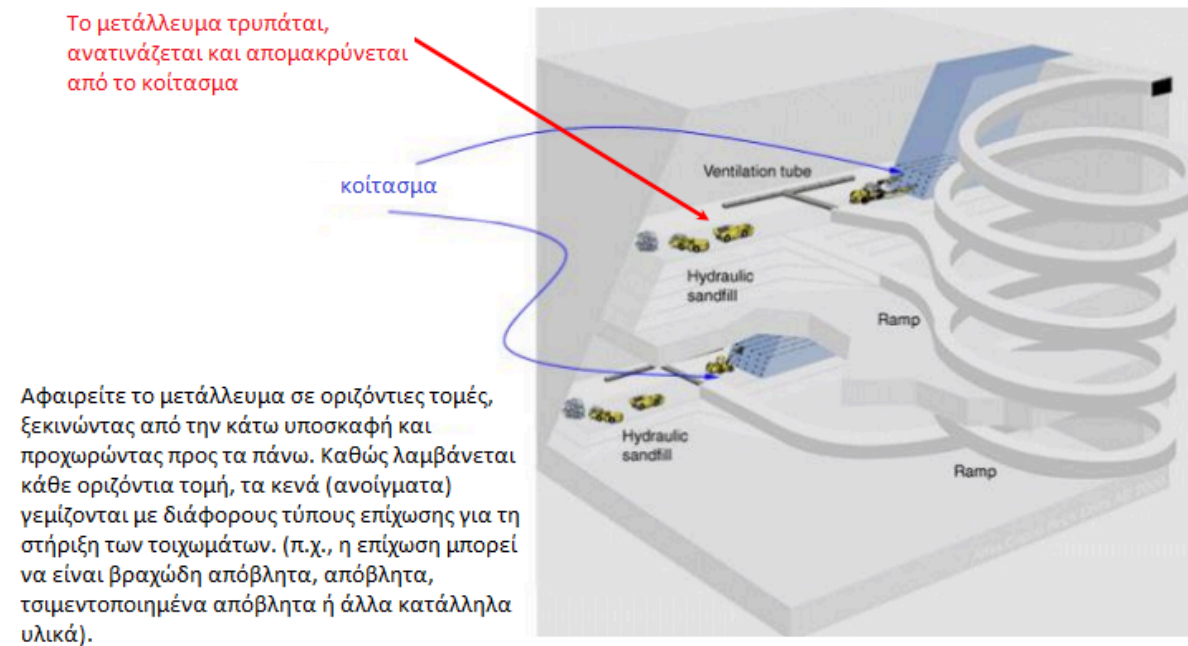
**Σχήμα 2.6:** μέθοδος εξόρυξης room-and-pillar Hartman and Mutmansky, 2002.

### 2.2.2 Μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων - Cut and Fill mining

Είναι μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τα κοιτάσματα φλεβών και η χρήση της έχει αυξηθεί πρόσφατα. Είναι μια ακριβή αλλά επιλεκτική μέθοδος εξόρυξης, με χαμηλή απώλεια μεταλλεύματος και αραίωση (δηλαδή, επιτρέπει την επιλεκτική εξόρυξη και την αποφυγή εξόρυξης αποβλήτων ή χαμηλής ποιότητας μεταλλεύματος). Είναι σχετικά δαπανηρή και ως εκ τούτου γίνεται μόνο σε υψηλής περιεκτικότητας μεταλλευμάτων (Επειδή η μέθοδος περιλαμβάνει τη μετακίνηση υλικού πλήρωσης καθώς και σημαντική ποσότητα γεωτρήσεων και ανατινάξεων). Είναι μια μέθοδος εξόρυξης με βραχυχρόνια εξόρυξη που χρησιμοποιείται σε απότομη κλίση ή Προτιμάται για μεταλλευτικά σώματα με ακανόνιστες ζώνες μεταλλεύματος και διάσπαρτη μεταλλοφορία. Απαιτεί εργασία στο μέτωπο (η οποία είναι λιγότερο ασφαλής από τη διάνοιξη μακράς οπής). (R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)

Χρησιμοποιείται στην εξόρυξη μεταλλευμάτων με απότομη κλίση σε σταθερές βραχομάζες (κυρίως σε κοιτάσματα μετάλλων με απότομη κλίση), σε στρώματα με καλή έως μέτρια σταθερότητα και συγκριτικά υψηλής περιεκτικότητας μεταλλευμάτων. είτε η επιλογή

γεμίσιματος μπορεί να παγιωθεί με σκυρόδεμα, είτε να παραμείνει μη παγιωμένη. Γενικά δεν χρησιμοποιείται τσιμέντο Μέθοδος εξόρυξης από κάτω προς τα πάνω: Απομάκρυνση του μεταλλεύματος σε οριζόντιες φέτες, ξεκινώντας από την υποσκαφή του πυθμένα και προχωρώντας προς τα πάνω. Μέτριοι ρυθμοί παραγωγής. Καλή χρήση των πόρων. Δεν είναι φιλική προς το στρες. Μέτρια υποστήριξη εδάφους.



Σχήμα 2.7: μέθοδος εξόρυξης "cut and fill"

Το μέταλλευμα τρυπάτε, ανατινάζεται και απομακρύνεται από το κοίτασμα. Το μέταλλευμα εξορύσσεται σε τομές: Καθώς λαμβάνεται κάθε οριζόντια ή ελαφρώς κεκλιμένη τομή, τα κενά (ανοίγματα) επιχωματώνονται με διάφορους τύπους γεμίσιματος για τη στήριξη των τοιχωμάτων (π.χ. το γέμισμα μπορεί να είναι βραχώδη απόβλητα, απόβλητα, τσιμεντοποιημένα απόβλητα ή άλλα κατάλληλα υλικά). {(σημείωση: Η πλήρωση χρησιμεύει τόσο για τη στήριξη των τοιχωμάτων της στοάς όσο και για την παροχή πλατφόρμας εργασίας για τον εξοπλισμό κατά την εξόρυξη της επόμενης φλέβας)}.(R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)

Επειδή η μέθοδος περιλαμβάνει τη μετακίνηση υλικών επιχωμάτωσης, καθώς και σημαντική ποσότητα γεωτρήσεων και ανατινάξεων, είναι σχετικά δαπανηρή και, ως εκ τούτου, εφαρμόζεται μόνο σε μεταλλεύματα υψηλής περιεκτικότητας, όπου υπάρχει ανάγκη να είναι επιλεκτική και να αποφεύγεται η εξόρυξη αποβλήτων ή μεταλλεύματος χαμηλής περιεκτικότητας. Πραγματοποιείται τόσο κατά την άνωθεν (προς τα πάνω) όσο και κατά την

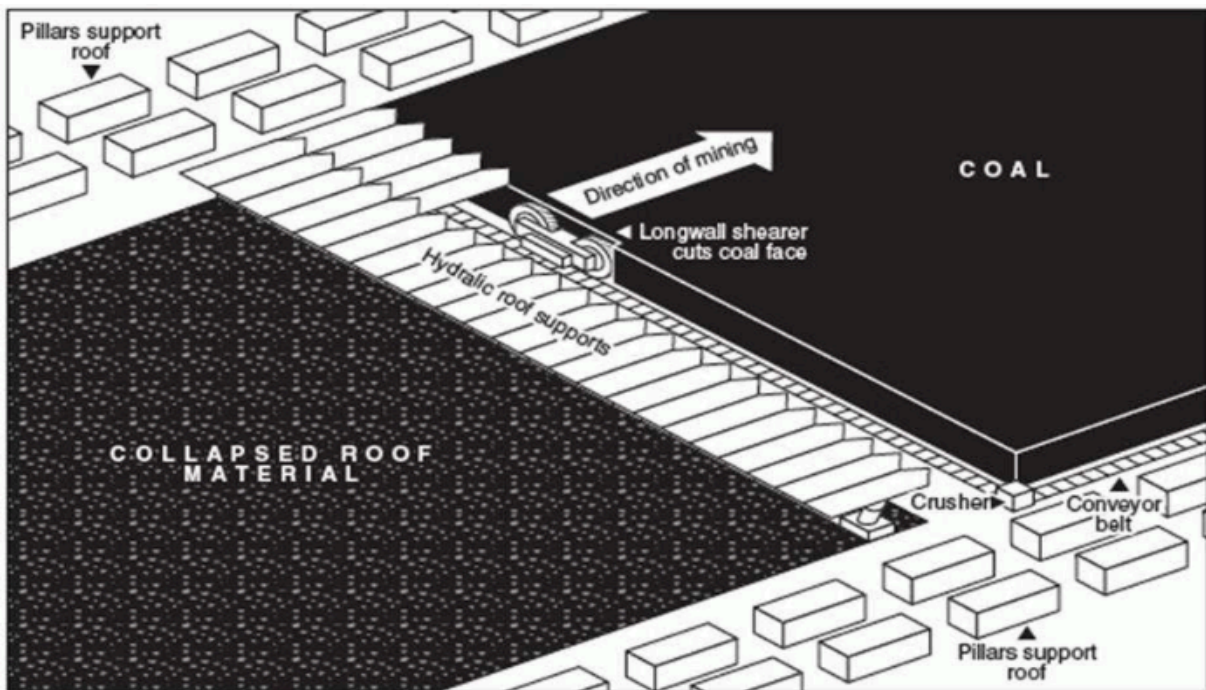
κάτωθεν (προς τα κάτω) κατεύθυνση. i) Overhand (προς τα πάνω) cut and fill ο εφαρμόζεται στο μετάλλευμα που βρίσκεται κάτω από την περιοχή εργασίας και η οροφή είναι backfill. ο περιλαμβάνει μια περιοχή εργασίας με τσιμεντοποιημένο επίχωμα, ενώ εξορύσσεται μετάλλευμα από την οροφή. ii) Underhand (προς τα κάτω) cut and fill μεταλλεύματος ο εφαρμόζεται σε μετάλλευμα που βρίσκεται κάτω από την περιοχή εργασίας και η οροφή είναι τσιμεντοποιημένο επίχωμα. Το μετάλλευμα βρίσκεται πάνω από την περιοχή εργασίας και τα μηχανήματα εργάζονται σε backfill.(R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)

### 2.2.3 Μέθοδος σε ευθύγραμμο επίμηκες μέτωπο - Longwall mining method

Η εξόρυξη σε ευθύγραμμο επιμήκη μέτωπα Longwall εφαρμόζεται σε κοιτάσματα με στρώματα ομοιόμορφου σχήματος, περιορισμένου πάχους και μεγάλης οριζόντιας έκτασης (π.χ. ένα στρώμα άνθρακα, ένα στρώμα ποτάσας ή ο ύφαλος, το στρώμα από χαλαζιακά βότσαλα που εκμεταλλεύονται τα ορυχεία χρυσού στη Νότια Αφρική). Πρόκειται για μια μέθοδο σπηλαιώσης ιδιαίτερα προσαρμοσμένη σε σχετικά επίπεδες, λεπτές, επίπεδες αποθέσεις ή οριζόντιες ραφές, συνήθως άνθρακα, σε κάποιο βάθος. Είναι κατάλληλη για ταμπλαδοτά μεταλλεύματα, με μέτρια κλίση (π.χ. άνθρακα και στρωματοειδή μεταλλεύματα σκληρών πετρωμάτων, όπως τα κοιτάσματα διαμαντιών). Είναι μία από τις κύριες μεθόδους εξόρυξης άνθρακα. Ανακτά το ορυκτό σε τμήματα κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής που επαναλαμβάνονται για την ανάκτηση υλικών σε μεγαλύτερη έκταση. Ανάγκη διαχωρισμού του μεταλλεύματος σε " όψη" ή στην " όψη εργασίας". Η συλλογή των τομών, των εγκάρσιων τομών και των πυλώνων, όλα μαζί, αποτελούν ένα "πάνελ" και όλος ο εξοπλισμός που πάει μαζί για να λειτουργήσει σε αυτό το πάνελ είναι μια "μονάδα ή μονάδες Longwall". Με τη μέθοδο αυτή, διατηρείται ένα μέτωπο σημαντικού μήκους (ένα μακρύ μέτωπο ή τοίχος) και, καθώς η εξόρυξη προχωρεί, τα υπερκείμενα στρώματα σπηλαιώνονται, προωθώντας έτσι τη θραύση του ίδιου του άνθρακα. Εφαρμόζεται σε μεγαλύτερα μήκη (~100 m) και μεγαλύτερες διαμέτρους ανατινάξεων (δηλαδή, απαιτεί έτσι λιγότερες γεωτρήσεις από την υποεπίπεδη διάνοιξη). Απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια διάτρησης.(R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)

Η ανάγκη για μια μηχανή longwall (είναι σχεδιασμένη να αφήνει την οροφή να πέφτει πίσω της και να εξορύσσει μεγάλα δωμάτια στα οποία η οροφή καταρρέει σχεδόν αμέσως, αφήνοντας μόνο μια μικρή είσοδο και το μεταλλικό φράγμα που προστατεύει τη μονάδα longwall). Ο χώρος που βρίσκεται πλησιέστερα στο μέτωπο διατηρείται ανοιχτός, ενώ ο τοίχος που κρέμεται αφήνεται να καταρρεύσει σε ασφαλή απόσταση πίσω από τους

ανθρακωρύχους και τον εξοπλισμό τους. Η προετοιμασία για την εξόρυξη περιλαμβάνει το δίκτυο ορυχείων που απαιτείται για την πρόσβαση στην περιοχή εξόρυξης και τη μεταφορά του εξορυγμένου προϊόντος στο φρεάτιο. Δεδομένου ότι η μεταλλοφορία έχει τη μορφή φύλλου που εκτείνεται σε ευρεία περιοχή, οι διάνοιξεις μπορούν συνήθως να τοποθετηθούν σε ένα τυπικό σχέδιο δικτύου. Οι στοές μεταφοράς προετοιμάζονται στο ίδιο το κοίτασμα. Η απόσταση μεταξύ δύο παρακείμενων ορυχείων μεταφοράς καθορίζει το μήκος της επένδυσης. (R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)



**Σχήμα 2.8:** μέθοδος longwall για την εξόρυξη άνθρακα

Συνήθως υψηλοί ρυθμοί παραγωγής. Μεγάλα ανοίγματα με μεγάλους χρόνους ανοίγματος. Υψηλό κόστος επίγειας υποστήριξης. Μέθοδος εξόρυξης από κάτω προς τα πάνω. Μη επιλεκτική εξόρυξη. Δεν είναι φιλική προς το στρες. Πολλοί τύποι εξοπλισμού.

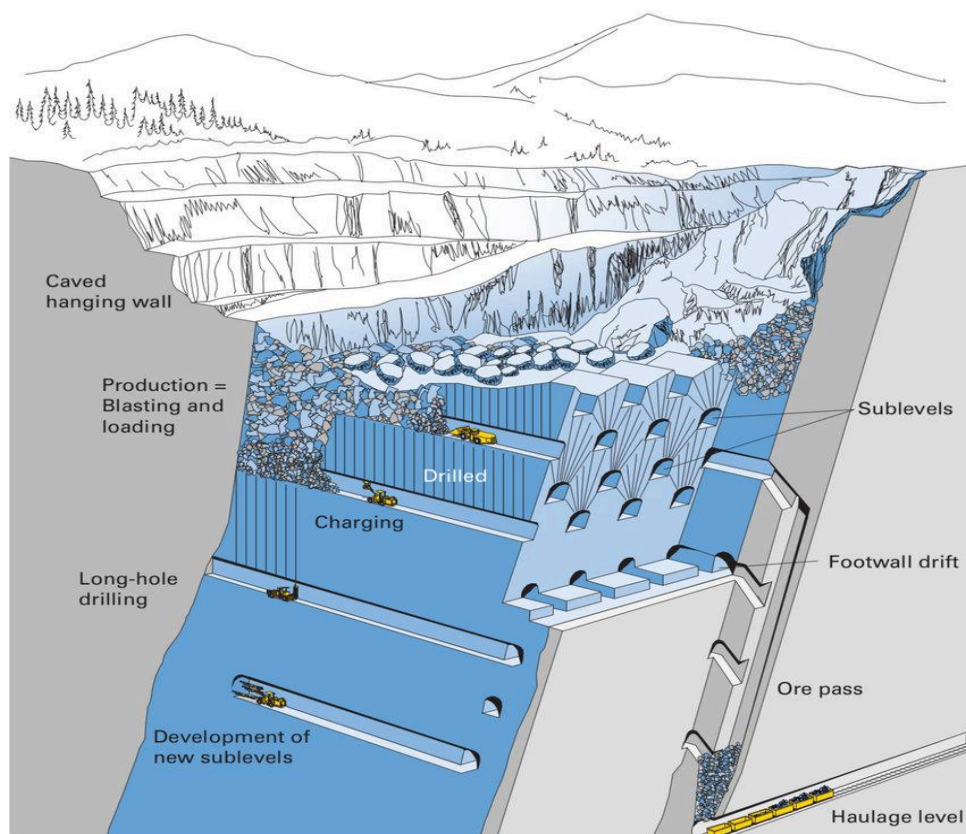
Η εξόρυξη longwall είναι ένα εξαιρετικά μηχανοποιημένο σύστημα υπόγειας εξόρυξης για την εξόρυξη άνθρακα. Το σύνολο του εξοπλισμού εξόρυξης μακράς τοιχοποιίας αποτελείται από ένα μηχάνημα κοπής άνθρακα τοποθετημένο σε μεταφορέα που λειτουργεί κάτω από μια σειρά αυτοπροωθούμενων υδραυλικών στηριγμάτων οροφής. Σχεδόν ολόκληρη η διαδικασία μπορεί να αυτοματοποιηθεί. Τα μηχανήματα εξόρυξης μακράς τοιχοποιίας έχουν συνήθως πλάτος 150-250 μέτρα και ύψος 1,5 έως 3 μέτρα. Οι ανθρακωρύχοι longwall εξορύσσουν "πάνελ" - ορθογώνια τεμάχια άνθρακα με πλάτος όσο το μέτωπο στο οποίο είναι

εγκατεστημένος ο εξοπλισμός και μήκος που μπορεί να φτάσει αρκετά χιλιόμετρα. Ένα στρώμα άνθρακα επιλέγεται και αποκλείεται σε μια περιοχή γνωστή ως πάνελ (Ένα τυπικό πάνελ μπορεί να έχει μήκος 3000 μ. x 250 μ. πλάτος).(R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)

Κατά μήκος του πάνελ, ανοίγονται διάδρομοι για την παροχή πρόσβασης και για την τοποθέτηση συστήματος μεταφοράς για τη μεταφορά του υλικού από το ορυχείο. Οι σήραγγες εισόδου θα κατασκευαστούν από τους διαδρόμους κατά μήκος του πάνελ. Η εξόρυξη είναι μια σχεδόν συνεχής λειτουργία που περιλαμβάνει τη χρήση αυτοπροωθούμενων υδραυλικών υποστυλωμάτων που μερικές φορές ονομάζονται ασπίδες, μιας μηχανής διάτμησης και ενός μεταφορέα που κινείται παράλληλα με το μέτωπο που εξορύσσεται. Ισχυρές μηχανικές κοπτικές μηχανές (Shearers) κόβουν τον άνθρακα από το μέτωπο, ο οποίος πέφτει σε ένα θωρακισμένο μεταφορέα για την απομάκρυνση. Το σύστημα των διατρητικών τοιχωμάτων εξορύσσει μεταξύ των στοών εισόδου. Οι μακρότοιχοι μπορούν να προωθηθούν σε μια περιοχή άνθρακα ή, συνηθέστερα, να υποχωρήσουν μεταξύ των σηράγγων ανάπτυξης (που ονομάζονται "δρόμοι πύλης"). Καθώς ένας εργαζόμενος στην εξόρυξη με longwall οπισθοχωρεί κατά μήκος ενός πάνελ, η οροφή πίσω από τα στηρίγματα επιτρέπεται να καταρρεύσει με προγραμματισμένο και ελεγχόμενο τρόπο. (R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)

#### 2.2.4 Μέθοδος των διαδοχικών ορόφων με κατακρήμνιση οροφής - Sublevel caving method

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μεγάλου πάχους και μεγάλης κλίσης κοιτάσματα με μέταλλευμα μέτριας σκληρότητας και μέσης περιεκτικότητας που δεν απαιτούν εκλεκτική εκμετάλλευση. Η περιβάλλουσα βραχώμαζα πρέπει να είναι καλής ποιότητας και με δυνατότητα εύκολης κατακρήμνισης καθώς η επέμβαση για την υποβοήθηση της κατακρήμνισης με εκρηκτική ύλη είναι πολύ δύσκολη και όχι οικονομική. Η εξόρυξη πραγματοποιείται μέσα σε διαδοχικούς ορόφους, το ύψος των οποίων αποτελεί συνάρτηση του μήκους των διατρημάτων, εκ των άνω προς τα κάτω. Στοές διανοιούνται μέχρι τα όρια του κοιτάσματος, το κατώτερο τμήμα αποσπάται με χρήση εκρηκτικών υλών, ενώ το ανώτερο κατακρημνίζεται. Αυτή η κατακρήμνιση ακολουθείται παράλληλα από την κατακρήμνιση της υπερκείμενης του ορόφου στείρας περιβάλλουσας βραχώμαζας, με την οποία πληρούνται τελικώς τα κενά που δημιουργούνται. (R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)



**Σχήμα 2.9:** μέθοδος εξόρυξης Sublevel caving

Το κοίτασμα χωρίζεται σε τμήματα ύψους περίπου 100 μέτρων και διαιρείται περαιτέρω πλευρικά σε εναλλασσόμενες στοές, και πυλώνες. Στο κάτω μέρος του πετρώματος δημιουργείται ένας κύριος αγωγός μεταφοράς, με ανοίγματα για τα σημεία ανάληψης που συνδέονται με τις παραπάνω στοές. Ο πυθμένας έχει σχήμα V για να διοχετεύει το ανατιναγμένο υλικό στα σημεία έλξης. Από τα φρεάτια πρόσβασης γίνονται σύντομες ανατινάξεις σε διάταξη δακτυλίου. Το μέταλλευμα στο κοίτασμα ανατινάσσεται, συλλέγεται στα σημεία έλξης και απομακρύνεται. (R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)

Οι ανατινάξεις σε κάθε υποεπίπεδο ξεκινούν από την οροφή και η εξόρυξη συνεχίζεται προς τα κάτω. Η ανατίναξη αφαιρεί τη στήριξη της οροφής, η οποία καταρρέει μέσα στο ορυχείο. Καθώς η εξόρυξη προχωρεί προς τα κάτω, κάθε νέο επίπεδο σπηλαιώνεται στα ανοίγματα του ορυχείου, με τα μεταλλευτικά υλικά να συλλέγονται, ενώ ο βράχος παραμένει πίσω. (R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)

Η φόρτωση συνεχίζεται έως ότου αποφασιστεί ότι η αραιώση των αποβλήτων είναι πολύ υψηλή. Στη συνέχεια αρχίζουν οι εργασίες σε μια κοντινή κατεύθυνση με νέα σπηλιά. Καθώς η εξόρυξη απομακρύνει το πέτρωμα χωρίς επιχωμάτωση, η οροφή συνεχίζει να



καταρρέει στο κενό. Η συνέχιση της εξόρυξης έχει ως αποτέλεσμα την καθίζηση της επιφάνειας, προκαλώντας την εμφάνιση βυθίσεων. Τελικά, η επιφάνεια του εδάφους στην κορυφή του του μεταλλεύματος υποχωρεί (Εικ. 18). Ωστόσο, οι τάφροι συνήθως επιχωματώνονται με παγιωμένα απόβλητα του εργοστασίου μετά την εξόρυξη (Αυτό επιτρέπει την ανάκτηση των πυλώνων του μη εξορυγμένου μεταλλεύματος μεταξύ των τάφρων, επιτρέποντας πολύ υψηλή ανάκτηση του μεταλλευτικού σώματος). (R. Boart, C. M. Franke, and C. M. S. Goh 2018)

### 2.3 Μηχανήματα υπόγειας εξόρυξης

Η υπόγεια εξόρυξη είναι ένας περίπλοκο περιβάλλον που στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό σε εξειδικευμένα μηχανήματα για να εξάγει ασφαλώς και αποδοτικά τα μεταλλεύματα και τα ορυκτά. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται στα υπόγεια ορυχεία είναι ειδικά σχεδιασμένα για να αντιμετωπίζουν τις σκληρές συνθήκες και τις απαιτητικές εργασίες που υπάρχουν σε ένα υπόγειο περιβάλλον. Από το γεώτρηση και την ανατίναξη έως και τη μεταφορά υλικών, κάθε μηχανήμα παίζει σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της σωστής αποδοτικότητας και της ασφάλειας των εργαζομένων. Οι τεχνολογίες έχουν εξελιχθεί σημαντικά, επιτρέποντας την ανάπτυξη προηγμένων μηχανημάτων όπως οι μονάδες φόρτωσης και μεταφοράς (LHD), οι συνεχείς εξορύκτες και οι περίπλοκες γεωτρητικές πλατφόρμες, που είναι κατασκευασμένα για να βελτιώνουν την παραγωγικότητα και να μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η επιλογή και η χρήση αυτών των μηχανημάτων είναι κρίσιμη για την επιτυχία των υπόγειων μεταλλευτικών επιχειρήσεων, οδηγώντας σε συνεχείς βελτιώσεις στον κλάδο.

#### 2.3.1 LHD (load, haul, dump)

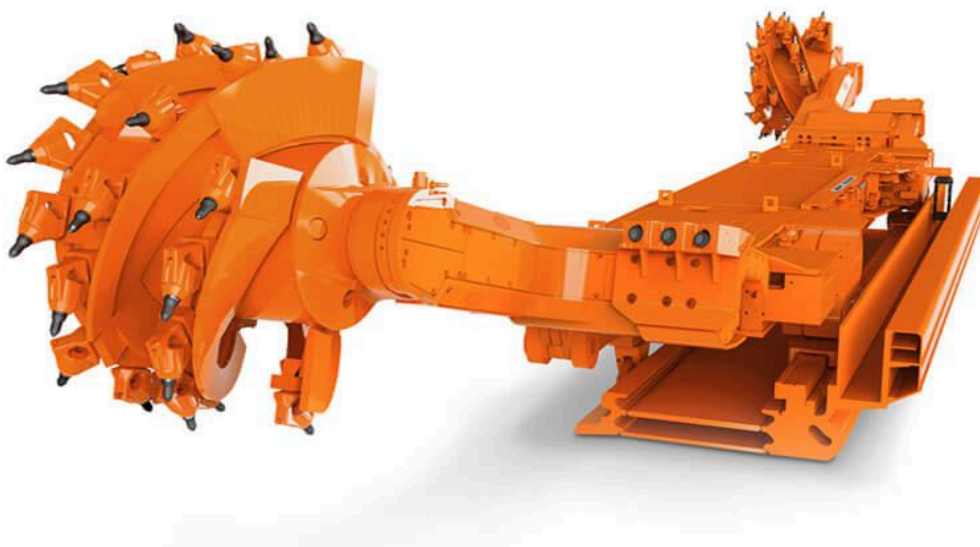


**Σχήμα 2.10:** LHD

Οι φορτωτές LHD (load, haul, dump) είναι παρόμοιοι με τους συμβατικούς εμπρόσθιους φορτωτές, αλλά έχουν αναπτυχθεί για τις πιο δύσκολες εφαρμογές εξόρυξης σκληρών πετρωμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική οικονομία παραγωγής, την ασφάλεια και την αξιοπιστία. Είναι εξαιρετικά ανθεκτικοί, εξαιρετικά ευέλικτοι και εξαιρετικά παραγωγικοί. Περισσότερο από το 75% των υπόγειων μεταλλείων στον κόσμο χρησιμοποιούν LHD για τη διαχείριση της μπάζας των εκσκαφών τους. (Ratan R. T., 2013)

Τα οχήματα LHD διαθέτουν ισχυρούς κινητήρες, προηγμένη τεχνολογία συστημάτων μετάδοσης κίνησης, βαρέως τύπου πλανητικούς άξονες, τετρακίνηση, στρεφόμενο σύστημα διεύθυνσης και εργονομικά χειριστήρια. Το στενότερο, μακρύτερο και χαμηλότερο προφίλ τους τα καθιστά καταλληλότερα για υπόγειες εφαρμογές όπου το ύψος και το πλάτος είναι περιορισμένα. Καθώς το μήκος δεν αποτελεί περιορισμό σε μια σήραγγα και μια κατάβαση, οι φορτωτές LHD σχεδιάζονται με επαρκές μήκος. Το μήκος βελτιώνει την αξονική κατανομή του βάρους και η χωρητικότητα του κάδου μπορεί να αυξηθεί. Η κατασκευή δύο τμημάτων με κεντρική διαμόρφωση αρθρώσεων βοηθά στην παρακολούθηση και την ευελιξία. Στην εξόρυξη, υπάρχει περιορισμός για τη μετατόπιση βαρέως εξοπλισμού, και μερικές φορές, ένα LHD πρέπει να μετατοπιστεί μέσω ενός φρεατίου ενώ αποσυναρμολογείται. Η χωρητικότητα ενός LHD τραμ κυμαίνεται από 1 έως 17-25 τόνους. Το μέγεθος του κάδου τους κυμαίνεται από 0,8 έως 10 m<sup>3</sup>. Το ύψος του κάδου κυμαίνεται από 1,8 έως 2,5 μέτρα. (Ratan R. T., 2013)

### 2.3.2 Longwall Shearers

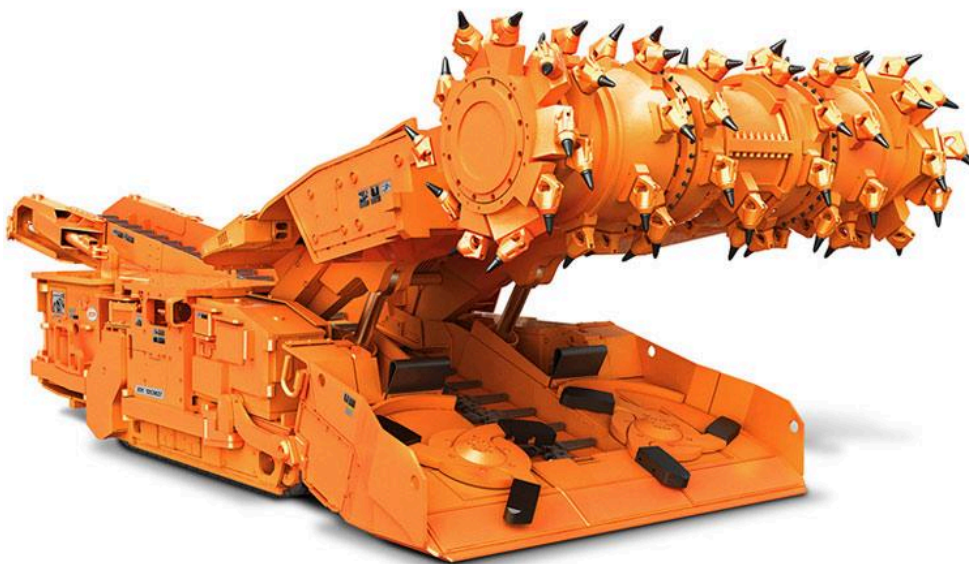


**Σχήμα 2.11:** Longwall Shearer

Οι ψαλιδιστές διατρητικής τοιχοποιίας κόβουν το μέτωπο ενός ανθρακωρυχείου στις διεργασίες εξόρυξης διατρητικής τοιχοποιίας τοποθετούμενοι πάνω σε ένα θωρακισμένο μεταφορέα μετώπου (AFC). Είναι εξοπλισμένα με κοπτικά τύμπανα τα οποία τοποθετούνται κατά τη στρώση του άνθρακα με βραχίονες που κινούνται με υδραυλικές βαλβίδες. Μπορούν να ζυγίζουν περισσότερους από 100 τόνους, να κινούνται με ταχύτητες έως και 30 m/min και να αφαιρούν κομμάτια από ανθρακικές στρώσεις πάχους έως και 100 cm. Μπορούν επίσης να αποκαλούνται φορτωτές ψαλιδιστών.

Η εξόρυξη με διάτρητη τοιχοποιία είναι ένας τύπος εξόρυξης όπου τα αδρανή υλικά, συνήθως άνθρακας, εξορύσσονται σε τμήματα περίπου 0,6-9,0 m επί 200-400 m επί 3-4 km. Το πλάτος του πάνελ που αναφέρεται ως το μέτωπο του κοιτάσματος υποσκάπτεται από άλλο εξοπλισμό εξόρυξης, όπως οδοπρομαχώνες ή Continuous Miners. Προσωρινά υδραυλικά στηρίγματα οροφής, γνωστά και ως υδραυλικές σφήνες, τοποθετούνται στη θέση τους στο μέτωπο του κοιτάσματος. Ανάλογα με το ύψος της φλέβας χρησιμοποιείται είτε ένας φορτωτής ψαλίδι, για ύψη μεγαλύτερα από 2,3 m, είτε ένα εκσκαφέας για λεπτότερες φλέβες. Καθώς το σύστημα προχωρεί μέσα από τον όροφο, αφήνεται πίσω του ένα κενό, που αναφέρεται ως goaf, το οποίο καταρρέει λόγω του βάρους του υπερκείμενου υλικού.

### 2.3.3 Continuous Miners



**Σχήμα 2.12:** Continuous miner

Continuous miners είναι εργαλεία εκσκαφής που χρησιμοποιούνται σε υπόγειες εργασίες εξόρυξης, συνήθως με τεχνικές εξόρυξης room και pillar. Συμπεριλαμβάνουν τα ακόλουθα

εξαρτήματα. Μια κεφαλή κοπής, η οποία είναι ένα περιστρεφόμενο χαλύβδινο τύμπανο με δόντια καρβιδίου, το οποίο είναι τοποθετημένο στο άκρο ενός βραχίονα με υδραυλική εξάρτηση. Η κεφαλή κοπής είναι ειδική για κάθε εφαρμογή και τρίβει και τεμαχίζει τη φλέβα του ορυχείου. Ένα φτυάρι φόρτωσης για τη συλλογή άνθρακα, μαλακών ορυκτών, μεταλλεύματος και σκληρών πετρωμάτων που έχουν εκσκαφεί από την κεφαλή κοπής και έχουν οδηγηθεί στον βραχίονα φορτοεκφόρτωσης- το εξαγόμενο αδρανές υλικό απορρίπτεται στο πίσω μέρος του continuous Miner μέσω ενός συστήματος μεταφοράς. Αυτά τα συστήματα συλλογής μπορούν να διασπάσουν περαιτέρω το υλικό. Αλυσίδες Caterpillar για να παρέχουν στον εξορυκτικό μηχανισμό στιβαρή κίνηση.

#### 2.3.4 Roof Bolters



**Σχήμα 2.13:** Roof Bolter 88

Το μπουλόνι οροφής ορυχείων είναι ένα μακρύ μπουλόνι αγκύρωσης που χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση των εκσκαφών βράχου σε σήραγγες ή κοπές βραχομάζας. Μεταφέρει το φορτίο από το ασταθές εξωτερικό στο περιορισμένο και πολύ ισχυρότερο εσωτερικό της βραχομάζας. Ο κοχλίας οροφής ορυχείων είναι το βασικότερο συστατικό της υποστήριξης οδοστρωμάτων σε ανθρακωρυχεία. Παίζει καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση του περιβάλλοντος πετρώματος, εξασφαλίζοντας τη στήριξη του ίδιου του πετρώματος. Οι κοχλίες οροφής ορυχείων χρησιμοποιούνται στα ορυχεία και χρησιμοποιούνται στη μηχανική τεχνολογία για την ενίσχυση του κύριου σώματος των πρανών, των σηράγγων και των φραγμάτων.

Τα μπουλόνια οροφής ορυχείων εγκαθίστανται σχεδόν πάντα σε ένα μοτίβο. Ο σχεδιασμός

αυτού του μοτίβου εξαρτάται από την ποιότητα του πετρώματος και τον τύπο της εκσκαφής. Τα μεταλλευτικά μπουλόνια οροφής αποτελούν βασικό στοιχείο στις μεθόδους διάνοιξης σηράγγων.

Το Bolter 88 είναι ένα γεωτρήπανο βιδώματος για μηχανοποιημένη στήριξη στέγης, με δύο ολισθητήρες Montabert HC50, καρουσέλ για 7-10 βίδες και βραχίονα χειρισμού συγκολλημένου πλέγματος. Η ανεξάρτητη τροφοδοσία του γεωτρήπανου και της εξέδρας βιδώματος σε συνδυασμό με τον ισχυρό αλλά απλό σχεδιασμό, συμβάλλει στην επιτάχυνση του κύκλου παραγωγής.

### 2.3.5 Jumbo Drills



**Σχήμα 2.14:** Jumbo Drill

Η υδραυλική εγκατάσταση γεώτρησης RCZ-22J χρησιμοποιείται κυρίως για την εξόρυξη άνθρακα και τη διάτρηση σηράγγων. Είναι εξοπλισμένη με πετρελαιοκινητήρα για τη μετακίνηση και ηλεκτρικό κινητήρα για τις διατρήσεις, προσφέροντας γρήγορη ευελιξία και μηδενικές εκπομπές με χαμηλό θόρυβο. Διαθέτει υψηλή ακρίβεια με αυτόματη οριζόντια τοποθέτηση και περιστρεφόμενη λειτουργία 360 μοιρών, καθιστώντας την ικανή για πολλαπλές εφαρμογές. Επίσης, είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί με υψηλή αποδοτικότητα υπό φορτίο, με σύστημα ασφαλείας για έκτακτες ανάγκες.

### 2.3.6 Shotcrete Machines

Ένας τρόπος ψεκασμού σκυροδέματος είναι η μέθοδος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η

μηχανή εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι ένας εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τον ψεκασμό σκυροδέματος ή κονιάματος.

Τα βασικά εξαρτήματα μιας μηχανής εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η αντλία σκυροδέματος, ο συμπιεστής, το χειριστήριο και το τηλεχειριστήριο, ο βραχίονας ή ο εύκαμπτος σωλήνας και το ακροφύσιο. Με αυτά τα διαφορετικά εξαρτήματα, το σκυρόδεμα ή το κονίαμα μεταφέρεται από τον παγιδευμένο αέρα στο ακροφύσιο και ελέγχεται για να ψεκαστεί σε οποιαδήποτε περιοχή. Η μηχανή εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές εφαρμογές ή εργοτάξια κατασκευών όπως: Σταθεροποίηση και κατασκευή σηράγγων, υπόγειων και ορυχείων. Σταθεροποίηση πρανών και τάφρων.

Δεδομένου ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερο υψόμετρο, πρέπει να φέρει ή να αντέξει το δικό του βάρος δεδομένου του ύψους. Προκειμένου το σκυρόδεμα να κολλήσει ή να προσκολληθεί κατά την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η αναλογία μεταξύ τσιμέντου και νερού είναι συνήθως χαμηλότερη από τη συνηθισμένη. Το σκυρόδεμα έχει υψηλότερη πρόσφυση και αντοχή συγκόλλησης σε σύγκριση με μία συμβατική μέθοδο.



**Σχήμα 2.15:** dry shotcrete and wet shotcrete

Υπάρχουν δύο τρόποι χρήσης της μεθόδου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, για το ξηρό σκυρόδεμα που εκτοξεύεται με ξηρή διαδικασία και το υγρό σκυρόδεμα που εκτοξεύεται με υγρή διαδικασία. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ξηρής διαδικασίας χρησιμοποιεί ένα ξηρό μίγμα τσιμέντου και αδρανών υλικών που τροφοδοτείται στο ακροφύσιο εκτόξευσης με ψεκασμό νερού σε λεπτή μορφή ψεκασμού που προστίθεται στο ξηρό μίγμα για την ενυδάτωση του τσιμέντου. Το σκυρόδεμα υγρής διαδικασίας ψεκασμού χρησιμοποιεί ένα μείγμα σκυροδέματος, αδρανών και νερού που περνά από το ακροφύσιο με υψηλή πίεση αέρα.

### 2.3.7 Shuttle Cars



**Σχήμα 2.16:** Shuttle Car

Τα αυτοκίνητα μεταφοράς ανθρακωρυχείου είναι εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την εξόρυξη και τη μεταφορά άνθρακα, που γενικά χωρίζεται σε υπόγειους και επίγειους τύπους. Η χρήση φορητών μεταφοράς ανθρακωρυχείου μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια της παραγωγής ανθρακωρυχείου. Μπορούν να χειριστούν και να μεταφέρουν άνθρακα σε πολύπλοκα εδάφη και σκληρά περιβάλλοντα ανθρακωρυχείων. Τα υπόγεια οχήματα μεταφοράς ανθρακωρυχείου υιοθετούν συνήθως μια δομή με τροχούς ή ιχνηλάτες, με μικρό σώμα που είναι κατάλληλο για ταξίδια σε ορυχεία. Μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ κίνησης στους δύο τροχούς και τετρακίνησης για καλύτερη προσαρμογή στις διαφορετικές συνθήκες του δρόμου. Υιοθετώντας υδραυλικά υγρά φρένα, η απόσταση πέδησης έκτακτης ανάγκης είναι μικρή και η ικανότητα πέδησης είναι ασφαλής και αξιόπιστη. Κατάλληλο για λειτουργία υπόγειων μεταφορών 3m × με οδόστρωμα 3m.

Τα Joy Shuttle Cars έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν ως δίκτυο με ανθρακωρύχους, απομακρύνοντας αποτελεσματικά το κομμένο υλικό από το μέτωπο εργασίας και μεγιστοποιώντας την παραγωγικότητα ολόκληρου του τμήματος.

### 2.3.8 Rock Dusters



**Σχήμα 2.17:** Rock Duster

Για τη διάδοση μιας έκρηξης ανθρακόσκονης απαιτούνται πέντε στοιχεία. Εκτός από το τρίγωνο της φωτιάς, στο οποίο τρία στοιχεία είναι απαραίτητα για τη διατήρηση μιας φωτιάς - καύσιμο (σκόνη άνθρακα), θερμότητα(πηγή ανάφλεξης) και οξειδωτικό (οξυγόνο στον αέρα) - μια έκρηξη καύσιμης σκόνης απαιτεί διασπορά του νέφους σκόνης (κύμα πίεσης) και περιορισμό του νέφους σκόνης (υπόγειο ορυχείο είσοδος). Αυτά τα πέντε στοιχεία συνθέτουν το πεντάγωνο της έκρηξης. Οι εκρήξεις ανθρακόσκονης συμβαίνουν συνήθως όταν αναφλέγεται ένα εύφλεκτο μείγμα μεθανίου και αέρα. Τα υψηλής θερμοκρασίας αέρια διαστέλλονται γρήγορα για να δημιουργήσουν ένα κύμα πίεσης, που μερικές φορές αναφέρεται ως «πρωτοποριακό κύμα», το οποίο μπορεί να γίνει απότομο σε ωστικό κύμα καθώς διαδίδεται μακριά από την πηγή ανάφλεξης. Το κρουστικό κύμα παράγει έναν άνεμο που διασκορπίζει τη σκόνη κατά κύριο λόγο από κάθε υπερυψωμένη και εκτεθειμένες επιφάνειες (οροφή, νευρώσεις, δομή ιμάντα, υποστυλώματα κ.λπ.). Το προκύπτον νέφος σκόνης αναφλέγεται από τη φλόγα της αρχικής έκρηξης μεθανίου. Η διαδικασία συνεχίζεται ακολουθώντας την πηγή του εύφλεκτου καυσίμου καταναλώνοντας οξυγόνο και παράγοντας μεγάλες ποσότητες τοξικών προϊόντων καύσης, όπως μονοξείδιο του άνθρακα. (Samuel P. Harteis, Danrick W. Alexander, Marcia L. Harris, Michael J. Sapko, and Eric S. Weiss)



### 2.3.9 Ventilation Fans



**Σχήμα 2.18:** Ventilation Fans

Ο εξαερισμός υπόγειων ορυχείων παρέχει ροή αέρα στις υπόγειες εργασίες ενός ορυχείου επαρκούς όγκου για την αραίωση και την απομάκρυνση της σκόνης και των επιβλαβών αερίων (συνήθως NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, μεθάνιο, CO<sub>2</sub> και CO) και για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας. Η πηγή αυτών των αερίων είναι ο εξοπλισμός που λειτουργεί με κινητήρες ντίζελ, οι ανατινάξεις με εκρηκτικά και το ίδιο το μεταλλευτικό σώμα.

Η μεγαλύτερη συνιστώσα του λειτουργικού κόστους για τον εξαερισμό των ορυχείων είναι η ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδοσία των ανεμιστήρων εξαερισμού, η οποία μπορεί να αντιπροσωπεύει το ένα τρίτο του συνολικού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας ενός τυπικού υπόγειου ορυχείου.

### 2.4 Προσωπικό

Τα υπόγεια ορυχεία είναι πολύπλοκα περιβάλλοντα που απαιτούν ένα πολυποίκιλο και εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό για τη διαχείριση των εργασιών και της ασφάλειας. Το προσωπικό στα υπόγεια ορυχεία περιλαμβάνει μια σειρά από ρόλους, καθένας από τους οποίους είναι κρίσιμος. Ακολουθεί μια λεπτομερής ματιά σε αυτούς τους ρόλους:



*Σχήμα 2.19: Ορυχείο βωξίτη Παρνασσού*

**Μεταλλωρύχοι:** Στον πυρήνα της επιχείρησης εξόρυξης, οι μεταλλωρύχοι είναι υπεύθυνοι για το φυσικό έργο της εξόρυξης των ορυκτών. Αυτός ο ρόλος περιλαμβάνει τον χειρισμό βαρέων μηχανημάτων, τη διάτρηση, την ανατίναξη και την απομάκρυνση των συντριμμιών, ενώ παράλληλα πλοηγούνται στο δύσκολο υπόγειο περιβάλλον. Οι ανθρακωρύχοι πρέπει να είναι σωματικά εύρωστοι και να έχουν αυστηρή εκπαίδευση σε πρακτικές ασφάλειας και διαδικασίες έκτακτης ανάγκης για να αντιμετωπίσουν τις επικίνδυνες συνθήκες που αντιμετωπίζουν καθημερινά.

**Μηχανικοί ορυχείων:** Οι μηχανικοί ορυχείων έχουν καθοριστική σημασία για το σχεδιασμό και τη σχεδίαση της υποδομής του ορυχείου. Αποφασίζουν τις καλύτερες τεχνικές εξόρυξης και σχεδιάζουν τη διάταξη των σηράγγων και των φρεατίων. Το έργο τους διασφαλίζει ότι οι εργασίες εξόρυξης είναι ασφαλείς, αποτελεσματικές και οικονομικά βιώσιμες. Οι μηχανικοί ορυχείων απαιτούν βαθιά κατανόηση των αρχών της μηχανικής των ορυχείων, ισχυρές δεξιότητες επίλυσης προβλημάτων και επάρκεια στο ειδικό λογισμικό του κλάδου.

**Γεωλόγοι:** Οι γεωλόγοι διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην καθοδήγηση της διαδικασίας

εξόρυξης μελετώντας τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής εξόρυξης. Εκτιμούν πού πρέπει να γίνει η εξόρυξη και προβλέπουν τη θέση των πολύτιμων κοιτασμάτων ορυκτών. Οι γεωλόγοι αναλύουν επίσης δείγματα πετρωμάτων και ορυκτών για να καθορίσουν την ασφάλεια των θέσεων των σηράγγων, συμβάλλοντας σε ασφαλέστερες εργασίες εξόρυξης.

**Τοπογράφοι:** Οι τοπογράφοι διασφαλίζουν ότι οι εργασίες εξόρυξης τηρούν τις προδιαγραφές που έχουν σχεδιαστεί με την προσεκτική χαρτογράφηση των ορυχείων και τη διεξαγωγή τακτικών ερευνών. Αυτή η ακρίβεια είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας των σηράγγων των ορυχείων και μπορεί να αποτρέψει δαπανηρά λάθη ή ατυχήματα.

**Αξιωματικοί ασφαλείας:** Οι αξιωματικοί ασφαλείας είναι επιφορτισμένοι με μια κρίσιμη πτυχή των εξορυκτικών εργασιών - τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα πρότυπα και τους κανονισμούς ασφαλείας. Διεξάγουν ελέγχους ασφαλείας, εκπαιδεύουν το προσωπικό σε βέλτιστες πρακτικές και ηγούνται των αντιδράσεων έκτακτης ανάγκης. Ο ρόλος τους είναι ουσιαστικός για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων και την προστασία της ζωής των εργαζομένων στα ορυχεία.

**Μηχανικοί και ηλεκτρολόγοι:** Αυτοί οι τεχνικοί είναι υπεύθυνοι για τη συντήρηση και την επισκευή μηχανημάτων και ηλεκτρικών συστημάτων εξόρυξης. Η τεχνογνωσία τους διασφαλίζει ότι ο εξοπλισμός στον οποίο βασίζονται οι ανθρακωρύχοι λειτουργεί ομαλά και αξιόπιστα, πράγμα που είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της παραγωγικότητας και των προτύπων ασφαλείας.

**Μηχανικοί εξαερισμού:** Στην υπόγεια εξόρυξη, ο σωστός εξαερισμός είναι ζωτικής σημασίας. Οι μηχανικοί εξαερισμού σχεδιάζουν συστήματα που κυκλοφορούν τον αέρα για την απομάκρυνση των επικίνδυνων αερίων και τον έλεγχο του υπόγειου κλίματος. Τα αποτελεσματικά συστήματα εξαερισμού είναι ζωτικής σημασίας για την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων, καθιστώντας τον ρόλο αυτό απαραίτητο.

**Τεχνικοί εργαστηρίων:** Αυτοί οι επαγγελματίες αναλύουν δείγματα ορυκτών για τον προσδιορισμό της ποιότητας και της καθαρότητας. Τα πορίσματά τους καθοδηγούν την επεξεργασία των ορυκτών και διασφαλίζουν ότι οι αποδόσεις της εξόρυξης είναι υψηλής αξίας.

Προσωπικό εφοδιασμού και υποστήριξης: Αυτή η ευρεία κατηγορία περιλαμβάνει ρόλους από τους διαχειριστές της αλυσίδας εφοδιασμού έως το διοικητικό προσωπικό, που υποστηρίζουν τις υλικοτεχνικές ανάγκες της επιχείρησης εξόρυξης. Διαχειρίζονται τις προμήθειες, διεκπεραιώνουν διοικητικά καθήκοντα και διασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία της επιχείρησης.

Μαζί, αυτοί οι ρόλοι αποτελούν μια ολοκληρωμένη ομάδα που ασχολείται με όλες τις πτυχές της εξόρυξης, από την εξερεύνηση και την εξόρυξη μέχρι την ασφάλεια και τον εφοδιασμό. Κάθε θέση απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις και δεξιότητες, υπογραμμίζοντας τη σημασία του κάθε ατόμου στη διατήρηση της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας των υπόγειων μεταλλείων.

## Κεφάλαιο 3: Συστήματα επικοινωνίας και δίκτυα

Τα συστήματα επικοινωνίας και δικτύωσης είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική λειτουργία και την ασφάλεια των υπόγειων ορυχείων. Τα συστήματα αυτά διευκολύνουν την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των ανθρακωρύχων και των επιφανειακών επιχειρήσεων, η οποία είναι απαραίτητη για τη διαχείριση της πολύπλοκης υλικοτεχνικής υποδομής και τη διασφάλιση της ασφάλειας των εργαζομένων. Σε επικίνδυνα υπόγεια περιβάλλοντα, τα ισχυρά δίκτυα επικοινωνίας συμβάλλουν στη γρήγορη αναμετάδοση πληροφοριών σχετικά με καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, επιτρέποντας άμεσες διαδικασίες εκκένωσης και έγκαιρη αντίδραση σε πιθανές απειλές, όπως διαρροές αερίου ή δομικές αστοχίες.

Επιπλέον, τα συστήματα αυτά υποστηρίζουν τη λειτουργική αποδοτικότητα του ορυχείου, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση και τον έλεγχο του εξοπλισμού εξόρυξης. Αυτό περιλαμβάνει τη διαχείριση αυτόνομων μηχανημάτων, τα οποία απαιτούν αξιόπιστα δίκτυα για τη μετάδοση δεδομένων και τη λήψη εντολών χωρίς καθυστερήσεις. Οι προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνίας διαδραματίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο στην παρακολούθηση των συνθηκών του ορυχείου και της υγείας του εξοπλισμού, βοηθώντας στην προληπτική συντήρηση και μειώνοντας τον χρόνο διακοπής λειτουργίας.

Συνολικά, η ενσωμάτωση εξελιγμένων συστημάτων επικοινωνίας και δικτύωσης στα υπόγεια ορυχεία βελτιώνει τα πρωτόκολλα ασφαλείας, ενισχύει την επιχειρησιακή αποδοτικότητα και υποστηρίζει τη συμμόρφωση με τους αυστηρούς κανονισμούς εξόρυξης. Αυτό το πλαίσιο είναι απαραίτητο για τις σύγχρονες επιχειρήσεις εξόρυξης που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας, διασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια του προσωπικού τους.

### 3.1 Ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας

Η κριτική αξιολόγηση των εξελίξεων στα ενσύρματα, ημι-ενσύρματα και ασύρματα συστήματα επικοινωνιών για υπόγεια ορυχεία συζητείται παρακάτω (Stoicuta, O., & Ionica, A. 2023):

#### Συστήματα ενσύρματης επικοινωνίας

Τα τηλέφωνα κλήσης και τηλεειδοποίησης είναι το ανεπτυγμένο ενσύρματο σύστημα επικοινωνίας σε σύγκριση με το σύστημα τύπου μαγνήτη. Σήμερα η χρήση καλωδίων

οπτικών ινών εξασφαλίζει την αξιοπιστία των δεδομένων βελτιώνοντας την ποιότητα, την ποσότητα και την ταχύτητα των δεδομένων (Ghaddar, M., & Talbi, L. 2016).

#### Ημι-ασύρματα και ασύρματα συστήματα επικοινωνίας

Το 1922, όταν το Γραφείο Ορυχείων των ΗΠΑ πραγματοποίησε πειράματα για την ανίχνευση ραδιοσημάτων από το πειραματικό ορυχείο του στο Bruceton της Πενσυλβάνια, έκτοτε έχουν γίνει διάφορες έρευνες στον τομέα της επικοινωνίας σε υπόγεια ορυχεία (Seguel, F., & Soto, I. 2021).

Το 1956 εισήχθη για πρώτη φορά η χρήση της τεχνικής της διαρρέουσας τροφοδότησης με τη χρήση απλού ομοαξονικού καλωδίου ανοικτής πλέξης ή ενός διπλού καλωδίου που συνδέεται με έναν ή περισσότερους τυποποιημένους σταθμούς βάσης VHF (Stoicuta, O., & Ionica, A. 2023).

Από το 1970 έως το 1980 η τεχνολογία επικοινωνίας για τα ορυχεία U/G ήταν πιο ανερχόμενη. Σε αυτή τη δεκαετία, τα ραδιοκύματα στις σήραγγες των ανθρακωρυχείων μελετήθηκαν επίσης θεωρητικά, εστιάζοντας κυρίως στον ρυθμό απώλειας της ισχύος του σήματος κατά μήκος μιας σήραγγας και γύρω από μια γωνία. Η εφαρμογή συστήματος ραδιοεπικοινωνίας UHF (υπερύψηλης συχνότητας) και κλειστού κυκλώματος τηλεόρασης (CCTV) έγινε στο ορυχείο Black River κοντά στο Butler του Kentucky. Η χρήση παθητικού ανακλαστήρα για την αύξηση της ποιότητας και της απόστασης που διανύει ραδιοκύματά εφαρμόστηκε επίσης με επιτυχία σε αυτό το ορυχείο. Πραγματοποιήθηκαν τεχνικές για τη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου μέσα και πάνω από το ορυχείο λόγω των μηχανημάτων του ορυχείου που χρησιμοποιήθηκαν στο ορυχείο Itman No-3 και στο ορυχείο McElroy, στη Δυτική Βιρτζίνια. Το ραδιοσύστημα διαρροής με χρήση ενισχυτή σήματος για ισχυρή ενίσχυση βελτιώθηκε σε πολλά υπόγεια ορυχεία. Αξιοποιώντας τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περιοχή συχνοτήτων 630 έως 3030 Hz (στην περιοχή συχνοτήτων φωνής) έγιναν έρευνες για την ανίχνευση παγιδευμένου ανθρακωρύχου μέσα σε ανθρακωρυχείο με τη βοήθεια αναλύσεων παλινδρόμησης και υπολογισμών πιθανοτήτων. Το 1980, το Υπουργείο Εσωτερικών των ΗΠΑ, Γραφείο Μεταλλείων, διεξήγαγε ανάλυση δεδομένων σε έντεκα ανθρακωρυχεία για τη διάδοση ραδιοκυμάτων σε συχνότητα 50 KHz έως 5000 KHz (Akyildiz, I. F., & Vuran, M. C. 2019).

Το 1980-90 αναπτύχθηκε από τον Dr. Stolarczyk ένα ραδιοσύστημα χαμηλής και μεσαίας συχνότητας το οποίο παρέχει τόσο TTE όσο και επικοινωνία εντός του υπόγειου χώρου χρησιμοποιώντας δύο ισχυρούς τρόπους μετάδοσης σήματος, οι οποίοι ήταν ο τρόπος

μετάδοσης ραφής (μεσαία συχνότητα - 300 έως 23000Khz) και ο τρόπος γραμμής μετάδοσης αγωγού (χαμηλή συχνότητα - 30 έως 300Khz) (Akyildiz, I. F., & Vuran, M. C. 2019).

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, ένα νέο αναπτυσσόμενο και προσαρμόσιμο πρωτόκολλο DAMAN (Mobile Ad Hoc Network) της εταιρείας Sarnoff corporation ,Washington, επέτρεψε το σχηματισμό αυτοοργανωμένων, αυτοδρομολογούμενων και αυτοσυντηρούμενων δικτύων επικοινωνίας. Αυτό υποστηρίζει τη συνεχή επικοινωνία δεδομένων μεταξύ πολλών κινητών χρηστών, ιδανικά για υπόγειες επιχειρήσεις διάσωσης (Ghaddar, M., & Talbi, L. 2016).

Το ασύρματο σύστημα Tele Mag (Ηνωμένες Πολιτείες) είναι ένα αμφίδρομο (duplex) σύστημα τόσο για επικοινωνία φωνής όσο και για επικοινωνία δεδομένων που λειτουργεί σε εύρος συχνοτήτων 4 KHz και επιδείχθηκε τον Αύγουστο του 2000 στο εργαστηριακό ορυχείο Lake Lynn του NIOSH. Δεν είναι φορητό (Moridi, M. A., & Jang, H. D. 2018).

Ένα σύστημα αποτελούμενο από φάρο που περιέχεται σε λάμπα καπέλου ανθρακωρύχου και φορητό δέκτη εντοπισμού θέσης για φάρο παγιδευμένου ανθρακωρύχου δοκιμάστηκε στο ορυχείο Tirol με ακρίβεια εντοπισμού 50 cm (Pattnaik, S. K., & Poulkov, V. 2022).

Η ελικοειδής κεραία φερρίτη για επικοινωνία μέσω της γης έχει επίσης εφαρμοστεί σε ορισμένα ορυχεία των Ηνωμένων Πολιτειών για ασύρματη επικοινωνία διπλής κατεύθυνσης σε καταστάσεις καταστροφών. Στο ορυχείο Val d'Or του Καναδά, τα πειράματα έδωσαν γόνιμα αποτελέσματα όσον αφορά το ασύρματο τοπικό δίκτυο πλέγματος (WLAN) με χρήση του πρωτοκόλλου WAP (Wireless Access Point)(Forooshani, A. E., & Noghianian, S. 2021).

Σύμφωνα με Miner Act by MSHA 2006, η εγκατάσταση αμφίδρομων ασύρματων συστημάτων φωνής και εντοπισμού για όλα τα υπόγεια ανθρακωρυχεία στις ΗΠΑ έχει καταστεί υποχρεωτική. Rajant και Mine Site Technologies (MST) - Από το 2007 προσφέρει ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας για ορυχεία (Bandyopadhyay, L. K., & Mishra, P. K. 2019).

Η Rajant προσφέρει μια ποικιλία μονάδων και διαμορφώσεων BreadCrumb για την κάλυψη συγκεκριμένων αναγκών φορητής δικτύωσης με πλέγμα. Τα BreadCrumbs είναι εγκεκριμένα από την MSHA και ταξινομούνται ως εγγενώς ασφαλή (IS).Kundana, ορυχείο χρυσού της Δυτικής Αυστραλίας - Το 2008 το σύστημα διαχείρισης του ορυχείου εγκατέστησε την τεχνολογία VDV Leaky feeder (προηγμένος τροφοδότης διαρροής πολύ υψηλής

συχνότητας). Το 2009 πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση του BlastPED ως απομακρυσμένου και κεντρικού συστήματος ανατινάξεων του ορυχείου (Akyildiz, I. F., & Vuran, M. C. 2019).

Σύστημα επικοινωνίας SIAMnet - Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί καλωδιακό μόντεμ και ομοαξονικό καλώδιο για επικοινωνίες φωνής και δεδομένων σε υπόγεια ορυχεία. Αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση σε σχέση με τις τεχνολογίες οπτικών ινών και διαρρέουσας τροφοδότησης για επικοινωνία φωνής και δεδομένων σε υπόγεια ορυχεία. Ένα ομοαξονικό καλώδιο υποστηρίζει έως και 32 ταυτόχρονες μεταδόσεις φωνής, τρία υποδίκτυα κινητών δεδομένων 1,5 Mbps το καθένα από τα οποία υποστηρίζει έως και 64 οχήματα UG και 12 κανάλια καλωδιακού μόντεμ DOCSIS 1.1 για συνολικά 360 Mbps downstream και 120 Mbps upstream. Το μόντεμ και το σημείο πρόσβασης 802.11 αντλούν ενέργεια μέσω ομοαξονικού καλωδίου. Με τη βοήθεια αυτού του συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενσύρματα ή ασύρματα τηλέφωνα VoIP τόσο υπόγεια όσο και επιφανειακά. Τα οχήματα μπορούν να παρακολουθούνται οπουδήποτε υπάρχει κάλυψη στην περιοχή όπου βρίσκεται το όχημα. Μπορεί να ελεγχθεί η κατάσταση του κινητήρα και να αποσταλούν οδηγίες στον χειριστή για γρήγορες ενέργειες (Seguel, F., & Soto, I. 2021).

Σύστημα επικοινωνίας της εξορυκτικής βιομηχανίας της Νότιας Αφρικής - Στα περισσότερα ορυχεία της Νότιας Αφρικής οι προηγμένες υπόγειες επικοινωνίες γίνονται με καλώδιο Radiaflex. Η πρώτη εγκατάσταση του καλωδίου Radiaflex 1/2 ιντσών RLK εφαρμόστηκε με επιτυχία στο ορυχείο χρυσού South Deep στις αρχές του 21ου αιώνα. Αρχικά έχει σχεδιαστεί για να παρέχει άμεσες και μελλοντικές απαιτήσεις κάλυψης 3G κινητής τηλεφωνίας περιορισμένης εμβέλειας (Ghaddar, M., & Talbi, L. 2016).

Τα καλώδια Radiaflex στο ορυχείο χρησιμοποιούνται για πολυεπίπεδες επικοινωνίες φωνής, βίντεο και δεδομένων με βάση τα UHF. Mine Radio Systems Inc. (MRS) - Στην Ευρώπη από το έτος 2007- η MRS προσφέρει τις ακόλουθες ολοκληρωμένες λύσεις ασφάλειας και επικοινωνίας (Stoicuta, O., & Ionica, A. 2023):

Επικοινωνίες με βάση το Leaky Feeder

Φωνή, βίντεο και δεδομένα

Παρακολούθηση και έλεγχος προσωπικού, οχημάτων και περιουσιακών στοιχείων

Αποφυγή συγκρούσεων

Ethernet μέσω Leaky Feeder

Αναζήτηση και εντοπισμός παγιδευμένων ανθρακωρύχων

Απομακρυσμένος έλεγχος και παρακολούθηση εξοπλισμού.



Επιπλέον υπάρχει το σύστημα επικοινωνίας της προσωπικής συσκευής έκτακτης ανάγκης (PED) είναι ένα μονόδρομο σύστημα TTE (εντός του ορυχείου) που λειτουργεί σε εύρος συχνοτήτων 1KHz για ψηφιακά μηνύματα κειμένου, το οποίο παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1990. Η πρώτη επιτυχής εκκένωση ανθρακωρύχων που αποδίδεται στην τεχνολογία PED σημειώθηκε κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς στο ορυχείο Willow creek στο Helper της Γιούτα, στις 25 Νοεμβρίου 1998. Πρόκειται για μια φορητή συσκευή που χρησιμοποιεί την περιοχή των εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων (ULF) για την αποστολή μηνυμάτων κειμένου σε όλο το ορυχείο (Akyildiz, I. F., & Vuran, M. C. 2019).

### *3.2 Επικοινωνία στα υπόγεια μεταλλεία*

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι κυριότερες τεχνικές επικοινωνίας που υιοθετούνται στα υπόγεια ορυχεία. Οι τεχνικές επικοινωνίας υπόγειων ορυχείων μπορούν να ταξινομηθούν σε γενικές γραμμές σε τρεις κυρίως κατηγορίες: Εκτός από αυτές, χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνικές για σκοπούς επικοινωνίας και ασφάλειας, οι οποίες περιλαμβάνουν συστήματα μεταφοράς ρεύματος και υβριδικά συστήματα.

#### *3.2.1 Επικοινωνία μέσω της Γης (TTE)*

Οι τεχνικές επικοινωνίας μέσω της γης έχουν ερευνηθεί ευρέως για σκοπούς επικοινωνίας καθώς και για επιχειρήσεις διάσωσης σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Περιλαμβάνει πολύ μεγάλη κεραία βρόχου εκπομπής που διαχειρίζεται στην επιφάνεια του ορυχείου. Είναι σε θέση να παρέχει κάλυψη σε διάφορα μέρη του ορυχείου και έχει λιγότερες πιθανότητες ζημιών σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, επειδή η κεραία βρίσκεται και διαχειρίζεται στην κύρια επιφάνεια. Αρχικά η τεχνολογία επικοινωνίας TTE είχε μονόδρομη επικοινωνία, αλλά οι πρόσφατες εκδόσεις είναι ικανές να αντιμετωπίσουν την αμφίδρομη επικοινωνία μέσω της υποστήριξης μηνυμάτων κειμένου. Για τη συμπίεση των φωνητικών ηχητικών σημάτων σε στενά εύρη ζώνης χρησιμοποιούνται ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος (DSP), επειδή τα στενά εύρη ζώνης είναι συμβατά με τα φέροντα χαμηλής συχνότητας. Οι τεχνικές επικοινωνίας μέσω της γης χρησιμοποιούνται από τα ακόλουθα συστήματα επικοινωνίας: TeleMAg, Tram Guard Miner Track και υπόγειο ασύρματο ηλεκτρικό σύστημα επικοινωνίας. Η επικοινωνία περιορίζεται σε μηνύματα κειμένου επειδή ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι πολύ χαμηλός λειτουργώντας σε αυτές τις χαμηλές συχνότητες (Sadeghi, S., & Nasirzadeh, F. 2022).

### 3.2.2 *Επικοινωνία μέσω του καλωδίου (TTW)*

Η τεχνική επικοινωνίας μέσω καλωδίου παρέχει επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων σε μια συνήθη λειτουργία του ορυχείου λόγω σταθερής υποδομής. Λειτουργεί καλά στην κανονική λειτουργία των ορυχείων, αλλά είναι ιδιαίτερα ευάλωτη σε βλάβες και μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή ολόκληρου του συστήματος σε ατυχήματα που περιλαμβάνουν πτώσεις οροφής, πυρκαγιά, κατάρρευση ορυχείου κ.λπ. Για τη μετάδοση σήματος χρησιμοποιείται διαφορετικό είδος ηλεκτρικών αγωγών (π.χ. συνεστραμμένο ζεύγος, συναξονικό καλώδιο και οπτική ίνα). Για την υποστήριξη της αξιόπιστης επικοινωνίας των συστημάτων επικοινωνίας TTW έχουν εφαρμοστεί διάφορα συστήματα προστασίας καλωδίων που περιλαμβάνουν την ανάπτυξη μέσω συνδέσεων μέσω γεωτρήσεων στις κύριες γραμμές, την ταφή του καλωδίου και του αγωγού. Ωστόσο, οι συνολικές επιδόσεις των συστημάτων επικοινωνίας TTW είναι ικανοποιητικές, αλλά τα συστήματα αυτά συνεπάγονται πολυπλοκότητα και το κόστος συντήρησης είναι πολύ υψηλό. Ορισμένα συστήματα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στα υπόγεια ορυχεία με βάση τις τεχνικές TTW είναι το σχοινί ανύψωσης, η τηλεειδοποίηση, τα μαγνητικά τηλέφωνα, τα τηλέφωνα κλήσης και σελίδας και τα ηχητικά τηλέφωνα (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018).

### 3.2.3 *Επικοινωνία μέσω του αέρα (TTA)*

Η τεχνολογία επικοινωνίας TTA έχει προσελκύσει την προσοχή των ερευνητών και των διαφόρων κατασκευαστών σε όλο τον κόσμο λόγω της ανάγκης για συστήματα επικοινωνίας χωρίς υποδομές και αξιοπιστίας σε σενάρια έκτακτης ανάγκης. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούν ασύρματη σύνδεση για τη μετάδοση σήματος. Τα συστήματα επικοινωνίας που βασίζονται σε τεχνικές TTA είναι απρόσβλητα από διακοπές επικοινωνίας λόγω διακοπής της γραμμής μεταξύ πομπού και δέκτη λόγω ζημιών από μηχανήματα εξόρυξης ή πτώσεις σε στέγες. Το περιβάλλον υπόγειων ορυχείων είτε σε ανθρακωρυχεία είτε σε μεταλλεία μετάλλων δημιουργεί μια πολύ μεγάλη πρόκληση για την ασύρματη επικοινωνία. Καθώς ένα υπόγειο ορυχείο έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά για τη διάδοση του σήματος, αυτό επηρεάζει την απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας. Η διαμήκης εξασθένηση αυξάνεται λόγω της τραχύτητας των τοιχωμάτων και της ανομοιόμορφης διατομής της σήραγγας. Η τεχνική TTA είναι ικανή να παρέχει διάφορες εφαρμογές, όπως αμφίδρομη φωνητική επικοινωνία, παρακολούθηση, ανίχνευση, βιντεοεπιτήρηση και παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων και προσωπικού ορυχείου. Είναι εύκολη στη χρήση και οικονομική σε σύγκριση με τα ενσύρματα συστήματα. Τα ανθρακωρυχεία και τα ορυχεία μετάλλων,

αμφότερα θέτουν ένα μοναδικό σύνολο προκλήσεων για τη ραδιοεπικοινωνία. Τα ανθρακωρυχεία συμπεριφέρονται ως ένα διηλεκτρικό με σχετικά χαμηλές απώλειες, με διηλεκτρική σταθερά που κυμαίνεται από 5-10 σε ορισμένες συχνότητες, δηλαδή στην περιοχή 200-400 MHz (Palacios Játiva, P., &Soto, I. 2020).

### *3.2.4 Υβριδική τεχνική επικοινωνίας*

Αυτή η τεχνική επικοινωνίας εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα τόσο των τεχνικών επικοινωνίας μέσω καλωδίου (TTW) όσο και των τεχνικών επικοινωνίας μέσω αέρα (TTA). Αυτό οδηγεί σε συστήματα επικοινωνίας καλύτερης εμβέλειας κάλυψης για υπόγεια ορυχεία. Η προσέγγιση του υβριδικού συστήματος μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω για την προώθηση και τη λήψη σημάτων σε έναν κόμβο χρησιμοποιώντας ένα ασύρματο δίκτυο πλέγματος σε σύντομη ασύρματη σύνδεση. Τα συστήματα διαρρέουσας τροφοδοσίας και τα συστήματα που βασίζονται σε RFID χρησιμοποιούνται ευρέως στα ορυχεία σήμερα για την επίτευξη αμφίδρομων επικοινωνιών. Τα υβριδικά συστήματα βασίζονται κυρίως σε ζώνες. Οι αναγνώστες συνδέονται σε σταθερά γνωστά σημεία και είναι σε θέση να διαβάσουν τις ενεργές ετικέτες που βρίσκονται στις ζώνες τους (Krommenacker, N., &Soto, I. 2016).

### *3.3 Ζητήματα που επηρεάζουν την επικοινωνία*

Η κατανόηση των χαρακτηριστικών των υπόγειων ορυχείων καθώς και των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι ενσύρματες και ασύρματες επικοινωνίες είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου συστήματος. Ορισμένες σημαντικές ιδιότητες των υπόγειων καναλιών που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος επικοινωνίας με ηλεκτρομαγνητικά κύματα (HM) σε υπόγεια ορυχεία μπορούν να συνοψιστούν ως εξής(Kunsei, H., &Abbosh, A. M. 2018):

#### *3.3.1 Ακραία απώλεια διαδρομής*

Το σύστημα επικοινωνίας υψηλότερων συχνοτήτων δέχεται περισσότερη προσοχή σε σύγκριση με το σύστημα που βασίζεται σε χαμηλότερες συχνότητες. Έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της υγρασίας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού εξασθένησης. Καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, η απώλεια διαδρομής αυξάνεται. Η απώλεια διαδρομής αυξάνεται ως τετράγωνο της απόστασης που καλύπτει το κύμα σήματος (Singh, A., & Kumar, D. 2018).

### 3.3.2 *Ανάκλαση/ διάθλαση*

Σε ορισμένες συχνότητες η σήραγγα λειτουργεί ως διηλεκτρικό χαμηλών απωλειών που λειτουργεί ως κυματοδηγός για το κύμα σήματος. Όταν τα μεταδιδόμενα σήματα προσκρούουν σε ένα υπόγειο τοίχωμα της σήραγγας, τα σήματα διαθλώνται εν μέρει στο περιβάλλον και ανακλώνται εν μέρει πίσω στον κυματοδηγό της σήραγγας- αυτό προκαλεί απώλεια στην ισχύ του σήματος (Bandyopadhyay, L. K., & Mishra, P. K. 2019).

### 3.3.3 *Διάχυση πολλαπλών διαδρομών*

Λόγω των διαφόρων υπόγειων μηχανημάτων εξόρυξης, της παρουσίας και άλλων ανακλαστήρων, η διάδοση πολλαπλών διαδρομών έρχεται στο προσκήνιο. Αυτό προκαλεί διακυμάνσεις του σήματος και εξασθένηση της ισχύος του σήματος (Wang, J., Zhou, L. 2018).

### 3.3.4 *Ταχύτητα διάδοσης*

Ένα κύμα που διαδίδεται στον κανονικό αέρα έχει καλύτερη ταχύτητα διάδοσης σε σύγκριση με τα κύματα που διαδίδονται στο περιβάλλον εμπόδιο, το οποίο προσθέτει τα φαινόμενα του διηλεκτρικού μέσου. Η διηλεκτρική ιδιότητα του μέσου αλλάζει με την αλλαγή της θερμοκρασίας σε υπόγεια ορυχεία. Εξαιτίας αυτού, το σήμα που διαδίδεται στο εσωτερικό του ορυχείου μεταβάλλεται και οδηγεί στην εξασθένηση του σήματος (Patri, A., & Jayanthu, S. 2019).

### 3.3.5 *Φαινόμενο κυματοδηγού*

Το φαινόμενο του κυματοδηγού θα έπρεπε να περιορίζει ιδανικά τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο εσωτερικό της σήραγγας του ορυχείου, αλλά σε πραγματικά σενάρια η απορρόφηση του σήματος εκπομπής και τα φαινόμενα ανάκλασης στο εσωτερικό της σήραγγας μου οδηγούν σε απώλεια σήματος, άρα σε αυξημένη εξασθένηση σήματος (Krommenacker, N., & Soto, I. 2016).

### 3.3.6 *Θόρυβος*

Ο θόρυβος που οφείλεται στη λειτουργία του εξοπλισμού εξόρυξης μέσα στο υπόγειο ορυχείο υποβαθμίζει την ποιότητα του σήματος. Ο θόρυβος στο σήμα που προστίθεται είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά μειώνει το εύρος κάλυψης του συστήματος επικοινωνίας. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες, οι γραμμές ισχύος και τα συστήματα φωτισμού είναι μερικές από τις

κύριες πηγές θορύβου σε μια σήραγγα ορυχείου. Η απόδοση ενός συστήματος επικοινωνίας επηρεάζεται λόγω του περιβαλλοντικού θορύβου. Ο θόρυβος που προκαλείται από διάφορες συσκευές, γραμμές καλωδίων, ηλεκτροκινητήρες και εξοπλισμό εξόρυξης βρίσκεται στις ζώνες συχνοτήτων στις οποίες λειτουργούν οι υπόγειες συσκευές επικοινωνίας (Forooshani, A. E., &Noghanian, S. 2021).

## Κεφάλαιο 4: Νέες τεχνολογίες

Οι νέες τεχνολογίες εκμετάλλευσης φέρνουν επανάσταση στα μεταλλευτικά έργα, ενισχύοντας την επιχειρησιακή αποδοτικότητα, την ασφάλεια των εργαζομένων και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούν εξελιγμένο εξοπλισμό και για τις αναλύσεις των δεδομένων για τη βελτίωση της λήψης αποφάσεων και τη μείωση της έκθεσης του ανθρώπου σε επικίνδυνα υπόγεια περιβάλλοντα. Τα αυτόνομα συστήματα, τα δίκτυα υψηλής ταχύτητας και η τηλεμετρία βρίσκονται στην πρώτη γραμμή αυτής της τεχνολογικής αλλαγής.

Τα αυτόνομα συστήματα στην εξόρυξη περιλαμβάνουν ρομποτικά τρυπάνια, αυτόνομα φορτηγά μεταφοράς και μη επανδρωμένους φορτωτές που λειτουργούν με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Αυτές οι τεχνολογίες όχι μόνο αυξάνουν την παραγωγικότητα αλλά και την ασφάλεια, καθώς εκτελούν επικίνδυνες εργασίες που διαφορετικά θα έθεταν σε κίνδυνο τους εργαζόμενους στα ορυχεία. Για παράδειγμα, τα αυτόνομα τρυπάνια μπορούν να λειτουργούν σε ασταθείς περιοχές χωρίς να διακινδυνεύουν ανθρώπινες ζωές και τα αυτοκινούμενα φορτηγά μπορούν να πλοηγούνται αξιόπιστα σε βαθιά υπόγεια περάσματα.

Τα δίκτυα υψηλών ταχυτήτων είναι ζωτικής σημασίας για την υποστήριξη των λειτουργιών έντασης δεδομένων αυτών των αυτόνομων τεχνολογιών. Εξασφαλίζουν την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο και την ανεμπόδιστη μεταφορά δεδομένων μεταξύ του υπόγειου εξοπλισμού και του κέντρου ελέγχου, που βρίσκεται στην επιφάνεια. Η συνδεδεσιμότητα υψηλών ταχυτήτων επιτρέπει την παρακολούθηση και τη διαχείριση των λειτουργιών άμεσα, επιτρέποντας τη γρήγορη ανταπόκριση σε τυχόν ζητήματα.

Η τηλεμετρία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την σωστή λειτουργία του εξοπλισμού, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και άλλες κρίσιμες λειτουργικές μετρήσεις. Αυτή η συνεχής ροή δεδομένων είναι απαραίτητη για την προληπτική συντήρηση, τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας και τη διασφάλιση με τα πρότυπα ασφαλείας.

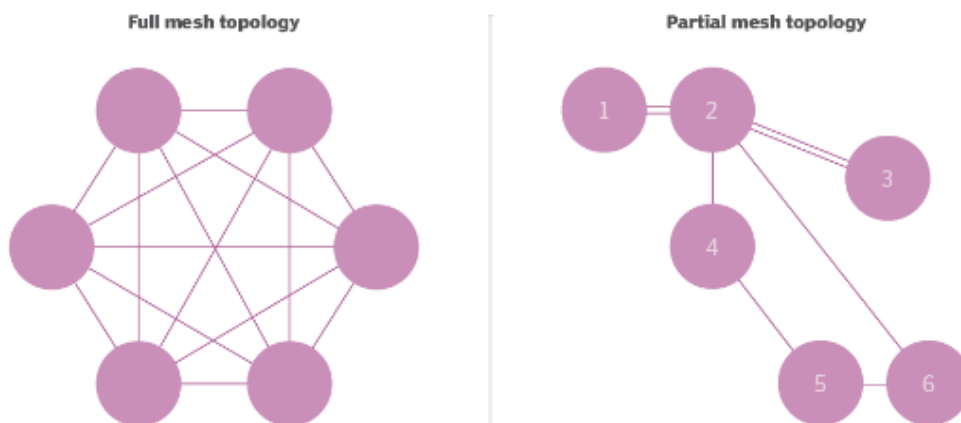
Στο παρόν κεφάλαιο θα διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο αυτές οι τεχνολογίες ενσωματώνονται στα σύγχρονα μεταλλεία, θα συζητηθούν τα οφέλη τους και θα αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή τους.

## 4.1 Ο ρόλος του δικτύου *Mesh*

Ένα δίκτυο πλέγματος είναι ένα δίκτυο στο οποίο οι συσκευές ή οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους, και διακλαδίζονται με άλλες συσκευές ή κόμβους. Οι τοπολογίες δικτύου Mesh δημιουργούν πολλαπλές διαδρομές για πληροφορίες που ταξιδεύουν μεταξύ συνδεδεμένων κόμβων. Αυτή η προσέγγιση αυξάνει την ανθεκτικότητα του δικτύου σε περίπτωση αποτυχίας κόμβου ή σύνδεσης. Τα μεγαλύτερα δίκτυα πλέγματος μπορεί να περιλαμβάνουν πολλαπλούς δρομολογητές, διακόπτες και άλλες συσκευές, οι οποίες λειτουργούν ως κόμβοι. Ένα δίκτυο πλέγματος μπορεί να περιλαμβάνει εκατοντάδες κόμβους ασύρματου πλέγματος, κάτι που του επιτρέπει να εκτείνεται σε μια μεγάλη περιοχή. (Gillis. A. S., Nolle. T. 2021)

Σε μια τοπολογία δικτύου πλήρους πλέγματος, κάθε κόμβος συνδέεται απευθείας με όλους τους άλλους κόμβους. Σε μια μερική τοπολογία πλέγματος, μόνο ορισμένοι κόμβοι συνδέονται απευθείας μεταξύ τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ένας κόμβος πρέπει να περάσει από έναν άλλο κόμβο για να φτάσει σε έναν τρίτο κόμβο. (Gillis. A. S., Nolle. T. 2021)

### Full vs. partial mesh networks



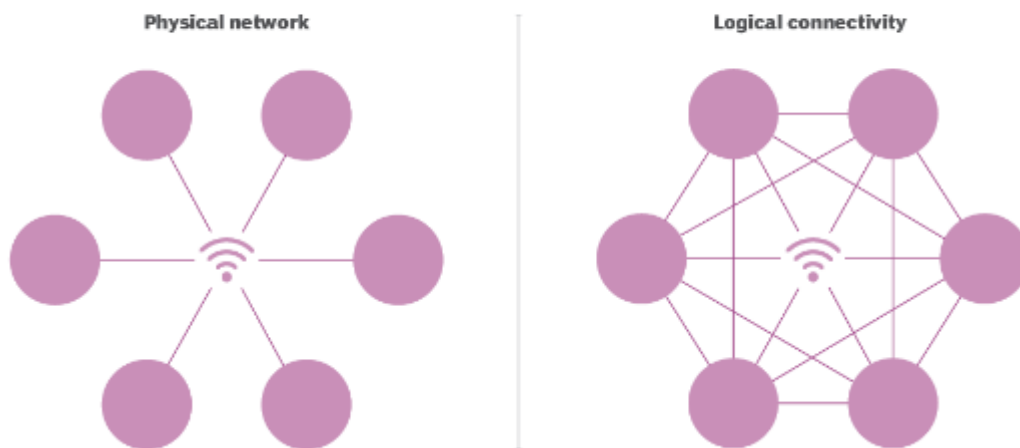
**Σχήμα 4.1:** Κάθε κόμβος σε ένα πλήρες δίκτυο πλέγματος συνδέεται απευθείας με κάθε άλλο κόμβο. Αυτό δεν συμβαίνει σε ένα μερικό δίκτυο πλέγματος. Στο παραπάνω παράδειγμα δικτύου μερικού πλέγματος, ο κόμβος 1 πρέπει να περάσει από τον κόμβο δύο για να επικοινωνήσει με τον κόμβο τρία. (Gillis A. S., 2021)

Οι συνδέσεις είτε σε πλήρες είτε σε μερικό δίκτυο μπορούν να είναι ενσύρματα ή ασύρματα δίκτυα πλέγματος. Η απόφαση για χρήση πλήρους ή μερικού πλέγματος εξαρτάται από

παράγοντες όπως το συνολικό μοτίβο κίνησης του δικτύου και το βαθμό στον οποίο οι κόμβοι ή οι συνδέσεις κινδυνεύουν να αποτύχουν.(Gillis. A. S., Nolle. T. 2021)

Σχεδόν όλα τα δίκτυα φαίνεται να είναι δίκτυα πλήρους πλέγματος επειδή όλοι στο δίκτυο μπορούν να συνδεθούν με όλους τους άλλους. Αυτή η πλήρης συνδεσιμότητα είναι ιδιότητα των πρωτοκόλλων δικτύου και όχι της τοπολογίας, οποιοδήποτε δίκτυο μπορεί να εμφανίζεται πλήρως δικτυωμένο στο λογικό επίπεδο εάν τα δεδομένα μπορούν να δρομολογηθούν μεταξύ καθενός από τους χρήστες του. Τα δίκτυα πλέγματος είναι εκεί όπου η διαφορά μεταξύ λογικών και φυσικών τοπολογιών είναι πιο σημαντική. (Gillis. A. S., Nolle. T. 2021)

## Physical vs. logical Wi-Fi network



**Σχήμα 4.2:** Τα δίκτυα Wi-Fi διαθέτουν έναν διανομέα Wi-Fi που χρησιμεύει ως κεντρικός κόμβος, παρέχοντας έμμεση φυσική συνδεσιμότητα μεταξύ όλων των κόμβων. Το φυσικό δίκτυο έχει μια τοπολογία σε σχήμα αστεριού, ενώ η λογική συνδεσιμότητα είναι ένα πλήρες πλέγμα. (Gillis. A. S., Nolle. T. 2021)

Το πιο κοινό δίκτυο πλήρους πλέγματος είναι το ύφασμα κέντρου δεδομένων, ένα τοπικό δίκτυο (LAN) που έχει σχεδιαστεί για να παρέχει συνδεσιμότητα πλήρους εύρους ζώνης σε κάθε συνδεδεμένη συσκευή. Τα δίκτυα ευρείας περιοχής (WAN) είναι συνήθως δίκτυα μερικου πλέγματος ή τοπολογίες δέντρων. (Gillis. A. S., Nolle. T. 2021)

Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο προγραμματίζονται με λογισμικό που λέει στον κόμβο πώς να χειρίζεται πληροφορίες και να αλληλεπιδρά με το δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό λειτουργούν τα δίκτυα πλέγματος. (Gillis. A. S., Nolle. T. 2021)



Επιπλέον τα δίκτυα πλέγματος χρησιμοποιούν τεχνικές δρομολόγησης ή πλημμύρας για την αποστολή μηνυμάτων. Στη δρομολόγηση, ένα μήνυμα μεταπηδά από κόμβο σε κόμβο για να φτάσει στον προορισμό του. Το δίκτυο πλέγματος πρέπει να έχει συνεχείς συνδέσεις και να επαναδιαμορφωθεί εάν σπάσει μια διαδρομή, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους για λύση. Συχνά θα υπάρχουν περισσότερα από ένα μονοπάτια μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού. (Gillis. A. S., Nolle. T. 2021)

Οι τεχνικές πλημμύρας βασίζονται στη διανομή δεδομένων από έναν κόμβο στους υπόλοιπους σε ένα δίκτυο. Τα δεδομένα αποστέλλονται από ένα υποσύνολο των κόμβων επειδή όλοι οι κόμβοι μπορεί να μην είναι διαθέσιμοι ταυτόχρονα. Κάθε κόμβος διαθέτει ένα υποσύνολο δεδομένων. Ένα πρωτόκολλο επιλέγει τους αποστολείς για κάθε μετάδοση δεδομένων για να μεγιστοποιήσει την απόδοση. (Gillis. A. S., Nolle. T. 2021)

Η δικτύωση πλέγματος αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση στις πολύπλοκες προκλήσεις επικοινωνίας που αντιμετωπίζουν τα υπόγεια ορυχεία. Τα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα είναι συχνά ανεφάρμοστα σε τέτοια περιβάλλοντα λόγω της εκτεταμένης υποδομής και της συντήρησης που απαιτούν, ενώ τα συμβατικά ασύρματα συστήματα δυσκολεύονται με τη διείσδυση του σήματος μέσα από το πέτρωμα και τη γη. Τα δίκτυα πλέγματος, ωστόσο, προσφέρουν μια στιβαρή εναλλακτική λύση. Αυτά τα δίκτυα αποτελούνται από κόμβους που επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους για να καθορίζουν δυναμικά την καλύτερη διαδρομή για τα δεδομένα στο δίκτυο. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει τη συνεχή κάλυψη ακόμη και στις εκτεταμένες και απρόβλεπτες διατάξεις των υπόγειων ορυχείων. Επιπλέον, τα δίκτυα πλέγματος μπορούν να ενισχύσουν την αξιοπιστία των συστημάτων επικοινωνίας, επειδή μπορούν να επαναδρομολογήσουν αυτόματα τα δεδομένα μέσω πολλαπλών διαδρομών σε περίπτωση βλάβης ενός κόμβου, διασφαλίζοντας ότι οι κρίσιμες πληροφορίες ασφάλειας και λειτουργίας μεταδίδονται πάντα αποτελεσματικά. Αυτό καθιστά τα δίκτυα πλέγματος ιδιαίτερα κατάλληλα για τις απαιτητικές συνθήκες των υπόγειων ορυχείων, όπου η ασφάλεια του προσωπικού και η αποδοτικότητα των εργασιών είναι υψίστης σημασίας. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

#### 4.1.1 Η χρήση του δικτύου mesh στα υπόγεια ορυχεία

Στα υπόγεια ορυχεία, ο εντοπισμός του προσωπικού και των αντικειμένων είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια και την αποδοτικότητα. Μια κοινή μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση του δείκτη ισχύος λαμβανόμενου σήματος Received Signal Strength Indicator (RSSI) για τον προσδιορισμό της απόστασης, με βάση την ισχύ των ασύρματων σημάτων από

διάφορα σημεία πρόσβασης. Το ισχυρότερο σήμα, συνήθως πλησιέστερο στο μηδέν dBm, υποδεικνύει την πλησιέστερη θέση σε ένα σημείο πρόσβασης, με τα εν λόγω σημεία δεδομένων να συσχετίζονται στη συνέχεια με φυσικές συντεταγμένες σε ένα κέντρο επιχειρήσεων. Εναλλακτικά, Bluetooth χαμηλής ενέργειας Bluetooth Low Energy (BLE) beacons (κόμβοι) μπορούν να χρησιμεύσουν ως σημεία αναφοράς για ακριβέστερο εντοπισμό μέσω trilateration, ειδικά όταν ανιχνεύονται ταυτόχρονα πολλαπλοί κόμβοι. Παρά τις τεχνολογίες αυτές, η πολύπλοκη τοπολογία των υπόγειων ορυχείων συχνά περιορίζει την πλήρη κάλυψη των δικτύων επικοινωνίας, καθιστώντας δύσκολη τη διασφάλιση συνεπούς εντοπισμού σε όλες τις περιοχές του ορυχείου. Τα δίκτυα πλέγματος, αν και είναι ικανά να μεταδίδουν δεδομένα εντοπισμού, αντιμετωπίζουν επίσης περιορισμούς σχεδιασμού λόγω της φυσικής διάταξης των υπόγειων ορυχείων. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων Wireless Sensor Networks (WSN) και οι λύσεις που βασίζονται στο WiFi, αν και χρησιμοποιούνται ευρέως για τον εντοπισμό θέσης και την ανίχνευση του περιβάλλοντος σε εσωτερικούς χώρους, αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις λόγω των πολύπλοκων ρυθμίσεων και της δαπανηρής συντήρησής τους. Τα συστήματα αυτά απαιτούν ακριβείς περιβαλλοντικές έρευνες και εκτεταμένη βαθμονόμηση, γεγονός που οδηγεί σε υψηλό κόστος και σημαντικές ανάγκες διαχείρισης δεδομένων. Αντίθετα, οι κόμβοι χαμηλής ενέργειας Bluetooth (BLE) προσφέρουν μια πιο πρακτική λύση για εργασίες εντοπισμού εντός τέτοιων περιβαλλόντων. Οι κόμβοι BLE είναι οικονομικά αποδοτικοί, λειτουργούν με μπαταρία για παρατεταμένες περιόδους και μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ανεύρεση και την αποδοτικότητα των δικτύων WiFi χρησιμεύοντας ως σημεία αναφοράς. Το χαμηλό κόστος και η μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους τα καθιστούν ιδανικά για συνεχή χρήση ως σημεία εντοπισμού, παρέχοντας μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση σε σχέση με τα πιο πολύπλοκα και ακριβά συστήματα που βασίζονται στο WiFi. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

Ο δείκτης ισχύος λαμβανόμενου σήματος Received Signal Strength Indicator (RSSI) είναι μια κρίσιμη παράμετρος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του επιπέδου ισχύος ενός ασύρματου ραδιοσήματος, το οποίο μπορεί να προσεγγίσει την απόσταση από την πηγή του σήματος. Χρησιμοποιώντας μετρήσεις RSSI από πολλαπλά σημεία, συνήθως τρία, η τριπλευροποίηση (trilateration) μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια μια θέση στον τρισδιάστατο χώρο, παρόμοια με την τεχνολογία GPS. Τα σημεία αναφοράς Reference points (RP) είναι απαραίτητα σε αυτή τη διαδικασία ως σταθερές θέσεις από τις οποίες μετριοούνται οι αποστάσεις με τη χρήση ασύρματων τεχνολογιών. Κάθε RP έχει ένα μοναδικό

αναγνωριστικό που, όταν αναγνωρίζεται από μια συσκευή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με μια βάση δεδομένων γνωστών θέσεων RP για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης της συσκευής. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους indoor positioning systems (IPS) για τον εντοπισμό της θέσης των συσκευών και, κατ' επέκταση, των ατόμων που τις φέρουν. Τόσο τα σημεία πρόσβασης WiFi όσο και οι φάροι BLE μπορούν να χρησιμεύσουν ως RP, παρέχοντας ευελιξία στη δημιουργία και την ενίσχυση της ακρίβειας τέτοιων συστημάτων εντοπισμού θέσης. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

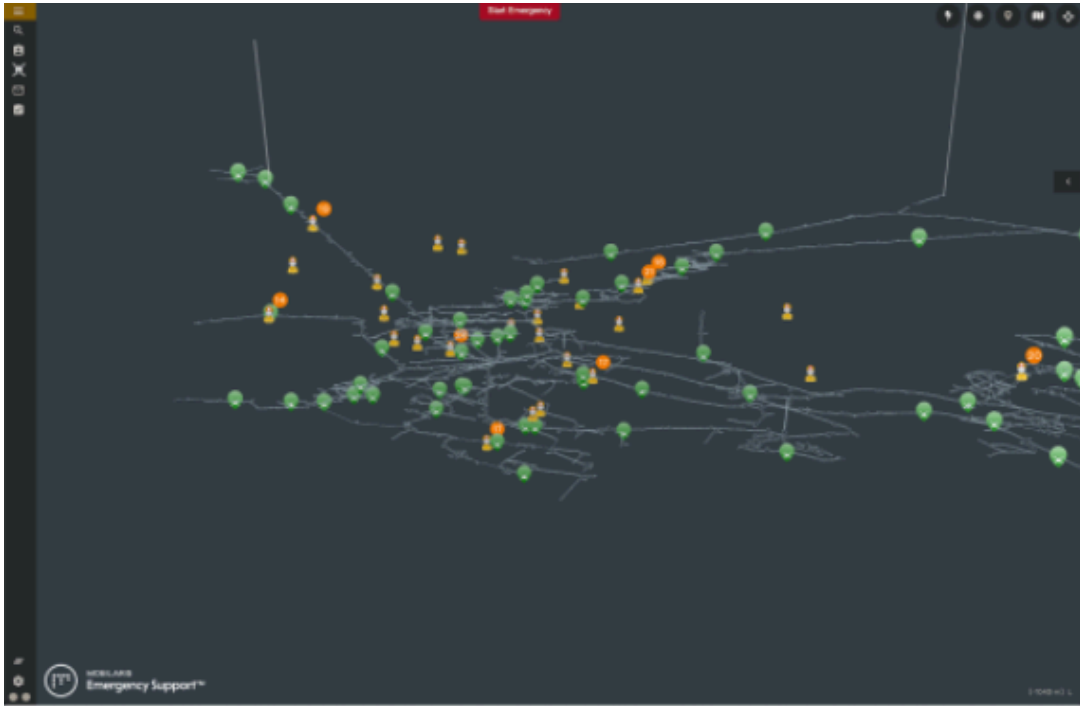
#### 4.1.2 Προσομοίωση δικτύου σε ορυχείο

Η παρούσα μελέτη διερευνά την αποτελεσματικότητα ενός δικτύου πλέγματος mesh σε σχέση με τις παραδοσιακές υποδομές δικτύου όσον αφορά τη προστασία και τη παρακολούθηση των εργαζομένων στα ορυχεία. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις τόσο ενός συμβατικού δικτύου όσο και ενός δικτύου πλέγματος, ώστε να παρέχεται στους υπεύθυνους του συστήματος ένα ρεαλιστικό επιχειρησιακό περιβάλλον. Αυτές οι προσομοιώσεις χρησίμευσαν ως διαδραστικά εργαλεία κατά τη διάρκεια συνεντεύξεων με διαχειριστές συστημάτων ορυχείων, όχι για να αποδώσουν άμεσα αποτελέσματα, αλλά για να δώσουν ιδέες με βάση τις εμπειρίες των συμμετεχόντων με τα εικονικά δίκτυα. Δεδομένα από ένα πραγματικό ορυχείο χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των διαστημάτων ενημέρωσης θέσης στο δίκτυο πλέγματος, τα οποία ενημερώθηκαν περαιτέρω από ποιοτικά δεδομένα από τις συνεντεύξεις. Αυτή η προσέγγιση έρευνας βοηθά στην ενσωμάτωση των εμπειρικών ευρημάτων με τις υπάρχουσες θεωρίες, ενισχύοντας την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα δίκτυα πλέγματος θα μπορούσαν να βελτιώσουν την ασφάλεια και αποτελεσματικότητα στα ορυχεία. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

Η συλλογή εμπειρικών δεδομένων διεξήχθη κυρίως μέσω συνεντεύξεων, χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα συνέντευξης, ηχογραφήσεις και γραπτές απομαγνητοφωνήσεις για την καταγραφή λεπτομερών πληροφοριών από τους διαχειριστές του συστήματος των ορυχείων. Η μέθοδος αυτή επέτρεψε στους συνεντευξιζόμενους να συζητήσουν ελεύθερα τις εμπειρίες και τις προοπτικές τους σχετικά με την υποδομή δικτύου υπόγειων ορυχείων, εμπλουτίζοντας έτσι τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

Για τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε ένας προϋπάρχων προσομοιωτής που αναπτύχθηκε από τη συνεργαζόμενη εταιρεία για να βελτιωθεί η κατανόηση και η ανάλυση του εντοπισμού θέσης σε υπόγειο ορυχείο. Αυτός ο προσομοιωτής έχει σχεδιαστεί για να διαχειρίζεται και να

εμφανίζει προσομοιωμένες κινήσεις προσωπικού μέσα στο ορυχείο, χρησιμοποιώντας εισόδους όπως ο αριθμός των ατόμων, η συχνότητα των ενημερώσεων θέσης και συγκεκριμένες θέσεις που σχετίζονται με πρωτόκολλα ασφαλείας. Με βάση τα πραγματικά δεδομένα του ορυχείου, τα διαστήματα ενημέρωσης θέσης που υπολογίστηκαν στη μελέτη ενσωματώθηκαν στον προσομοιωτή για να αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

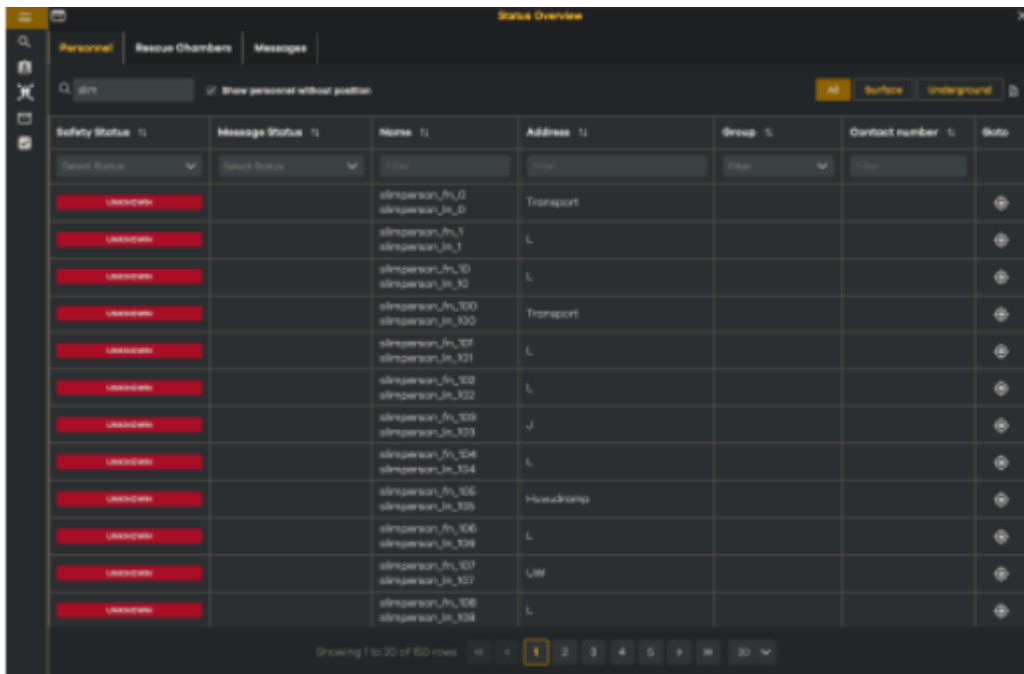


**Σχήμα 4.3:** Άνθρωποι που απεικονίζονται σε έναν τρισδιάστατο χάρτη του ορυχείου.

Το Σχήμα 4.3 απεικονίζει μια σχηματική διάταξη του ορυχείου, όπου φαίνονται οι διαδρομές και οι θέσεις-κλειδιά, όπως τα Σημεία Πρόσβασης (AP) που σημειώνονται με πράσινο χρώμα, τα οποία διευκολύνουν τη συνδεσιμότητα και την παρακολούθηση του προσωπικού και του εξοπλισμού. Επιπλέον, οι πορτοκαλί κύκλοι με αριθμούς υποδεικνύουν αποθήκες ασφαλείας, στρατηγικά τοποθετημένες για να προσφέρουν καταφύγιο σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, ενισχύοντας τον ρεαλισμό της προσομοίωσης με την ενσωμάτωση κρίσιμων χαρακτηριστικών ασφαλείας. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

Το Σχήμα 4.4 παρέχει μια λεπτομερή προβολή της επιφάνειας του προσομοιωτή, εμφανίζοντας τα στοιχεία που σχετίζονται με τους εργαζόμενους στα ορυχεία. Κάθε στοιχείο αντιπροσωπεύει ένα εικονίδιο που μοιάζει με πρόσωπο και συνοδεύεται από βασικές πληροφορίες, όπως όνομα, διεύθυνση, ένταξη σε ομάδα, δυνατότητες αποστολής μηνυμάτων και κατάσταση ασφαλείας. Αυτή η λεπτομερής αναπαράσταση βοηθά τους χειριστές στο

κέντρο επιχειρήσεων, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της θέσης και της κατάστασης κάθε εργαζομένου σε πραγματικό χρόνο. Ο προσομοιωτής περιλαμβάνει επίσης διαδραστικές λειτουργίες όπως η λειτουργία «goto», η οποία επιτρέπει στους χειριστές να κεντράρουν την προβολή του χάρτη σε ένα συγκεκριμένο άτομο, προσομοιώνοντας περαιτέρω ένα πραγματικό σενάριο παρακολούθησης ορυχείου. Αυτή η εξελιγμένη εγκατάσταση προσομοίωσης χρησιμεύει ως ανεκτίμητο εργαλείο για τους συμμετέχοντες στις συνεντεύξεις, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν και να ανταποκρίνονται σε προσομοιωμένες λειτουργίες ορυχείων, παρέχοντας έτσι βαθύτερες γνώσεις σχετικά με την πρακτική εφαρμογή και την αποτελεσματικότητα των ενημερώσεων δικτύων πλέγματος στην παρακολούθηση και τη διαχείριση της ασφάλειας εντός υπόγειων ορυχείων. (Berg, E. & Boudet O. 2023)



**Σχήμα 4.4:** Προβολή των στοιχείων που συνδέονται με ένα άτομο που προσομοιώνεται

Η ανάλυση των δεδομένων των συνεντεύξεων με τους διαχειριστές των συστημάτων των ορυχείων αποκάλυψε σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία και την ασφάλεια των σημερινών υποδομών δικτύου στα υπόγεια ορυχεία, εστιάζοντας ιδιαίτερα στη χρήση ενός δικτύου βασισμένου σε πλέγμα, σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα. Οι ερωτηθέντες, οι οποίοι έχουν σημαντική εμπειρία με υποδομές δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων που βασίζονται στη θέση, υπογράμμισαν τις εξελίξεις σε τεχνολογίες όπως το 802.11 και άλλες τεχνολογίες ραδιοσυχνοτήτων που έχουν

βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των σημερινών συστημάτων εντοπισμού θέσης.

Επισήμαναν ότι τα σύγχρονα συστήματα παρέχουν ταχύτερες ενημερώσεις και καλύτερη κάλυψη σε σύγκριση με τα παλαιότερα μοντέλα, ενισχύοντας αποφασιστικά την ασφάλεια των ορυχείων και την παραγωγικότητα. Οι συμμετέχοντες υπογράμμισαν επίσης την κρίσιμη ανάγκη για την ενημέρωση της θέσης σε πραγματικό χρόνο, τα υπάρχοντα συστήματα ενημερώνουν κάθε δέκα δευτερόλεπτα, πράγμα ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση των εργασιών των ορυχείων και τη διασφάλιση της γρήγορης αντίδρασης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Εκφράστηκαν ανησυχίες σχετικά με τις δυνατότητες των δικτύων πλέγματος σε αυτές τις συνθήκες, ιδίως επειδή τα δίκτυα πλέγματος δεν εγγυώνται την άμεση παράδοση μηνυμάτων, γεγονός που εγκυμονεί κινδύνους κατά τη διάρκεια καταστάσεων έκτακτης ανάγκης όπου κάθε δευτερόλεπτο μετράει. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

Επιπλέον, οι συζητήσεις διερεύνησαν και τη χρήση των πομπών Bluetooth χαμηλής ενέργειας (BLE) για τη βελτίωση της ακρίβειας θέσης μέσω των τιμών RSSI και του τριμερισμού, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αυξημένη χρήση τους θα μπορούσε να βελτιώσει την πλοήγηση των εργαζομένων σε ζώνες ασφαλείας κατά τη διάρκεια έκτακτων περιστατικών. Ωστόσο, επισημάνθηκε ο συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας θέσης και των διαστημάτων ενημέρωσης, με προτίμηση στη διατήρηση συχνών ενημερώσεων. Οι προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια των συνεντεύξεων, συγκρίνοντας τα τρέχοντα συστήματα με τις πιθανές ενημερώσεις του δικτύου πλέγματος, οδήγησαν και τους δύο συμμετέχοντες να θεωρήσουν τις ενημερώσεις του δικτύου πλέγματος λιγότερο αξιόπιστες και πολύ σπάνιες για τη διαφύλαξη της ασφάλειας των εργασιών σε ορυχεία. Αυτό ευθυγραμμίζεται με τις θεωρητικές ανησυχίες ότι τα δίκτυα πλέγματος, αν και ωφέλιμα σε ορισμένα σενάρια χαμηλής πυκνότητας και περιορισμένου εύρους ζώνης, μπορεί να μην είναι κατάλληλα για περιβάλλοντα που εξαρτώνται από δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

Η μελέτη διερεύνησε τις δυνατότητες ενσωμάτωσης υποδομών δικτύου βασισμένων σε πλέγμα εντός των ορυχείων για την ενίσχυση της ασφάλειας και της παρακολούθησης των εργαζομένων στα ορυχεία, σε αντιπαράθεση με τα υφιστάμενα πλήρως συνδεδεμένα συστήματα δικτύου. Από τις συνεντεύξεις προέκυψε ότι, ενώ τα δίκτυα πλέγματος προσφέρουν την ευελιξία της ad hoc ανάπτυξης και το χαμηλότερο κόστος, καθιστώντας τα

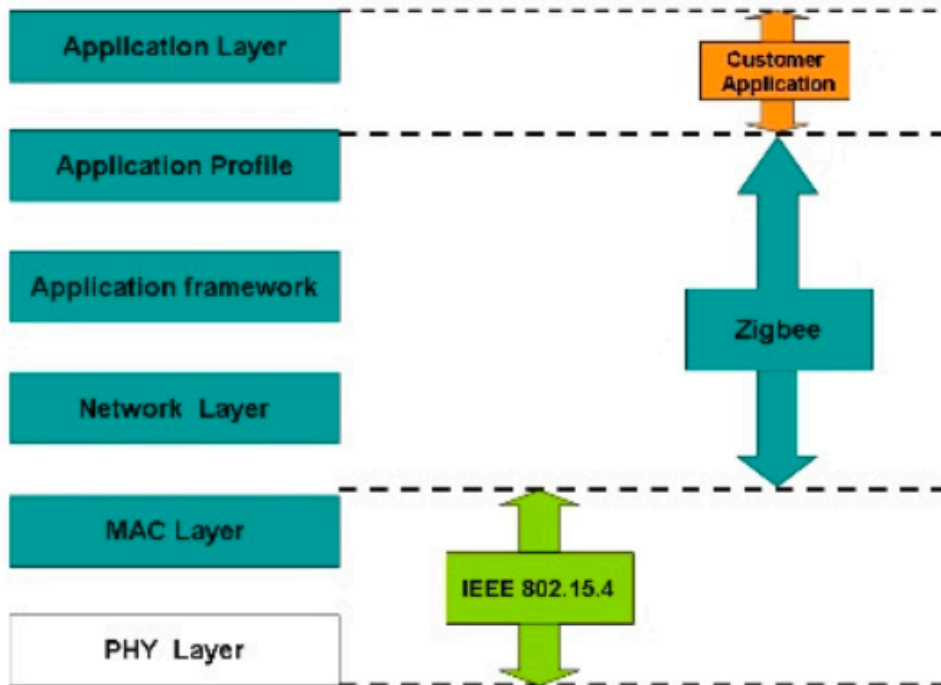
κατάλληλα για προσωρινές ρυθμίσεις εντός των ορυχείων, δεν παρέχουν την αξιοπιστία που απαιτείται για κρίσιμες ειδοποιήσεις έκτακτης ανάγκης λόγω της υψηλής καθυστέρησης και της έλλειψης εγγυημένης μετάδοσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα προβληματικό στις επιχειρήσεις εξόρυξης, όπου οι ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο είναι ζωτικής σημασίας τόσο για την επιχειρησιακή αποδοτικότητα όσο και για την αντιμετώπιση έκτακτων περιστατικών. Η ανησυχία είναι ότι τα δίκτυα πλέγματος ενδέχεται να μην διασφαλίζουν ότι όλοι οι εργαζόμενοι θα ειδοποιούνται αμέσως σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, θέτοντας ενδεχομένως σε κίνδυνο την ασφάλεια. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους περιορισμούς, προτάθηκε ως συμβιβασμός μια λύση υβριδικού δικτύου. Αυτή η προσέγγιση θα περιλάμβανε λιγότερα σημεία πρόσβασης από ένα πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο, μειώνοντας το κόστος και τη συντήρηση, διατηρώντας παράλληλα επαρκή κάλυψη για τις περισσότερες λειτουργίες του ορυχείου. Ωστόσο, αυτό θα δημιουργούσε «γκρίζες ζώνες» όπου η συνδεσιμότητα θα μπορούσε να διακοπεί, δημιουργώντας κίνδυνο σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, εάν οι εργαζόμενοι δεν λαμβάνουν έγκαιρες ενημερώσεις. Για να μετριαστεί αυτό, προτείνεται ότι η στρατηγική τοποθέτηση πρόσθετων σημείων πρόσβασης σε κρίσιμες περιοχές θα μπορούσε να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας έκτακτης ανάγκης. Τελικά, ενώ ένα υβριδικό δίκτυο θα μπορούσε ενδεχομένως να προσφέρει μια οικονομικά αποδοτική και επεκτάσιμη λύση, η σκοπιμότητα και η αποτελεσματικότητά του θα πρέπει να αξιολογηθεί κατά περίπτωση, διασφαλίζοντας ότι πληροί τα αυστηρά πρότυπα ασφαλείας που απαιτούνται σε περιβάλλοντα ορυχείων. (Berg, E. & Boudet O. 2023)

## 4.2 Ο ρόλος του δικτύου *ZigBee*

Το ZigBee είναι το πιο δημοφιλές βιομηχανικό πρότυπο ασύρματης δικτύωσης πλέγματος για τη σύνδεση αισθητήρων, οργάνων και συστημάτων ελέγχου. Το ZigBee έχει προδιαγραφές για την επικοινωνία wireless personal area network (WPAN), έχει χαρακτηριστεί ως το «Internet of things.» Θεωρητικά υπάρχει η δυνατότητα με ZigBee η καφετιέρα σας να μπορεί να επικοινωνεί με την τσιστιέρα σας. Το ZigBee είναι ένα ανοιχτό, παγκόσμιο πρωτόκολλο βασισμένο σε πακέτα, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ασφαλή, αξιόπιστα, χαμηλής ισχύος ασύρματα δίκτυα. Το ZigBee και IEEE 802.15.4 είναι πρότυπα ασύρματης δικτύωσης χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να εξαλείψουν την κοστοβόρα και ευαίσθητη σε ζημιές καλωδίωση σε εφαρμογές βιομηχανικού ελέγχου. Ο εξοπλισμός ελέγχου ροής ή επεξεργασίας μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε και να

εξακολουθεί να επικοινωνεί με το υπόλοιπο σύστημα. Μπορεί επίσης να μετακινηθεί, καθώς το δίκτυο δεν ενδιαφέρεται για τη φυσική θέση ενός αισθητήρα, μιας αντλίας ή μιας βαλβίδας. (Tomar A. 2011)



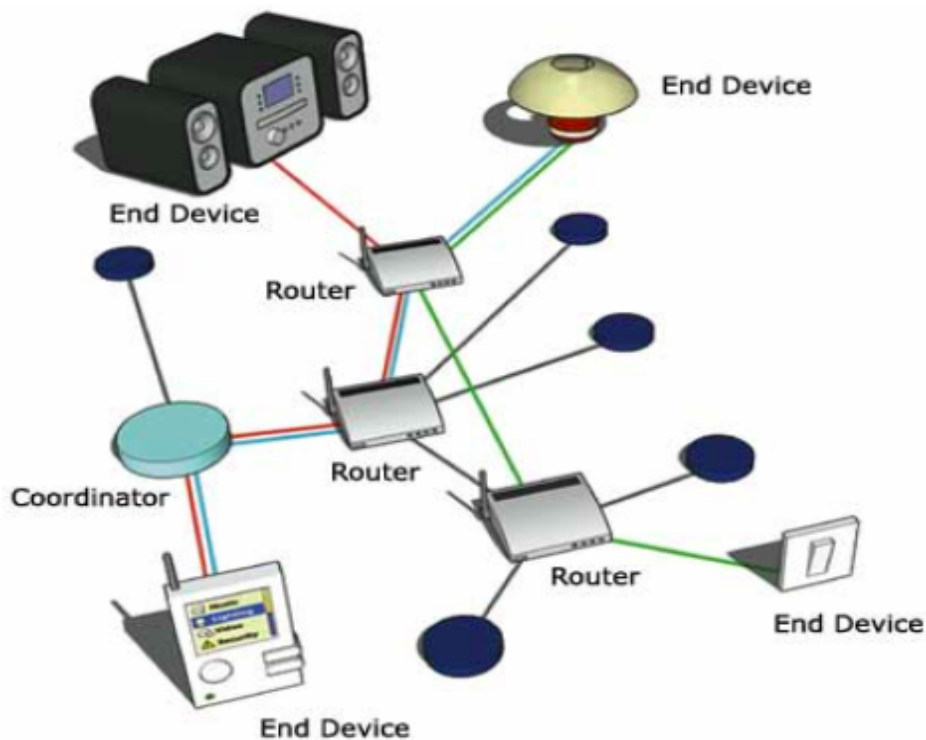
*Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ZigBee*

Το πρότυπο ZigBee RF4CE βελτιώνει και το πρότυπο IEEE 802.15.4 παρέχοντας ένα απλό επίπεδο δικτύωσης και τυποποιημένα προφίλ εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία επικοινωνίας πολλαπλών προϊόντων. (Tomar A. 2011)

Το 802.15.4 είναι ένα ραδιοφωνικό πρωτόκολλο βασισμένο σε πακέτα. Αντιμετωπίζει τις ανάγκες επικοινωνίας των ασύρματων εφαρμογών που έχουν χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων και απαιτήσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Είναι το θεμέλιο πάνω στο οποίο βασίζεται το ZigBee. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται μια απλουστευμένη στοίβα ZigBee, η οποία περιλαμβάνει τα δύο επίπεδα που καθορίζονται από το 802.15.4: το φυσικό επίπεδο (PHY) και το επίπεδο MAC. (Tomar A. 2011)

Οι εφαρμογές του ZigBee έχουν πολλά οφέλη. Αρχικά έχουν τη δυνατότητα για τον αυτοματισμό του σπιτιού και του γραφείου, όπως επίσης υπάρχει και ο βιομηχανικός αυτοματισμός, η Ιατρική παρακολούθηση, οι Αισθητήρες χαμηλής ισχύος, Έλεγχος HVAC. Συν πολλές άλλες χρήσεις ελέγχου και παρακολούθησης. (Tomar A. 2011)





*Σχήμα 4.6: Προβολή ενός δικτύου Zigbee σε σπίτι/γραφείο*

#### 4.2.1 Η χρήση του δικτύου ZigBee στα υπόγεια ορυχεία

Η επέκταση του παγκόσμιου μεταλλευτικού τομέα καθοδηγείται όλο και περισσότερο από τη ζήτηση για ορυκτά προϊόντα και η εξάντληση των μεταλλευμάτων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους οδηγεί σε βαθύτερες υπόγειες εργασίες που συνεπάγονται με σημαντικούς κινδύνους και προκλήσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονται ο κακός φωτισμός, οι περιορισμένοι χώροι, οι πτώσεις βράχων, ο ανεπαρκής εξαερισμός και τα πολύπλοκα δομικά περιβάλλοντα, τα οποία συμβάλλουν σε υψηλό λειτουργικό κόστος και κινδύνους για την ασφάλεια. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, έχουν υιοθετηθεί καινοτόμα συστήματα επικοινωνίας και παρακολούθησης, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN), συμπεριλαμβανομένων τεχνολογιών όπως το ultra-wideband (UWB) και το Wi-Fi, για την ενίσχυση της ασφάλειας και της παραγωγικότητας. Μεταξύ αυτών, η τεχνολογία ZigBee, που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4, έχει αναδειχθεί ως μια ιδιαίτερα αποτελεσματική λύση. Τα δίκτυα ZigBee προσαρμόζονται στις σκληρές υπόγειες συνθήκες, παρέχοντας αξιόπιστες, χαμηλού κόστους διαδρομές επικοινωνίας μεταξύ σταθερών και κινητών κόμβων, γεγονός που συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη διαχείριση πολύπλοκων εργασιών εξόρυξης. Η τεχνολογία αυτή δεν υποστηρίζει μόνο τις συνήθεις επικοινωνίες, αλλά διαδραματίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στην αντιμετώπιση έκτακτων περιστατικών και στον επιχειρησιακό προγραμματισμό. Πρόσφατες

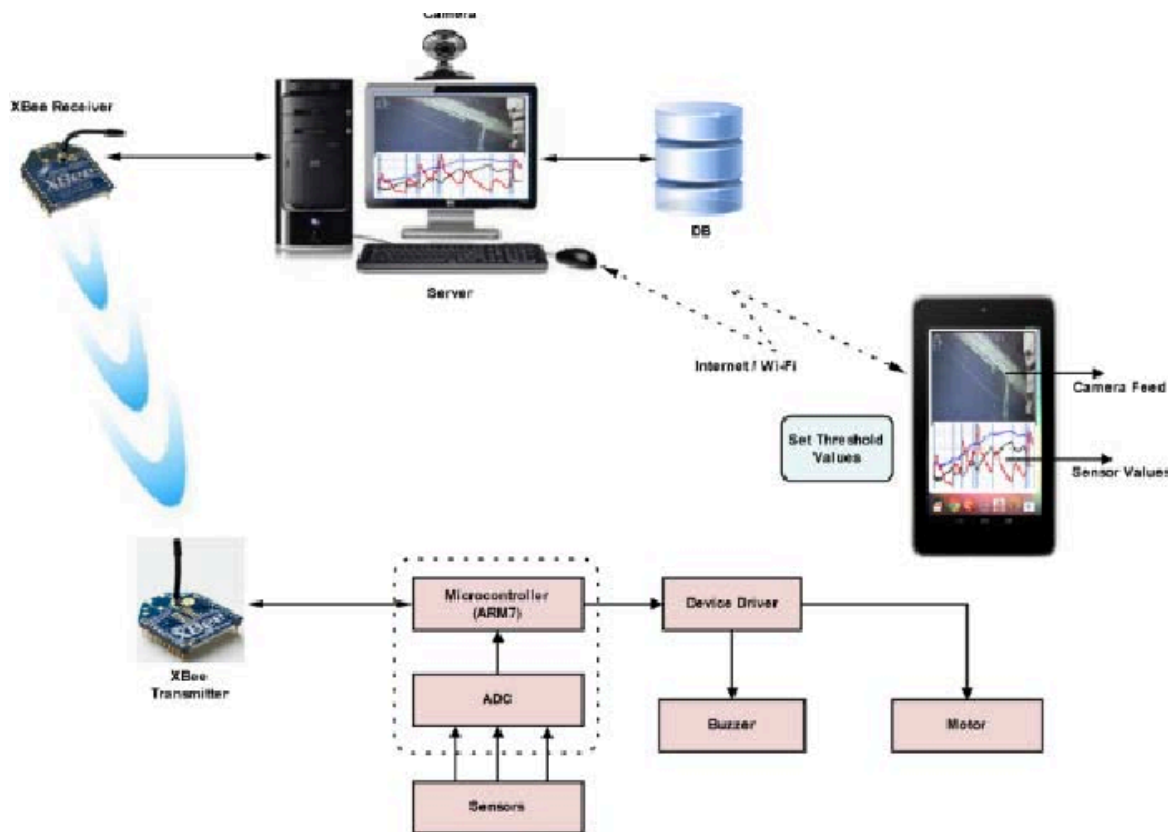
μελέτες έχουν επικυρώσει την αποτελεσματικότητα των δικτύων ZigBee στη βελτίωση των υπόγειων εργασιών εξόρυξης, αξιολογώντας την ισχύ του σήματος σε διάφορες συνθήκες του ορυχείου και βελτιστοποιώντας την τοποθέτηση των κόμβων για να εξασφαλιστεί σταθερή επικοινωνία, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά τόσο την ασφάλεια όσο και την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) έχουν καθοριστική σημασία για την ενίσχυση των δυνατοτήτων επικοινωνίας και παρακολούθησης σε διάφορες συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων δύσκολων περιβαλλόντων όπως τα υπόγεια ορυχεία. Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται συνήθως από πολυάριθμους κόμβους που συνδέονται με μια πύλη και μεταξύ τους, διευκολύνοντας τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Μεταξύ των διαφορετικών τύπων τεχνολογιών WSN όπως το Bluetooth, το Wi-Fi, το Ultra-wideband (UWB), το Wavenis, το Wibree και το ZigBee, κάθε ένα έχει τις δικές του ξεχωριστές εφαρμογές και περιορισμούς σε υπόγεια σενάρια. Για παράδειγμα, ενώ το Bluetooth και το Wi-Fi είναι κοινά σε προσωπικά και εμπορικά περιβάλλοντα για τη σύνδεση συσκευών όπως οι υπολογιστές και τα smartphones, η εφαρμογή τους στα ορυχεία είναι περιορισμένη λόγω της μικρής εμβέλειας και της εκτεταμένης υποδομής που απαιτείται για τη διάδοση του σήματος. Το UWB προσφέρει υψηλό εύρος ζώνης, αλλά εμποδίζεται από την υψηλή κατανάλωση ενέργειας και την περιορισμένη εμβέλεια. Ομοίως, το Wavenis παρέχει επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας σε εξαιρετικά χαμηλή ισχύ, αλλά υποφέρει από χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, καθιστώντας το ακατάλληλο για εφαρμογές έντασης δεδομένων. Η τεχνολογία ZigBee, από την άλλη πλευρά, αναδεικνύεται ως ιδιαίτερα κατάλληλη επιλογή για υπόγεια ορυχεία λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και της ικανότητάς της να υποστηρίζει ένα μεγάλο δίκτυο κόμβων, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές όπως η αυτόματη ανάγνωση μετρητών, τα συστήματα ασφαλείας και οι λειτουργίες τηλεχειρισμού εντός του ορυχείου. Με την ικανότητά να διαχειρίζεται αποτελεσματικά πυκνά δίκτυα με ρυθμό δεδομένων 250 Kbps, το ZigBee υποστηρίζει αξιόπιστη επικοινωνία και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, που είναι υψίστης σημασίας για την ασφαλεία και αποδοτικότητα σε μεταλλεία. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)

Η τεχνολογία ZigBee, η οποία έχει πρότυπο IEEE 802.15.4, έχει διαμορφώσει σημαντικά την ανάπτυξη των συστημάτων επικοινωνίας και παρακολούθησης σε υπόγεια ορυχεία. Το ZigBee, το οποίο εισήχθη ως ασύρματο δίκτυο προσωπικής περιοχής (WPAN) χαμηλής ισχύος και χαμηλού ρυθμού, υπερέχει σε σκληρά περιβάλλοντα λόγω των στιβαρών

χαρακτηριστικών του που είναι προσαρμοσμένα για αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική λειτουργία. Λειτουργεί σε τρεις ελεύθερες ζώνες αδειών-2,4 GHz, 915 MHz και 868 MHz, προσφέροντας ευελιξία στην ανάπτυξη με ένα εξαιρετικά χαμηλό προφίλ κατανάλωσης ενέργειας. Οι κόμβοι μπορούν να παραμείνουν σε λειτουργία έως και δύο χρόνια με μία μόνο φόρτιση της μπαταρίας, ανάλογα με την εφαρμογή. Επιπλέον, τα δίκτυα ZigBee μπορούν να υποστηρίξουν ένα τεράστιο δίκτυο με χωρητικότητα έως και 65.536 κόμβους, παρέχοντας ολοκληρωμένη κάλυψη ακόμη και σε εκτεταμένες υπόγειες εγκαταστάσεις. Αυτή η δυνατότητα είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση συνεχούς και σταθερής επικοινωνίας σε όλες τις περιοχές ενός ορυχείου, διευκολύνοντας τόσο τις συνήθεις λειτουργίες όσο και τις αντιδράσεις έκτακτης ανάγκης. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)

Η πρακτική εφαρμογή του ZigBee στα υπόγεια ορυχεία ενισχύει την ασφάλεια και τη λειτουργική διαχείριση με την ενσωμάτωση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από διάφορους αισθητήρες και συστήματα εντοπισμού. Η ενσωμάτωση αυτή επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, της δομικής ακεραιότητας και της θέσης των ανθρακωρύχων και του εξοπλισμού, βελτιώνοντας έτσι τους χρόνους απόκρισης σε πιθανούς κινδύνους και καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, η ικανότητα του ZigBee να σχηματίζει ad-hoc δίκτυα σημαίνει ότι τα συστήματα αυτά αυτοοργανώνονται και αυτοθεραπεύονται, διασφαλίζοντας ότι η επικοινωνία διατηρείται ακόμη και αν ορισμένοι κόμβοι αποτύχουν. Τα χαρακτηριστικά ασφαλείας του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των ελέγχων ακεραιότητας δεδομένων και της κρυπτογράφησης, διασφαλίζουν περαιτέρω τις ευαίσθητες πληροφορίες από πιθανές παραβιάσεις. Συνολικά, η ανάπτυξη του ZigBee σε υπόγεια ορυχεία όχι μόνο υποστηρίζει κρίσιμα μέτρα ασφαλείας, αλλά και ενισχύει την αποδοτικότητα των εργασιών εξόρυξης μέσω του βελτιωμένου ελέγχου της κυκλοφορίας, του προγραμματισμού και της επιχειρησιακής διαχείρισης σε πραγματικό χρόνο από το κέντρο ελέγχου, καθιστώντας το απαραίτητο εργαλείο στα σύγχρονα βιομηχανία. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)



**Σχήμα 4.7:** Σχεδιασμός του συστήματος ZigBee

Για το σχεδιασμό ενός δικτύου στο υπόγειο ορυχείο, απαιτούνται σταθερές εμβέλειες επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων ZigBee με βάση την εξασθένηση των ραδιοκυμάτων στα διάφορα ανοίγματα και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Σημαντικός παράγοντας για τη μέτρηση της εξασθένησης των ραδιοκυμάτων είναι η ένταση της ένδειξης ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (RSSI). Με άλλα λόγια, το RSSI είναι μια ένδειξη της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος από την κεραία του κόμβου ZigBee. Το RSSI περιγράφεται σε decibel milli Watt (dBm ή dBmW). Η σχέση μεταξύ του RSSI [dBm] και της έντασης της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος [mW] ορίζεται ως  $dBm = 10 \log_{10}(mW)$ . Η ένταση της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος εκφράζεται επίσης με [dBm]. Για την αξιολόγηση της σταθερής εμβέλειας επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων ZigBee σε υπόγεια ορυχεία, πραγματοποιήθηκαν πειράματα μετρήσεων RSSI στο ορυχείο ψευδαργύρου Angas στη Νότια Αυστραλία. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)

#### 4.2.2 Ορυχείο Angas Zinc στη Νότια Αυστραλία

Το ορυχείο ψευδαργύρου Angas, το οποίο διαχειρίζεται η Terramin Australia Limited και βρίσκεται κοντά στην Αδελαΐδα της Νότιας Αυστραλίας, χρησίμευσε ως περιοχή μελέτης για

πειράματα μέτρησης RSSI με στόχο την ενίσχυση της επικοινωνίας υπόγειων ορυχείων με την τεχνολογία ZigBee. Τα πειράματα διεξήχθησαν στρατηγικά σε δύο ανενεργές ζώνες εξόρυξης στα επίπεδα -160 και -75 για να αποφευχθεί η διακοπή των εν εξελίξει δραστηριοτήτων εξόρυξης. Αυτές οι επιλεγμένες σήραγγες, που χαρακτηρίζονται από διατομές σχήματος D με πλάτος και ύψος 5,5 μέτρα, αποτελούν μέρος του μέλους Angas Garnet Member εντός του σχηματισμού Taranappa. Η πρωταρχική σύνθεση του μεταλλευτικού σώματος εντός αυτών των στοών περιλαμβάνει ψευδάργυρο και μόλυβδο, σε ένα γεωλογικό πλαίσιο όπου τα υπάρχοντα ισχυρά πετρώματα υποδοχής αναιρούν την ανάγκη για πρόσθετα δομικά συστήματα στήριξης, απλοποιώντας έτσι τη ρύθμιση για τα πειράματα RSSI. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)



**Σχήμα 4.8:** Angas Zinc Mine

Κατά τη δημιουργία ενός δικτύου ZigBee για την επικοινωνία σε υπόγεια ορυχεία, τα βασικά στοιχεία περιλαμβάνουν τον συντονιστή και τον δρομολογητή (συσκευή πλήρους λειτουργίας, FFD). Σε μια πρόσφατη μελέτη, δημιουργήθηκε ένα δίκτυο ZigBee χρησιμοποιώντας έναν «Συντονιστή GeoSense» και δύο δρομολογητές «GeoSense». Οι συσκευές αυτές αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Γεωαισθητήρων του Πανεπιστημίου Tsukuba σε συνεργασία με την HITACHI Corporation. Οι δρομολογητές GeoSense είναι υπεύθυνοι για τη διευκόλυνση της επικοινωνίας στο δίκτυο, αναμεταδίδοντας δεδομένα κόμβο προς κόμβο στον Συντονιστή, ο οποίος χρησιμεύει ως ο κύριος κόμβος σύνδεσης. Διασυνδέεται τόσο με το δίκτυο ZigBee ασύρματα όσο και με ένα υπολογιστικό σύστημα μέσω Ethernet,

διαχειριζόμενος τη μετάδοση και την αποθήκευση δεδομένων σε όλο το δίκτυο. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)

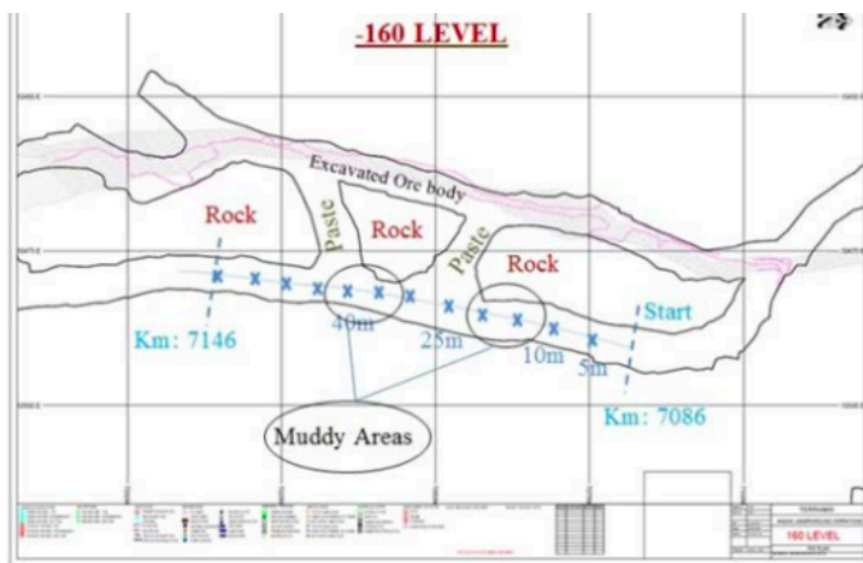


**Σχήμα 4.9:** Angas Zinc Mine

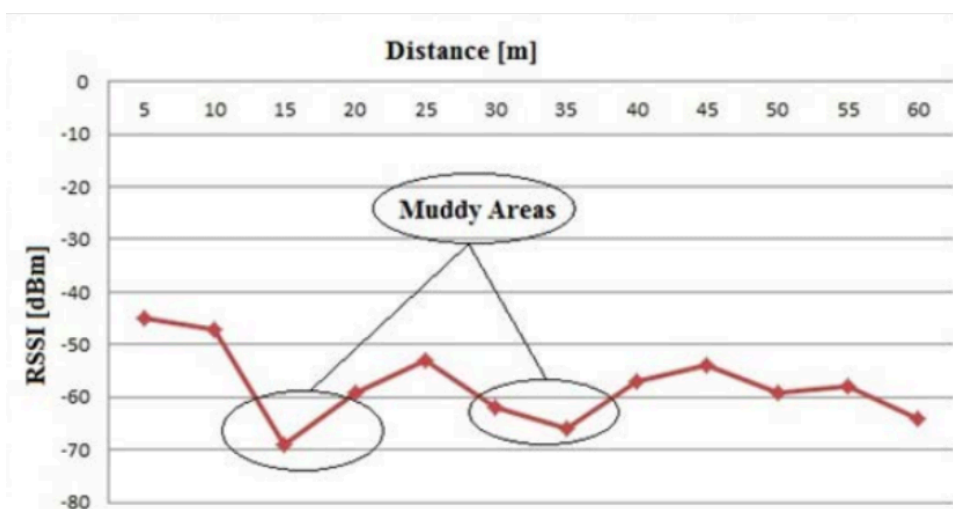
Σε μια ελεγχόμενη πειραματική διάταξη στο ορυχείο ψευδαργύρου Angas, μελετήθηκε η εξασθένηση των ραδιοκυμάτων ZigBee που λειτουργούν στα 2,4 GHz για να εκτιμηθεί η επίδραση των διαφορετικών υπόγειων περιβαλλοντικών συνθηκών στην ισχύ του σήματος. Ο συντονιστής GeoSense και δύο κόμβοι GeoSense τοποθετήθηκαν στρατηγικά σε τρίποδα σε ύψος 1,5 μέτρων για να ελαχιστοποιηθεί η ανάκλαση των ραδιοκυμάτων από το δάπεδο της σήραγγας. Οι μετρήσεις RSSI καταγράφηκαν συστηματικά μεταξύ των κόμβων ξεκινώντας από απόσταση 5 μέτρων μεταξύ τους, με τις αποστάσεις να αυξάνονται με βήματα των 5 μέτρων, και κάθε σημείο μέτρησης δοκιμάστηκε πέντε φορές για λόγους συνέπειας. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε διάφορα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων ευθύγραμμων και καμπύλων σήραγγων, καθώς και σε ξηρές και υγρές συνθήκες, για να αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο οι περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν την εξασθένηση του σήματος. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)

#### 4.2.3 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στο ορυχείο Angas

Σε πειραματικές διατάξεις εντός του ορυχείου ψευδαργύρου Angas, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις RSSI τόσο σε ευθείες όσο και σε καμπύλες διαμορφώσεις σήραγγας για την αξιολόγηση της εξασθένησης του σήματος ZigBee σε διαφορετικές αποστάσεις και περιβαλλοντικές συνθήκες. Το πείραμα στην ευθεία σήραγγα στο επίπεδο -160 έδειξε σταδιακή μείωση του RSSI από -44 dBm στο πλησιέστερο διάστημα των 5 μέτρων σε -64 dBm στα 60 μέτρα, υποδεικνύοντας σχετικά σταθερή επικοινωνία παρά τις δύο λασπωμένες περιοχές που επηρέασαν την ισχύ του σήματος σε συγκεκριμένα σημεία (σχήματα 4.10 και 4.11). (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)

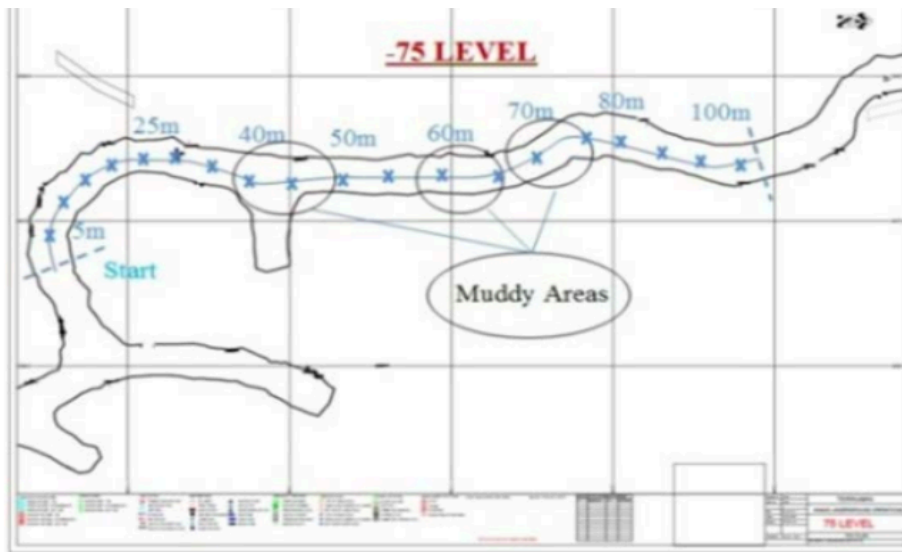


Σχήμα 4.10: Διάταξη του πειράματος σε ευθεία σήραγγα στο επίπεδο -160.

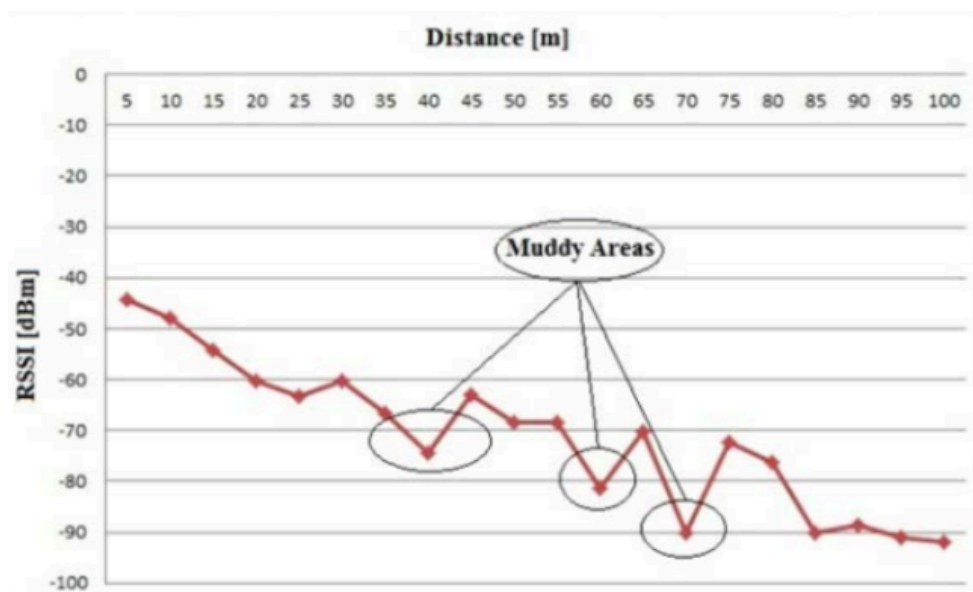


Σχήμα 4.11: Αποτελέσματα του πειράματος εξασθένησης στη σήραγγα -160.

Αντίθετα, η καμπύλη σήραγγα στο επίπεδο -75 εμφάνισε πιο έντονες διακυμάνσεις στις τιμές RSSI. Ξεκινώντας από τα -45 dBm, η ισχύς του σήματος μειώθηκε απότομα στα -63 dBm στα 25 μέτρα και παρουσίασε περαιτέρω σημαντικές μειώσεις σε διαστήματα που αντιστοιχούν σε λασπωμένες περιοχές και στην καμπυλότητα της σήραγγας, αποδεικνύοντας πως οι περιβαλλοντικές διακυμάνσεις και τα φυσικά εμπόδια σε πιο σύνθετες διατάξεις σηράγγων μπορούν να επηρεάσουν δραστικά την αποτελεσματικότητα της ασύρματης επικοινωνίας. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)



Σχήμα 4.12: Διάταξη του πειράματος σε καμπύλη σήραγγα στο επίπεδο -75.

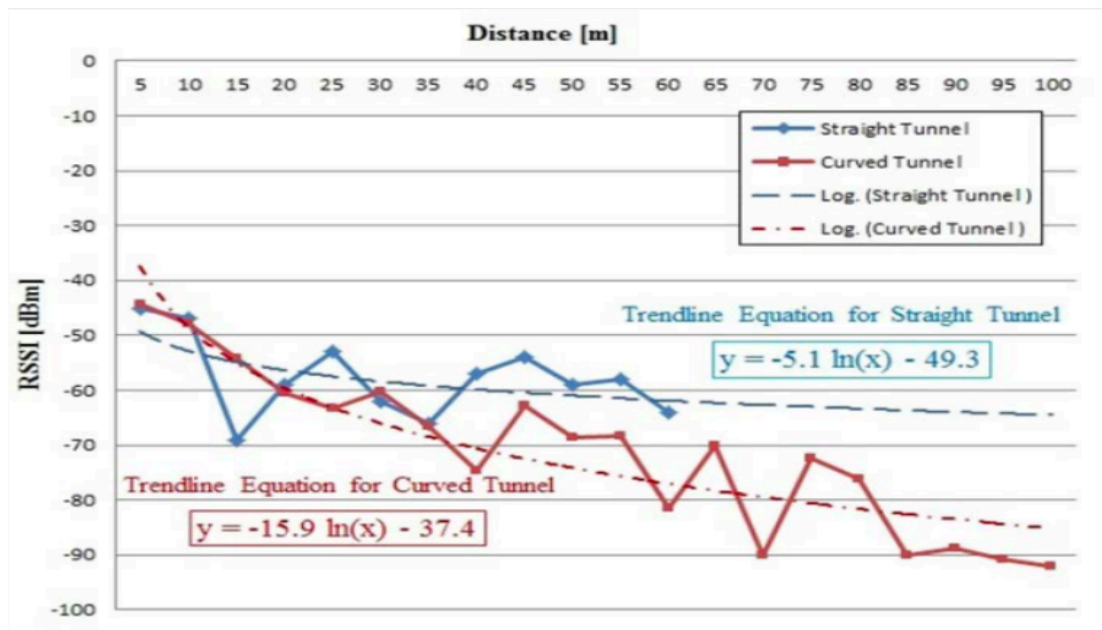


Σχήμα 4.13: Αποτελέσματα πειράματος εξασθένησης σε σήραγγα -75.



Επιπρόσθετα από τις μετρήσεις RSSI εντός του ορυχείου Angas, ανέδειξαν κρίσιμες γνώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά των ασύρματων επικοινωνιών ZigBee σε ποικίλες υπόγειες συνθήκες. Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις ευθείες και τις καμπύλες σήραγγες με βάση τις λογαριθμικές γραμμές τάσης της εξασθένησης των πειραμάτων μέσω της απόστασης. Σε αυτές τις γραμμές τάσης διαπιστώνεται μια σταδιακή μείωση των τιμών RSSI και στις δύο σήραγγες. Ωστόσο, στην καμπύλη σήραγγα οι τιμές RSSI μειώνονται πιο απότομα από ό,τι στην ευθεία σήραγγα λόγω των καμπυλοτήτων. Σύμφωνα με τις εξισώσεις των γραμμών τάσης, η εξασθένηση των ραδιοκυμάτων στην καμπύλη σήραγγα είναι 3,1 φορές μεγαλύτερη από ό,τι στην ευθεία σήραγγα. Επίσης, από τα μετρούμενα RSSI στα σημεία έναρξης των γραφικών παραστάσεων (και στα δύο επίπεδα) γίνεται αντιληπτό ότι το ισχυρότερο RSSI μεταξύ των GeoSenses είναι περίπου -45 dBm στο υπόγειο ορυχείο με συνθήκες μελέτης περίπτωσης. Κατά συνέπεια, οι αλλαγές στο βάθος δεν είχαν σοβαρή επίδραση στην εξασθένηση των ραδιοκυμάτων σε αυτά τα πειράματα.. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)

Περαιτέρω συγκριτικές μελέτες ευθυγραμμίζονται με αυτά τα ευρήματα, υποδεικνύοντας ότι ένα RSSI των -80 dBm είναι γενικά επαρκές για τη διατήρηση σταθερής επικοινωνίας έως 100 μέτρα σε ευθείες σήραγγες και 70 μέτρα σε καμπύλες σήραγγες. Αυτές οι παράμετροι χρησιμεύουν ως σημείο αναφοράς για τη διασφάλιση αποτελεσματικών και αξιόπιστων επιδόσεων ασύρματου δικτύου σε υπόγεια ορυχεία, υποστηρίζοντας την ανάγκη για λεπτομερή χαρτογράφηση και σχεδιασμό κατά την εγκατάσταση υποδομών επικοινωνίας. Η έρευνα αυτή όχι μόνο βοηθά στη βελτίωση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας των υπόγειων εργασιών, αλλά παρέχει επίσης ένα πλαίσιο για την προσαρμογή των ασύρματων τεχνολογιών στις μοναδικές προκλήσεις που θέτουν τα υπόγεια περιβάλλοντα. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)

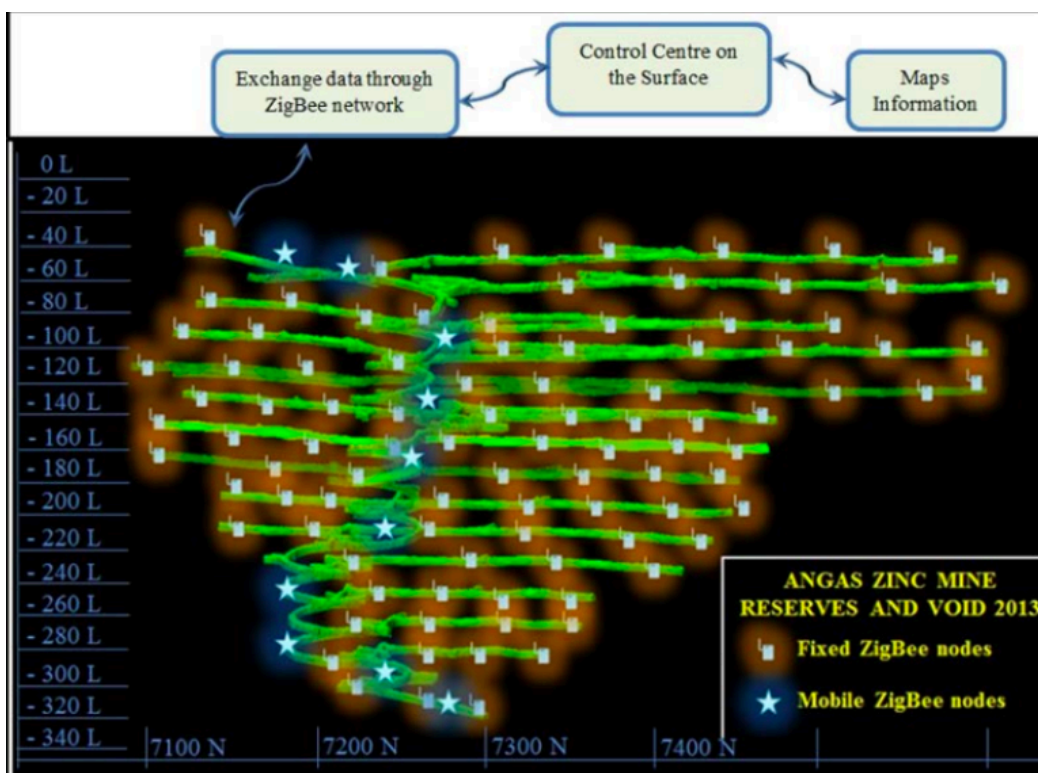


Σχήμα 4.14: Σύγκριση μεταξύ των τιμών RSSI σε ευθεία και καμπύλη σήραγγα.

Η βέλτιστη διάταξη των κόμβων ZigBee στο ορυχείο ψευδαργύρου Angas είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση σταθερής και ασφαλούς επικοινωνίας σε όλο το υπόγειο δίκτυο. Η στρατηγική ανάπτυξης βασίζεται στα ειδικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος του ορυχείου, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων εξασθένισης των ραδιοκυμάτων που συγκεντρώθηκαν από πειράματα που διεξήχθησαν τόσο σε ευθείες όσο και σε καμπύλες σήραγγες. Για να εξασφαλιστεί η ολοκληρωμένη κάλυψη, ο σχεδιασμός του δικτύου περιλαμβάνει τόσο σταθερούς όσο και κινητούς κόμβους, με συνολικά 104 σταθερούς κόμβους στρατηγικά τοποθετημένους με βάση την τρισδιάστατη χαρτογράφηση του ορυχείου και 15 κινητούς κόμβους που προορίζονται για δυναμικές εργασίες όπως η παρακολούθηση του κινητού εξοπλισμού και του προσωπικού (σχήμα 4.15). Αυτή η διάταξη όχι μόνο διευκολύνει την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε όλο το ορυχείο, αλλά και ενισχύει την ασφάλεια και την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα, επιτρέποντας την παρακολούθηση και την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)

Από οικονομική άποψη, το δίκτυο ZigBee αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα Wi-Fi, με το κόστος εγκατάστασης να υπολογίζεται σε 40.000 δολάρια Αυστραλίας - σημαντικά χαμηλότερο από τα 190.000 δολάρια Αυστραλίας που απαιτούνται για μια ανάλογη εγκατάσταση δικτύου Wi-Fi. Αυτή η αποδοτικότητα του κόστους επιτυγχάνεται χωρίς να θυσιάζεται η λειτουργικότητα ή η αξιοπιστία του δικτύου, αναδεικνύοντας το πλεονέκτημα του ZigBee όσον αφορά τόσο το

λειτουργικό κόστος όσο και την προσαρμοστικότητα στο σκληρό περιβάλλον των υπόγειων ορυχείων. Η προσεκτική τοποθέτηση των κόμβων, η οποία ενημερώνεται από λεπτομερή γεωλογικά και λειτουργικά δεδομένα, διασφαλίζει ότι το δίκτυο παραμένει ανθεκτικό απέναντι σε περιβαλλοντικές προκλήσεις όπως η υγρασία, οι διακυμάνσεις του τύπου των πετρωμάτων και οι δομικές πολυπλοκότητες. Περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης κόμβων με προηγμένους αλγορίθμους και λαμβάνοντας υπόψη πρόσθετους περιβαλλοντικούς παράγοντες θα μπορούσε να βελτιώσει περαιτέρω τη σταθερότητα και την αποτελεσματικότητα του δικτύου ZigBee σε πολύπλοκες εργασίες εξόρυξης. (Moridi, M. A., & Okawa, H. 2018)



**Σχήμα 4.15:** απεικονίζει τη διάταξη των κόμβων ZigBee στο ορυχείο ψευδαργύρου Angas και τον τρόπο σύνδεσης του υπόγειου ασύρματου δικτύου με το κέντρο ελέγχου στην επιφάνεια.

### 4.3 Τηλεμετρία

Η τηλεμετρία είναι καθοριστική στη σύγχρονη εξόρυξη για την ενίσχυση της ασφάλειας και την αύξηση της αποδοτικότητας. Επιτρέπει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο του εξοπλισμού και των περιβαλλοντικών συνθηκών, που είναι ζωτικής σημασίας για την άμεση αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων, μειώνοντας έτσι σημαντικά τους κινδύνους ατυχημάτων. Η

τηλεμετρία υποστηρίζει την αυτοματοποίηση της εξόρυξης, επιτρέποντας την εξ αποστάσεως λειτουργία των μηχανημάτων, η οποία ενισχύει την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια με τη μετακίνηση του προσωπικού σε ασφαλέστερες θέσεις. Επιπλέον, διευκολύνει την προληπτική συντήρηση, προβλέποντας τις βλάβες του εξοπλισμού προτού εμφανιστούν, ελαχιστοποιώντας τον χρόνο διακοπής λειτουργίας. Εξασφαλίζει επίσης τη συμμόρφωση με τις νομοθετικές διατάξεις, παρέχοντας ακριβή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Συνολικά, η τηλεμετρία ενδυναμώνει τις επιχειρήσεις εξόρυξης με βελτιωμένη λήψη αποφάσεων, τη βέλτιστη χρήση των πόρων και τις βελτιωμένες επιχειρησιακές στρατηγικές. (Theissen, M.; Kern, L.; Hartmann, T.; Clausen, E. 2023)

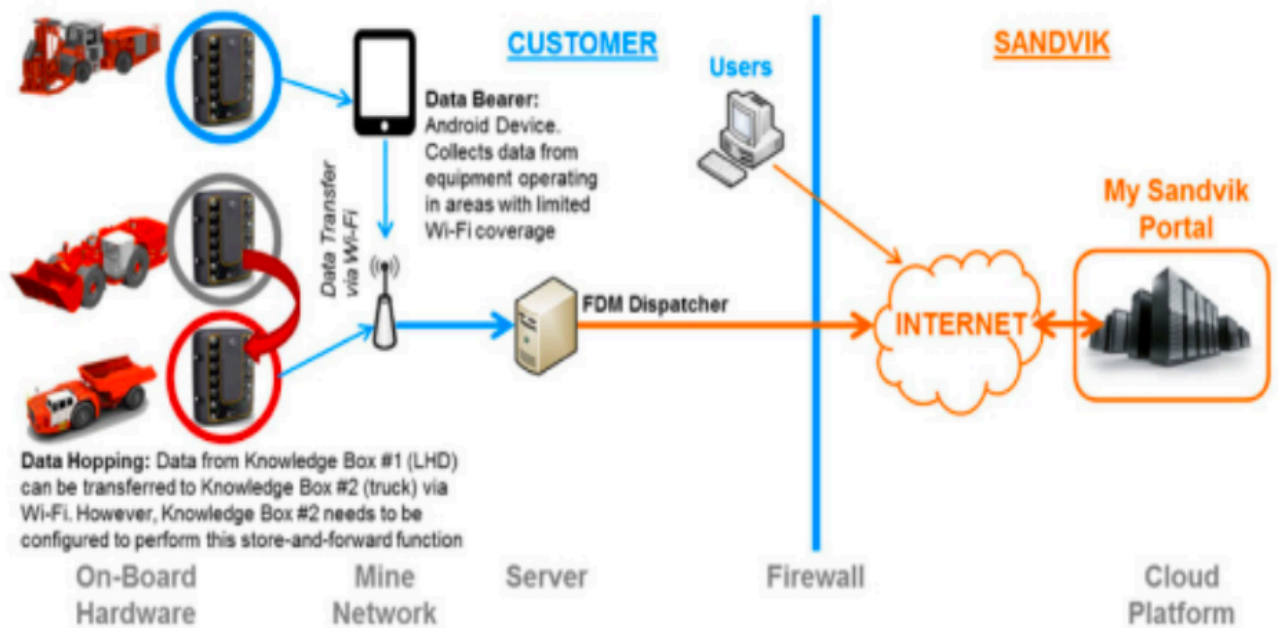
Τα συστήματα τηλεμετρίας στα υπόγεια ορυχεία αναφέρονται σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες επικοινωνίας που συλλέγουν και μεταδίδουν δεδομένα από απομακρυσμένα ή δυσπρόσιτα σημεία εντός ενός ορυχείου σε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου. Η τεχνολογία αυτή διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση διαφόρων πτυχών των υπόγειων ορυχείων. (Jabłoński, M., & Jaśkowski, W. F., 2016)

Η τηλεμετρία είναι μία από τις ταχύτερα εξελισσόμενες εφαρμογές στην ανάλυση. Η τηλεμετρία είναι η εξ αποστάσεως μέτρηση οποιασδήποτε φυσικής εισόδου και η επακόλουθη αποστολή των πληροφοριών αυτών μέσω καναλιού επικοινωνίας για μεταγενέστερη καταγραφή, έλεγχο και παρακολούθηση. Κάθε σύστημα τηλεμετρίας έχει τουλάχιστον τρία μέρη: τη φυσική είσοδο προς μέτρηση, ένα κανάλι επικοινωνίας και μια μονάδα ελέγχου. Σύμφωνα με τον ορισμό του GMG, η τηλεμετρία είναι μια αυτοματοποιημένη τεχνολογική διαδικασία για την επικοινωνία μετρήσεων και άλλων δεδομένων μεταξύ απομακρυσμένων θέσεων και εξοπλισμού λήψης. (Sandvik, R., M. 2020)

Ένα σύστημα τηλεμετρίας χρησιμοποιεί έναν μετατροπέα ή αισθητήρα ως συσκευή εισόδου, ένα ασύρματο ή σταθερό μέσο μετάδοσης, συσκευές επεξεργασίας σήματος και συσκευές αποθήκευσης ή απεικόνισης δεδομένων. Ο μετατροπέας μετατρέπει μια φυσική είσοδο, όπως η θερμοκρασία, η πίεση ή ο χρόνος, σε ένα αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα, το οποίο μεταδίδεται από μια απομακρυσμένη θέση για σκοπούς μέτρησης και καταγραφής. (Sandvik, R., M. 2020)

Για τον εξοπλισμό υπόγειας εξόρυξης, οι φυσικές εισροές που πρέπει να μετρηθούν ποικίλλουν ανάλογα με τον εξοπλισμό και τους στόχους καταγραφής και κάθε μία από αυτές τις μεταβλητές είναι μοναδική. Οι μεταβλητές που μπορεί να μετρηθούν για ένα φορτηγό

Jumbo, LHD ή ένα φορτηγό χαμηλού προφίλ, για παράδειγμα, μπορεί να περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, τις στροφές κινητήρα, τις ενδείξεις του ταχύμετρου του κινητήρα και την κατανάλωση καυσίμου. Το σύστημα καταγράφει επίσης πληροφορίες όπως οι ώρες κρούσης, η πίεση κρούσης στην περίπτωση των Jumbo ή η πίεση μετάδοσης λαδιού για τα LHD και τα φορτηγά. Η λύση της τηλεμετρίας για τη διαχείριση του υπόγειου στόλου που ανέπτυξε η Sandvik ονομάζεται My Sandvik και η αρχιτεκτονική της παρουσιάζεται στο σχήμα 4.16.



**Σχήμα 4.16:** Σύστημα παρακολούθησης μέσω cloud (My Sandvik)

Η τρέχουσα τάση για τα κανάλια επικοινωνίας είναι να υπάρχει ασύρματη κάλυψη στις περιοχές λειτουργίας, ωστόσο πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η απόσταση, οι τομείς με μικρή διαθεσιμότητα υπηρεσιών ή/και η δυσκολία πρόσβασης. Τα πλεονεκτήματα του Wi-Fi περιλαμβάνουν την ευελιξία της μη ύπαρξης καλωδίων, το χαμηλό κόστος του και τη δυνατότητα προβολής των πληροφοριών αργότερα σε ένα tablet, φορητό υπολογιστή ή άλλη κινητή συσκευή. (Sandvik, R., M. 2020)

Προς το παρόν, το Sandvik Knowledge box υποστηρίζει τα πρωτόκολλα IEEE 802.11 b/g (δηλαδή τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πρότυπα ασύρματων συσκευών για οικιακές, γραφειοκρατικές και βιομηχανικές εφαρμογές). Τα σημεία πρόσβασης Wi-Fi που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση πρέπει να υποστηρίζουν αυτά τα πρωτόκολλα. Για την παροχή ενημερωμένων δεδομένων από τον εξοπλισμό, συνιστάται ο εξοπλισμός να διαθέτει εντός της περιοχής κάλυψης Wi-Fi μία φορά ανά κύκλο (στην περίπτωση φορτωτών

ή φορτηγών) ή, τουλάχιστον, μία φορά ανά βάρδια. Για να επιτευχθεί επικοινωνία που είναι πιο κοντά στον πραγματικό χρόνο, μπορούν να εγκατασταθούν σημεία πρόσβασης Wi-Fi σε όλη την περιοχή παραγωγής, αν και αυτό δεν είναι συνήθως απαραίτητο. (Sandvik, R., M. 2020)

Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, σηματοδοτεί ένα σημαντικό μετασχηματισμό των βιομηχανιών μέσω της ενσωμάτωσης των ψηφιακών τεχνολογιών. Η επανάσταση αυτή χαρακτηρίζεται από την ανάμειξη του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου μέσω καινοτομιών όπως το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη (AI), η ρομποτική και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την ενισχυμένη συνδεσιμότητα και την αυτοματοποίηση εντός των βιομηχανιών, επιτρέποντας πιο έξυπνες και αποδοτικές λειτουργίες. Στη μεταποίηση, για παράδειγμα, η Βιομηχανία 4.0 εισάγει έξυπνα εργοστάσια όπου οι διασυνδεδεμένες μηχανές επικοινωνούν και λειτουργούν αυτόνομα. Σε τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, η ψηφιακή ολοκλήρωση διευκολύνει την προηγμένη φροντίδα των ασθενών μέσω της τηλεϊατρικής και των εξατομικευμένων θεραπειών. Συνολικά, η Βιομηχανία 4.0 όχι μόνο αυξάνει την παραγωγικότητα και τη λειτουργική αποδοτικότητα, αλλά προσφέρει επίσης πρωτοφανείς ευκαιρίες για τις βιομηχανίες να καινοτομούν και να βελτιώνουν τα επιχειρηματικά τους μοντέλα, να προσαρμόζονται στις ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς και να παρέχουν νέες και βελτιωμένες υπηρεσίες για να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες απαιτήσεις ενός ψηφιακά συνδεδεμένου κόσμου. (Sandvik, R., M. 2020)

Η τηλεμετρία στην εξόρυξη, ως μέρος του ευρύτερου τοπίου του IoT και του υπολογιστικού νέφους, λειτουργεί ως κρίσιμο στοιχείο για την απόκτηση και διαχείριση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Στο πλαίσιο των υπόγειων εξορυκτικών εργασιών, τα συστήματα τηλεμετρίας συλλέγουν δεδομένα από διάφορους αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στον εξοπλισμό εξόρυξης και στους περιβαλλοντικούς μετρητές. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται μέσω ισχυρών δικτύων επικοινωνίας, συχνά χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα IoT, για να διασφαλιστεί η συνεχής ενημέρωση πληροφοριών όπως η υγεία του εξοπλισμού, η λειτουργική απόδοση και η περιβαλλοντική ασφάλεια. Αυτό το δίκτυο αισθητήρων και συσκευών που συνδέονται μεταξύ τους μέσω του IoT επιτρέπει την απρόσκοπτη ροή δεδομένων σε κεντρικές πλατφόρμες cloud, όπου μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία, ανάλυση και αποθήκευση. (Sandvik, R., M. 2020)

Η ενσωμάτωση με το cloud μετατρέπει αυτά τα δεδομένα σε αξιοποιήσιμες πληροφορίες, οι οποίες είναι προσβάσιμες από οπουδήποτε, διευκολύνοντας την εξ αποστάσεως παρακολούθηση και διαχείριση των εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει την προληπτική συντήρηση, η οποία εντοπίζει προληπτικά πιθανές βλάβες του εξοπλισμού πριν αυτές εμφανιστούν, βελτιστοποιώντας τον λειτουργικό χρόνο λειτουργίας και μειώνοντας το κόστος. Επιπλέον, οι πλατφόρμες νέφους επιτρέπουν την ενσωμάτωση των δεδομένων τηλεμετρίας με άλλα επιχειρησιακά συστήματα, ενισχύοντας τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων και την επιχειρησιακή αποδοτικότητα. Η χρήση του υπολογιστικού νέφους εξασφαλίζει επεκτασιμότητα και ευελιξία, επιτρέποντας στις επιχειρήσεις εξόρυξης να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και να ενσωματώνουν νέες τεχνολογίες χωρίς σημαντική αναμόρφωση της υποδομής. Αυτή η συνέργεια μεταξύ τηλεμετρίας, IoT και υπολογιστικού νέφους προωθεί τον ψηφιακό μετασχηματισμό της εξορυκτικής βιομηχανίας, οδηγώντας σε πιο αποτελεσματικές, ασφαλείς και βιώσιμες λειτουργίες. (Sandvik, R., M. 2020)

#### 4.3.1 Ορυχείο χρυσού Casa Berardi

Το ορυχείο χρυσού Casa Berardi της Hecla Mining στο Κεμπέκ μελέτησε μια περίπτωση για να βρει πληροφορίες για την ενίσχυση της συντήρησης του εξοπλισμού, την αύξηση της ασφάλειας και τη βελτίωση της λειτουργικής παραγωγικότητας. Με την εγκατάσταση συστημάτων τηλεμετρίας σε 24 οχήματα, συμπεριλαμβανομένων των φορτηγών και των μονάδων φόρτωσης-μεταφοράς-ανάσυρσης (LHD), το ορυχείο μπόρεσε να παρακολουθεί την απόδοση του εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο που απαιτείται για τη διάγνωση και την αντιμετώπιση μηχανικών προβλημάτων. Η τεχνολογία αυτή επέτρεψε στους μηχανικούς να εντοπίζουν γρήγορα τα προβλήματα όταν τα μηχανήματα μεταφέρονταν για συντήρηση και παρείχε συνεχή παρακολούθηση για την πρόληψη πιθανών βλαβών πριν εξελιχθούν σε σοβαρά προβλήματα. Αυτή η προληπτική προσέγγιση της συντήρησης όχι μόνο εξασφάλιζε ότι τα φρένα και τα κιβώτια ταχυτήτων των μηχανημάτων λειτουργούσαν σωστά, ενισχύοντας έτσι την ασφάλεια των χειριστών, αλλά βελτιστοποιούσε επίσης τη συνολική διαδικασία συντήρησης, επιτρέποντας την άμεση αντιμετώπιση προβλημάτων και επισκευών. (Sandvik, R., M. 2020)



*Σχήμα 4.17:* Ορυχείο χρυσού Casa Berardi στο Κεμπέκ του Καναδά.

Το αποτέλεσμα στο Casa Berardi ήταν σημαντικό, οδηγώντας σε απτές βελτιώσεις στην παραγωγικότητα και την αποδοτικότητα του ορυχείου. Η καθημερινή διεξαγωγή των δοκιμών φρεναρίσματος και η παρακολούθηση των υπερβολικών ταχυτήτων μετάδοσης βοήθησαν στη μείωση της φθοράς του εξοπλισμού και στην ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, το ορυχείο σημείωσε μείωση κατά 10% των περιστατικών υπέρβασης ταχύτητας μετάδοσης και μείωση κατά 50% των καταχρήσεων μετάδοσης, συμβάλλοντας σε συνολική μείωση του κόστους συντήρησης κατά 7,8% ανά μεταφερόμενο τόνο. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα των μονάδων LHD αυξήθηκε κατά 8% και το ορυχείο υπερέβη τους στόχους παραγωγής του κατά 4%, το ήμισυ του οποίου αποδόθηκε άμεσα στα οφέλη της τηλεμετρίας. Αυτές οι βελτιώσεις όχι μόνο ενίσχυσαν την τελική γραμμή του ορυχείου, αλλά υποστήριξαν επίσης ένα ασφαλέστερο και αποτελεσματικότερο περιβάλλον εργασίας. (Sandvik, R., M. 2020)



## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα από την πτυχιακή εργασία για την επικοινωνία και δικτύωση στα υπόγεια μεταλλευτικά έργα αποκαλύπτουν την κρισιμότητα της ενσωμάτωσης καινοτόμων τεχνολογικών λύσεων για τη βελτίωση των επιδόσεων ασφαλείας και αποδοτικότητας σε αυτούς τους δύσκολους εργασιακούς χώρους. Η μελέτη επισημαίνει την άμεση σύνδεση μεταξύ τεχνολογικής προόδου και ασφάλειας εργασιακού περιβάλλοντος, καθώς και την ανάγκη για εξέλιξη των υπαρχόντων συστημάτων.

Πρώτον, η έρευνα καταδεικνύει ότι η εισαγωγή αυτοματοποιημένων και ρομποτικών τεχνολογιών μπορεί να μειώσει σημαντικά τον κίνδυνο ατυχημάτων και να αυξήσει την αποδοτικότητα των εργασιών. Τα αυτόνομα οχήματα και τα συστήματα ελέγχου από απόσταση παρέχουν επιπλέον επίπεδα ασφαλείας, μειώνοντας την ανάγκη για ανθρώπινη παρουσία σε ιδιαίτερα επικίνδυνες συνθήκες. Αυτή η εξέλιξη συμβάλλει επίσης στην επίτευξη μεγαλύτερης παραγωγικότητας και μειωμένου κόστους λειτουργίας.

Δεύτερον, η τηλεμετρία και τα δίκτυα υψηλών ταχυτήτων παίζουν κεντρικό ρόλο στην ενίσχυση των επικοινωνιών στον υπόγειο χώρο. Η χρήση προηγμένων τεχνολογιών στη μέτρηση και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο βοηθά στην άμεση ανίχνευση προβλημάτων και στην ταχεία ανταπόκριση σε πιθανές δυσλειτουργίες ή απειλές, βελτιώνοντας την ασφάλεια και την αποδοτικότητα.

Τέλος, η συνεχής ανάγκη για ερευνητική ανάπτυξη υπογραμμίζεται έντονα, καθώς οι συνεχείς τεχνολογικές καινοτομίες απαιτούν την ανάπτυξη και την εφαρμογή νέων τεχνολογικών λύσεων και μεθοδολογιών. Η ενσωμάτωση νέων συστημάτων πρέπει να συνοδεύεται από συνεχή εκπαίδευση και ενημέρωση του προσωπικού, ενώ η διασφάλιση της ασφαλούς και αποδοτικής εφαρμογής τους απαιτεί συνεχή υποστήριξη και διαχείριση.

## Βιβλιογραφία

- Akyildiz, I. F., & Vuran, M. C. (2019). *Signal propagation techniques for wireless underground communication networks*. *Physical Communication*, 2(3), 167-183.
- Bandyopadhyay, L. K., & Mishra, P. K. (2019). *Wireless communication in underground mines*. *RFID-Based Sens. Netw*, 22.
- Berg, E. & Boudet O. (2023) *Mesh networking in underground mine environments, Exploring security requirements in relation to the performance of mesh networks*.
- Brady., B.H.G., & Brown, E. T. (2004) *Rock Mechanics for underground mining*
- Forooshani, A. E., & Noghianian, S. (2021). *A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines*. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 15(4), 1524-1545.
- Ghaddar, M., & Talbi, L. (2016). *Multiple-input multiple-output beam-space for high-speed wireless communication in underground mine*. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 10(1), 8-15.
- Gillis. A. S., Nolle. T., (2021) *Mesh network topology*  
<https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/mesh-network-topology-mesh-network>
- Kawamura Y. & Moridi, M. A & Sharifzadeh M (2014) *Underground Mine Communication and Monitoring Systems by Using ZigBee Technology*. Conference: ISRM International Symposium and 8th Asian Rock Mechanics Symposium
- Jabłoński, M., & Jaśkowski, W. F., (2016) *The usage of telemetry measurements methods to determine shaft tube deformations caused by natural and anthropogenic rock mass movements* vol. 42(1) 79-80
- Krommenacker, N., & Soto, I. (2016). *A self-adaptive cell-ID positioning system based on visible light communications in underground mines*. In 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA) (pp. 1-7). IEEE.
- Kunsei, H., & Abbosh, A. M. (2018). *Improved communications in underground mines using reconfigurable antennas*. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(12), 7505-7510.

- Moridi, M. A., & Jang, H. D. (2018). *Development of wireless sensor networks for underground communication and monitoring systems (the cases of underground mine environments)*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73, 127-138.
- Moridi, M. A., & Okawa, H. (2018). *Performance analysis of ZigBee network topologies for underground space monitoring and communication systems*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 201-209.
- Palacios Játiva, P., & Soto, I. (2020). *Interference mitigation for visible light communications in underground mines using angle diversity receivers*. *Sensors*, 20(2), 367.
- Pattnaik, S. K., & Poulkov, V. (2022). *Future wireless communication technology towards 6g IoT: an application-based analysis of IoT in real-time location monitoring of employees inside underground mines by using BLE*. *Sensors*, 22(9), 3438.
- Patri, A., & Jayanthu, S. (2019). *Wireless communication systems for underground mines—a critical appraisal*. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4(7), 3149-3153.
- Ranjan, A., & Misra, P. (2020). *Modeling and measurements for wireless communication networks in underground mine environments*. *Measurement*, 149, 106980.
- Ratan R. T. (2013) *Surface and underground excavations*, 2nd Edition: Methods, Techniques and equipment p. 181-183
- Sandvik, R., M. (2020) *Telemetry: connectivity and productivity in real time - project implementation guide*, in MassMin2020, Santiago, Chile, 2020, pp. 1359-1364.
- Sadeghi, S., & Nasirzadeh, F. (2022). *Applications of wireless sensor networks to improve occupational safety and health in underground mines*. *Journal of safety research*.
- Seguel, F., & Soto, I. (2021). *Underground mine positioning: A review*. *IEEE Sensors Journal*, 22(6), 4755-4771.
- Serhan Y, Sabih G, Huseyin A, and R R. Murphy. *Underground Mine Communications: A Survey*. *IEEE communications surveys & tutorials*, VOL. 11, 125-142
- Singh, A., & Kumar, D. (2018). *IoT in mining for sensing, monitoring and prediction of underground mines roof support*. In 2018 4th International Conference on Recent Advances

in Information Technology (RAIT) (pp. 1-5). IEEE.

Stoicuta, O., & Ionica, A. (2023). *Application of optical communication for an enhanced health and safety system in underground mine*. *Sensors*, 23(2), 692.

Theissen, M.; Kern, L.; Hartmann, T.; Clausen, E. (2023) *Use-Case-Oriented Evaluation of Wireless Communication Technologies for Advanced Underground Mining Operations*. *Sensors* 2023, 23, 3537

Tomar A. (2011) *Introduction to Zigbee Technology*. Global Technology Centre, Vol 1.

<https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/DI367/%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C/introduction-to-zigbee-technology.pdf>

Wang, J., Zhou, L. (2018). *A general channel model for visible light communications in underground mines*. *China Communications*, 15(9), 95-105.

[https://www.globalspec.com/learnmore/specialized\\_industrial\\_products/mining\\_equipment/longwall\\_shearers](https://www.globalspec.com/learnmore/specialized_industrial_products/mining_equipment/longwall_shearers)

[https://www.globalspec.com/learnmore/specialized\\_industrial\\_products/mining\\_equipment/continuous\\_miners](https://www.globalspec.com/learnmore/specialized_industrial_products/mining_equipment/continuous_miners)

<https://reunkosteel.co.za/mining-roof-bolt-basics/>

<https://www.undergroundminingmachines.co.za/roof-bolters/>

<https://gr.rcdrillmachine.com/underground-jumbo-drilling-rig/jumbo-drill-machine.html>

<https://www.machinesl.com/what-is-shotcrete-machine/>

<https://gr.relystone.com/mine-car/fixed-tramcar/coal-mine-shuttle-car.html>

<https://www.komatsu.com/en-gb/products/room-and-pillar/>

[http://www.coaleducation.org/technology/Underground/Rock\\_Dusters.htm](http://www.coaleducation.org/technology/Underground/Rock_Dusters.htm)

<https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2017-101.pdf> page 3

[https://en.wikipedia.org/wiki/Drifter\\_drill](https://en.wikipedia.org/wiki/Drifter_drill)

<https://reunkosteel.co.za/mining-roof-bolt-basics/>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Underground\\_mine\\_ventilation](https://en.wikipedia.org/wiki/Underground_mine_ventilation)