

**Cave Communications**  
**Δίκτυα Νέας Γενιάς & Επικοινωνίες**  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών  
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

Μάρκος Δελαπόρτας  
E-mail: ece01316@uowm.gr

Ιανουάριος 2024

**Abstract** – Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας αισθητήρων έχουν γίνει πανταχού παρόντα, τόσο στην καθημερινή ζωή, όσο και σε πολλές βιομηχανίες. Ωστόσο η αποτελεσματικότητά τους μπορεί να παρεμποδιστεί σε ορισμένα περιβάλλοντα όπως για παράδειγμα στην εξερεύνηση σπηλαίων, στην διάσωση ανθρώπων από κατεστραμμένα κτήρια ή στον τομέα της γεωργίας ακριβείας όπου τα σπαρτά βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Με άλλα λόγια υπάρχει ανάγκη για ασύρματη επικοινωνία σε υπόγειο περιβάλλον. Στο παρόν άρθρο εξετάζονται διάφορες τεχνικές ασύρματης επικοινωνίας, οι περιορισμοί και οι στερήσεις που έχουν γίνει προκειμένου να μοντελοποιηθεί σε περιβάλλον σπηλαίων από διάφορες τεχνολογίες που έχουν προταθεί. Καθώς επίσης και πως με αλλαγές στην ισχύ και την συχνότητα μπορεί να μειωθεί η απώλεια μονοπατιού και η ισχύς του σήματος λήψης.

## Περιεχόμενα

<b>I Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
I.I Το πρόβλημα . . . . .	2
<b>II Σχετικές Έρευνες</b>	<b>2</b>
<b>III Συμπεράσματα</b>	<b>15</b>
<b>IV Συζήτηση</b>	<b>15</b>
IV.I . . . . .	15
IV.II . . . . .	15

## I Εισαγωγή

Από την εμφάνιση των πρώτων κινητών επικοινωνιών, πολλοί εξερευνητές, όπως και πολλοί διασώστες επιχειρούν να τις χρησιμοποιούν προς όφελός τους· πράγμα το οποίο αποδεικνύεται δύσκολο λόγω της πρόκλησης που παρουσιάζεται κατά την διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε υπόγεια περιβάλλοντα και γενικότερα σε περιβάλλοντα με περίπλοκη μορφολογία. Αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι ενώ δεν υπάρχει πολλή βιβλιογραφία για συνήθεις σπήλαια και ερείπια, έχει γίνει αρκετή έρευνα για ορυχεία άνθρακα, παρότι έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Η τρέχουσα γενιά ασύρματων δικτύων, όπως το 4G και το 5G, έχουν κατασκευαστεί βασισμένα σε αρχές υψηλού εύρους ζώνης, χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής διαθεσιμότητας για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις μεγάλου αριθμού πελατών. Αυτά τα δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίξουν μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας, επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, οι στόχοι των υπόγειων ασύρματων δικτύων επικοινωνίας είναι διαφορετικοί από εκείνους των υπάρχοντων ασύρματων δικτύων. Λόγω του μικρού αριθμού πελατών (κινητών τερματικών), του μικρού εύρους ζώνης και της υψηλής ανοχής καθυστέρησης, αυτά τα δίκτυα θα

πρέπει να σχεδιάζονται με διαφορετικές αρχές. Σε υπόγεια περιβάλλοντα, τα ασύρματα δίκτυα πρέπει να είναι αξιόπιστα, αποτελεσματικά και ανεκτικά σε υψηλή εξασθένηση και απώλεια σήματος. Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια μελέτη σκοπιμότητας για τη χρήση υπόγειων ασύρματων δικτύων επικοινωνίας σε περιβάλλοντα σπηλαίων. Η μελέτη περιλαμβάνει την ανάλυση των υπαρχόντων τεχνολογιών που έχουν προταθεί και υλοποιηθεί, τα χαρακτηριστικά διάδοσης του σήματος σε υπόγεια περιβάλλοντα καθώς και το σχεδιασμό πρωτοκόλλων επικοινωνίας για την επίτευξη αξιόπιστης και αποτελεσματικής επικοινωνίας.

## I.I Το πρόβλημα

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στις υπόγειες επικοινωνίες έγκειται στο υψηλό pathloss λόγω της πυκνότητας του μέσου διάδοσης. Με άλλα λόγια το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας που έχει λάβει τόπο στις ασύρματες επικοινωνίες λαμβάνει ως μέσο διάδοσης τον κενό χώρο (δηλ. τον αέρα), αυτό διότι υπάρχει προβλεψιμότητα στην μοντελοποίηση και επειδή επιτρέπει διάδοση σε υψηλότερες συχνότητες μεγαλύτερο εύρος ζώνης και άλλα.

Όταν ωστόσο όταν το αντικείμενο της μελέτης διαφέρει από την μεγιστοποίηση της διαδιδόμενης πληροφορίας αλλά εγγυάται στην αξιοπιστία και στην μεγιστοποίηση της θωράκισης σε μέσα με υψηλή απώλεια σήματος, προκύπτει ανάγκη για έρευνα σημάτων σε διαφορετικές συχνότητες και κωδικοποιήσεις.

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η ασύρματη κάλυψη σε περιβάλλον σπηλαίου, συντρίμμια, φυσικές καταστροφές και επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον ή/και με προσωπικό διάσωσης.

Η προτεινόμενη λύση με κινητούς αναμεταδότες που προτείνεται είναι πολύ χρήσιμη για επιχειρήσεις διάσωσης σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών ή/και επικοινωνίας σε υπόγειο βάθος.

## II Σχετικές Έρευνες

Στην βιβλιογραφία έχουν συνταχθεί αρκετές εργασίες σχετικά με την ασύρματη επικοινωνία σε σπήλαια και υπόγεια περιβάλλοντα. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι δεδομένου του εύρους όλων των σεναρίων/περιπτώσεων που ενέχει η έρευνα υπόγειων επικοινωνιών στην βιβλιογραφία μπορεί να βρεθεί μια πληθώρα από μοντέλα που διαφέρουν σχετικά με τα προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν. Με άλλα λόγια ενώ παρατίθενται διάφορες έρευνες για το συγκεκριμένο ζήτημα κρίνεται απαραίτητο να ομαδοποιηθούν με βάση ορισμένες παραμέτρους ως προς το πρόβλημα και τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος.

Στην έρευνα των Guozheng Zhao, Kaiqiang Lin, Tong Hao [1] χρησιμοποιήθηκαν τερματικά που ξεκινούν να δέχονται κατερχόμενη σύνδεση αμέσως μετά από μετάδοση και για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα σε ένα LoRa-WAN δίκτυο.

Και ανάλογα με τις φυσικές παραμέτρους της τοπολογίας (π.χ. αποστάσεις μεταξύ τερματικών, αποστάσεις μεταξύ κόμβων και τερματικών, κ.α.) επιλέγονται οι σταθερές εξασθένησης που συγκεκριμένα εξαρτώνται από την διηλεκτρική σταθερά του εδάφους.

Αντίστοιχα στην έρευνα για την διάδοση UHF σε υπόγεια σπήλαια [2] προτάθηκε μια πειραματική μελέτη κατά την οποία η τηλεμετρία εκμεταλλεύεται την φυσική μορφολογία του υπόγειου περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα οι ερευνητές χρησιμοποίησαν κινητούς πομποδέκτες και κεραίες για να εκτελέσουν τα πειράματά τους, σε συχνότητες 446 και 860 MHz. Σε πέντε τοποθεσίες αναζήτησαν το μέγιστο επίπεδο σήματος σε όλο το προφίλ της γκαλερί σε κάθε σημείο μέτρησης.

Οι συγγραφείς έβγαλαν ένα εμπειρικό γραμμικό μοντέλο απώλειας διαδρομής ως συνάρτηση της απόστασης και το συνέκριναν με ένα θεωρητικό μοντέλο κυματοδηγού που βασίζεται στις γεωμετρικές και ηλεκτρικές παραμέτρους του περιβάλλοντος. Βρήκαν ότι το μοντέλο κυματοδηγού ήταν κατάλληλο μόνο για κανονικές στοές και όχι για ακανόνιστα προφίλ που εμφανίζονται συχνά σε σπηλιές.

Στην έρευνα για διερεύνηση τραχιών επιφανειών για διάδοση μοντελοποίηση σε σπηλιές [3] επιδιώκει την παροχή ασύρματων επικοινωνιών σε σπήλαια για διάφορες δραστηριότητες, ενίσχυση της ασφάλειας σε σπηλιές για τουριστικό σκοπό και βοήθεια σε επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης. Με άλλα λόγια είναι ένα θεμέλιο για περαιτέρω έρευνα σε πραγματικά περιβάλλοντα σπηλαίων. Ωστόσο ο περιορισμός κατά την παρούσα ανάλυση είναι ότι ο συντελεστής εξασθένησης υπολογίζει εσφαλμένα την απώλεια σκέδασης για ορισμένες μετρήσεις και έτσι χρειάζεται να εισαχθεί ο μέσος συντελεστής ανάκλασης εισάγεται για να ληφθούν υπόψη οι τραχιές επιφάνειες.

Ο βασικός σκοπός του In-Cave Wireless Sensor Networks (ICWCS) είναι να παρέχει ένα αξιόπιστο κανάλι φωνητικής επικοινωνίας μέσω ενός δικτύου πολυμέσων μεταξύ των μελών μιας ομάδας σε μια σπηλιά. Αποτελείται από δύο διαφορετικούς τύπους κόμβων.

- «κόμβους κορμού» που είναι τοποθετημένο στα τοιχώματα του σπηλαίου.
- «Κινητοί κόμβοι», οι οποίοι έχουν παρόμοια λειτουργικότητα όπως τα κινητά τηλέφωνα, φέρονται από τα μέλη της ομάδας.

Οι κόμβοι κορμού είναι ακίνητοι κόμβοι και ο σχεδιασμός τους βασίζεται στον ασύρματο αισθητήρα γενικής χρή-

σης «VF1A» [4]. Αυτοί οι κόμβοι είναι υπεύθυνοι για διατήρηση της συνδεσιμότητας κορμού μέσα στο σπήλαιο, τις δραστηριότητες εγγραφής και περιαγωγής κινητών κόμβων, δρομολόγηση πληροφοριών κλήσεων μεταξύ κινητών κόμβων και μεταφορά των δεδομένων ελέγχου και φωνής μέσω του ασύρματου δικτύου.

Άλλες πρακτικές εφαρμογές είναι η δημιουργία αξιόπιστου δικτύου φωνητικής επικοινωνίας σε προκλητικά περιβάλλοντα ραδιοσυχνοτήτων όπως στην έρευνα των A. Gokhan Yavuz, Z. Cihan Taysi και Esra Celik [5]. Επιπλέον, σχεδιάστηκαν ασύρματοι κόμβοι κορμού και κινητά τερματικά πολυμέσων (π.χ κείμενο, εικόνας) αφιερώνοντας παραπάνω χρόνο σε αμφίδρομες φωνητικές επικοινωνίες με περαιτέρω δυνατότητες (multicast & broadcast).

Οι πρακτικές εφαρμογές της ανάλυσης πλήρους κύματος RF της εξασθένησης σήματος σε σπήλαιο με απώλειες χρησιμοποιώντας μέθοδο διακριτών στοιχείων υψηλής τάξης διανυσματικού τομέα χρόνου [6] είναι η ενίσχυση της ασύρματης επικοινωνίας σε σπηλιές και σήραγγες και μειώνει τους κινδύνους για το στρατιωτικό και το προσωπικό διάσωσης σε τέτοια περιβάλλοντα.

Ακόμη φάνηκε στην έρευνα για ακανόνιστο μοντέλο [7] ότι ελάχιστα είναι γνωστά για τους σταλαγμίτες και τους σταλακτίτες και τις επιπτώσεις τους στη συσσώρευση νερού στα σπήλαια.

Αντίστοιχα στην έρευνα για την διάδοση των UHF [2] παρατηρήθηκαν διαφορετικές απώλειες σήματος σε καθένα από τα πέντε διαφορετικά μέρη σύμφωνα με το κάθε προφίλ. Πιο συγκεκριμένα στην πρώτη τοποθεσία ενός συστήματος ημικυκλικών στοών σε ξηρό ψαμμίτη (sandstone) με λεία τοιχώματα ο ειδικός ρυθμός εξασθένησης ήταν 0,15 dB/m στα 446 MHz και 0,18 dB/m στα 860 MHz. Στην δεύτερη και τρίτη τοποθεσία με ορθογώνιες στοές από ασβεστόλιθο (limestone) με πιο τραχείς τοίχους και πήλινο δάπεδο, η δεύτερη τοποθεσία ήταν ξηρή, ενώ η τρίτη τοποθεσία ήταν υγρή με μικρές λίμνες νερού, ο ειδικός ρυθμός εξασθένησης κυμαινόταν από 0,14 έως 0,22 dB/m στα 446 MHz και από 0,17 έως 0,28 dB/m στα 860 MHz. Στην τέταρτη τοποθεσία μιας στενής στοάς με νερό καλυμμένο δάπεδο και υγρούς τοίχους λήφθηκε ο ειδικός ρυθμός εξασθένησης 0,16 dB/m στα 446 MHz και 0,19 dB/m στα 860 MHz. Τέλος στην πέμπτη τοποθεσία μια πολύ ακανόνιστη στοά με δάπεδο καλυμμένο με νερό και υγρούς τοίχους ο ειδικός ρυθμός εξασθένησης ήταν 0,25 dB/m στα 446 MHz και 0,29 dB/m στα 860 MHz.

Πολλοί ερευνητές έχουν στραφεί σε κατευθυνόμενες μορφές τηλεμετρίας. Πιο συγκεκριμένα στην διπλωματική έρευνα για κυψελωτά δίκτυα πέμπτης γενιάς του Philip Branch [8] παρουσιάζεται μια επισκόπηση της χρήσης των δικτύων αυτών σε ορυχεία εξόρυξης βαρύτητας (Block Cave Mining), ακόμη παρατίθενται οι περιορισμοί του 802.11 για

την κάλυψη αναγκών στο εν λόγω περιβάλλον ενώ υπογραμμίζει τον επανασχεδιασμό ενός δικτύου ραδιοπρόσβασης 5G για τις απαιτήσεις.

Μια από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν σχεδόν σε κάθε έρευνα που παρουσιάζεται στην εργασία είναι η λαμβανόμενη ισχύς σήματος (RSSI). Πιο συγκεκριμένα στην έρευνα για το δίκτυο των πραγμάτων σε ορυχεία [9] η RSSI χρησιμοποιείται ως μέτρηση για την εκτίμηση της απόστασης μεταξύ ενός drone και ενός επίγειου σταθμού σε ένα σύστημα UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Αυτό επιτυγχάνεται με τριγωνικό εντοπισμό ενώ προτείνονται και μοντέλα παλινδρόμησης (regression) και νευρωνικά δίκτυα.

Αρκετά ενδιαφέρουσα ήταν και η έρευνα του Donald G. Dudley για ασύρματη διάδοση σε κυκλικά τούνελ [10] κατά την οποία χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικές και μαγνητικές πηγές έντασης προκειμένου να διεγερθούν τα πεδία και να παραμετροποιηθούν ανάλογα · συχνότητα, πλάτος, πόλωση. Η μελέτη στοχεύει στην κατανόηση της διάδοσης, της σκέδασης και της απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε διαφορετικά περιβάλλοντα, τα οποία μπορεί να έχουν επιπτώσεις σε πεδία όπως η ασύρματη επικοινωνία, τα συστήματα ραντάρ και η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Πιο συγκεκριμένα τα TE & TM διεγείρονται ξεχωριστά ενώ λαμβάνονται υπόψη οι: συχνότητα, ακτίνα, αγωγιμότητα.

Τα ηλ/κά κύματα προφανώς ανακλώνται στις επιφάνειες των τοιχωμάτων ενός σπηλαίου και είναι σημαντικό να μετρηθεί η διάδοση όταν στο μονοπάτι υπάρχουν τραχείς επιφάνειες. Έτσι στην έρευνα [3] χρησιμοποιήθηκε μια τεχνική ανίχνευσης ακτίνων και εξέτασαν την ανάκλαση με τρεις τεχνικές:

- Συμβατικός συντελεστής ανάκλασης Fresnel
- Τροποποιημένος συντελεστής ανάκλασης Fresnel με συντελεστή εξασθένησης
- Προσομοίωση τυχαίας τραχιάς επιφάνειας
- Ανάλυση ισχύος σήματος έναντι θέσεων δέκτη

Στην έρευνα για ασύρματο σύστημα επικοινωνίας [5] η μέθοδος που προτείνεται είναι βασισμένη σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πολυμέσων (WMSN). Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν κινητοί κόμβοι με παρόμοια λειτουργικότητα όπως τα κινητά τηλέφωνα, που μεταφέρονται από μέλη της ομάδας, ένας διακομιστής καταλόγου ICWCS που αποθηκεύει πληροφορίες για την πραγματοποίηση επικοινωνίας και παρακολουθήσεως σε πραγματικό χρόνο. Ακόμη στο δίκτυο υπάρχει μηχανισμός προσωρινής αποθήκευσης για να Επιταχύνει την πραγματοποίηση μελλοντικών κλήσεων σε προσωρινά αποθηκευμένους κινητούς κόμβους.

Πιο πειραματικά σε ένα σπήλαιο που μετατράπηκε σε κελάρι [11] έγιναν πειράματα μέτρησης πεδίου σε συχνότητες 900 MHz, 2.4 GHz και 5.8 GHz. Καθώς τα 900MHz είναι



η μικρότερη από της τρεις συχνότητες, και άρα λιγότερο ευάλωτη σε απώλειες διαδρομής έγινε η σύγκριση συν- και σταυροπολώσεων (π.χ. VV & VH) για 900 MHz.

Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στην [6] είναι οι εξής: υψηλής τάξης διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, προσομοίωση πεδίου χρόνου, άλμα-βατραχου και κατά συνέπεια αλγόριθμοι FFT για μετατροπή στο πεδίο της συχνότητας.

Προκειμένου να επιτευχθεί η μέτρηση μοντέλου ανώμαλου εδάφους για πιθανές εφαρμογές σε σπήλαια, πραγματοποιήθηκε μέτρηση πεδίου στο μοντέλο ανώμαλου εδάφους στα 2,4 GHz έγινε σύγκριση του μετρούμενου αποτελέσματος με δύο αποτελέσματα ανίχνευσης ακτίνων καθώς επίσης και ενσωμάτωση παράγοντα σκέδασης στην προσομοίωση ιχνηλάτησης ακτίνων για βελτιωμένη εφαρμογή

Από την έρευνα για την σκοπιμότητα των LoRaWAN σε υπόγεια περιβάλλοντα [1] οι συντάκτες παραθέτουν τα αποτελέσματα τις προσομοίωσης και τις διαφορές που έχουν στο σύστημα οι μεταβλητές περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται ότι το LoRaWAN είναι πιο συμπαγές σε σχέση με άλλα υπόγεια ασύρματα συστήματα αισθητήρων (WUSNs). Πιο συγκεκριμένα φάνηκε ότι παρά ενδεχόμενες κακές συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. Volumetric Water Content = 50%) το σύστημα λειτουργούσε αξιόπιστα.

Στην έρευνα για τα UHF [2] οι συγγραφείς παρουσίασαν βασικές οδηγίες για την εκτίμηση της ειδικής εξασθένησης και της μέγιστης εμβέλειας για ασύρματες επικοινωνίες σε υπόγειες γκαλερί διαφόρων προφίλ και τύπων τοίχων. Πρότειναν επίσης ότι τα αποτελέσματά τους θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως πειραματική βάση για περαιτέρω θεωρητικές εργασίες.

Στα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς [8] φαίνεται η υπεροχή των 5G σε σύγκριση με το wifi αλλά και πως μπορεί να συμπληρώσει την παραδοσιακή VHF ραδιοφωνία σε Peer to Peer (P2P) επιτρέποντας την μετάδοση βίντεο. Τέλος αναφέρει ότι το περιβάλλον διάδοσης των ορυχείων είναι περίπλοκο με κάποιες ενδείξεις ότι η διάδοση είναι λιγότερο δριμεία όταν το μονοπάτι περιλαμβάνει άξονες εξαγωγής με επένδυση από χάλυβα.

Η έρευνα που μοντελοποίησε δίκτυα IoT σε ορυχεία [9] ανέδειξε ότι προκειμένου να υλοποιηθεί αποδοτικά η επικοινωνία με μέσο διάδοσης την πέτρα, δε μπορεί να υπερβαίνει τα έξι μέτρα. Ακόμη φάνηκε ότι ένα νευρωνικό δίκτυο προς τα πίσω διάδοσης επιστρέφει πιο ακριβή αποτελέσματα από απλό τριγωνικό εντοπισμό.

Όπως φάνηκε από την έρευνα για ασύρματη διάδοση σε κυκλικό τούνελ [10] 13 λειτουργίες είναι πάνω από την συχνότητα αποκοπής για τέλεια αγωγή τοιχώματα. Ακόμη χρησιμοποιούνται 16 λειτουργίες για τη διασφάλιση της

σύγκλισης στην περίπτωση τοίχου με απώλειες.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανίχνευσης ακτίνων [3] δείχνουν τη διαφορά στην ανάκλαση του εδάφους μεταξύ λείων και τραχιών επιφανειών. Αλλά επίσης και πως ο τροποποιημένος, με συντελεστή εξασθένησης, συντελεστής ανάκλασης Fresnel χρησιμοποιείται για τραχιές επιφάνειες και πώς η ισχύς του σήματος επηρεάζεται από την απόσταση και είναι χαμηλότερη σε ανώμαλες συνθήκες επιφάνειας.

Όπως και σε άλλες έρευνες οι κινητοί κόμβοι έχουν παρόμοια λειτουργία με τα κινητά τερματικά ενός κυψελωτού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα στην έρευνα για ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας σε σπήλαια [5] υλοποιείται ένα αξιόπιστο δίκτυο φωνητικής επικοινωνίας χρησιμοποιώντας ασύρματους κόμβους αισθητήρων πολυμέσων σε εσωτερικά περιβάλλοντα με δύο τύπους ασύρματων κόμβων αισθητήρων: κόμβοι κορμού και κινητοί κόμβοι. Η τρέχουσα υλοποίηση χειρίζεται μια ενεργή φωνητική επικοινωνία από σημείο σε σημείο.

Πιο πειραματικά σε ένα σπήλαιο που μετατράπηκε σε κελάρι [11] παρατηρήθηκε ότι τα σήματα χαμηλότερης συχνότητας είναι πιο πρακτικά για ασύρματη επικοινωνία σε σπηλιές. Πιο συγκεκριμένα η κάθετη συν-πόλωση (VV) έχει την καλύτερη λαμβανόμενη ισχύ στα περισσότερα σενάρια. Είναι σημαντικό να γίνει ο διαχωρισμός μεταξύ σπηλαίων τουριστικού σκοπού και των σπηλαίων εξερευνητικού/ορειβατικού σκοπού. Αρχικά επειδή οι τουριστικές σπηλιές έχουν κίνηση ανθρώπων και μεγαλύτερες διαστάσεις σε σύγκριση με τις άγριες σπηλιές [11]. Ακόμη η επιφάνεια του εδάφους των τουριστικών σπηλαίων είναι πιο λεία ενώ αντίθετα τα φυσικά περάσματα των σπηλαίων έχουν τραχιές επιφάνειες και ανομοιομορφίες διαστάσεων.

Τα αποτελέσματα μέτρησης πεδίου που λαμβάνονται από το εσωτερικό του κελαριού του Jeff [11] σε τρεις συχνότητες είναι τα εξής: η ισχύς του σήματος μειώνεται καθώς ο δέκτης απομακρύνεται από τον πομπό, το σήμα 900 MHz μπορεί να διαδοθεί ισχυρότερα για μεγαλύτερη απόσταση ενώ το σήμα 5,8 GHz εξασθενεί πιο γρήγορα και φτάνει στο επίπεδο θορύβου.

Στην πλήρη ανάλυση ραδιοσυχνοτήτων [6] συλλέχθηκαν στατιστικά στοιχεία για τις ιδιότητες διάδοσης και εξασθένησης του περιβάλλοντος του σπηλαίου. Ακόμη η φασματική πυκνότητα ισχύος και η φάση των συντελεστών του διανυσματικού ηλεκτρικού πεδίου. Δεν βρέθηκε κάποια σημαντική διαφοροποίηση στα αποτελέσματα σε όλο το φάσμα. Για το πρωτεύον διαδιδόμενο πεδίο ( $E_z$ ) το διάσπαρτο πεδίο συμπληρώνει μηδενικά (nulls) που στην ομαλή περίπτωση δημιουργούνται από καταστροφικές παρεμβολές. Τέλος η διασπορά πόλωσης αυξάνει την ενέργεια των  $E_x$  και  $E_y$  περαιτέρω μέσα στο σπήλαιο, πράγμα αναμενόμενο.

Η μέτρηση μοντέλου ανώμαλου εδάφους για πιθανές εφαρμογές σε σπήλαια [7] ανέδειξε ότι η ισχύς του σήματος πέφτει καθώς ο δέκτης απομακρύνεται από τον πομπό και πιο συγκεκριμένα η δραστική πτώση του σήματος σε τοποθεσία μεταξύ 18 και 22 m μετά το σήμα LOS που στρίβει σε γωνία. Ακόμη η διαδρομή σήματος NLOS μπορεί να ταξιδέψει μόνο μέσω ανάκλασης, περίθλασης και διάθλασης. Τα προσομοιωμένα και μετρημένα αποτελέσματα δείχνουν καλύτερη συμφωνία με τον παράγοντα σκέδασης, δηλαδή βελτιωμένη τυπική απόκλιση από 6,84 dB σε 4,48 dB με συντελεστή σκέδασης.

Ωστόσο απ'ότι φάνηκε στην έρευνα για LoRaWAN [1], μεγάλες αποστάσεις μπορούν να καλυφθούν αλλά συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως η γεωργία ακριβείας. Αυτό διότι το LoRaWAN είναι μια τεχνολογία που ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας και μεγιστοποιεί στην εμβέλεια, με αντάλλαγμα τον μειωμένο ρυθμό δεδομένων, δηλαδή τον χαμηλό ρυθμό διάδοσης (ενδεικτικά κάθε 30 λεπτά σε βάθος 40 εκατοστών με VWC=40%). Με άλλα λόγια το LoRaWAN είναι μια πολύ αξιόπιστη επιλογή, που ωστόσο υστερεί σε περιπτώσεις χρήσης που χρειάζεται γρήγορη επικοινωνία σε υπόγειο περιβάλλον βαθύτερο των τριών μέτρων.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι τα δίκτυα πέμπτης γενιάς προσφέρουν υψηλή ρυθμοαπόδοση, χαμηλή καθυστέρηση και μεγάλο εύρος ζώνης - πράγμα χρήσιμο για περιβάλλοντα ορυχείων. Ωστόσο κρίνεται σημαντικό να γίνει η διαφοροποίηση των ορυχείων με των συνηθών σπηλαίων, ερειπίων καθώς τα ορυχεία έχουν λιγότερο ακανόνιστη μορφολογία και έτσι μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας και εκμετάλλευσης των χαρακτηριστικών από την τηλεμετρία. Αντίστοιχα στην έρευνα για την ανάκλαση ακτίνων σε τραχείς επιφάνειες [3] δημιουργήθηκε ένα τυχαίο προφίλ τραχιάς επιφάνειας που μοιάζει με φυσικές συνθήκες σπηλαίων, εξετάστηκε η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό στο βράχο στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τέλος εισήλθε ο μέσος συντελεστής ανάκλασης για να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα σκέδασης.

Όπως φάνηκε από την ανάλυση των IoT σε ορυχεία [9] η λαμβανόμενη ισχύς σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της προόδου σε ένα ορυχείο, ακόμη η καμπύλη προσαρμογής προέκυψε πειραματικά για την υλοποίηση του νευρωνικού δικτύου.

Αντίθετα από την έρευνα για ασύρματες επικοινωνίες σε σπήλαια [5], φάνηκε ότι λόγω των περιοριστικών συνθηκών ραδιοσυχνοτήτων εντός των σπηλαίων καθιστούν ανεπαρκείς τις ασύρματες λύσεις. Επίσης το ICWCS χειρίζεται επί του παρόντος μόνο μία ενεργή φωνητική επικοινωνία από σημείο σε σημείο. Επιπρόσθετα η υπηρεσία καταλόγου εκτελείται συνηθώς έξω από το σπήλαιο, αλλά οι κόμβοι κορμού χρησιμοποιούν μηχανισμό προσωρινής αποθήκευσης για

να επιταχύνουν τις λειτουργίες καταλόγου. Τέλος πρέπει να εκτελεστούν αρκετά βήματα, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης και της αρχικής εγκατάστασης, προτού τεθεί σε λειτουργία το ICWCS. Όλα τα παραπάνω φανερώνουν κάποιους από τους περιορισμούς των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας σε υπόγεια περιβάλλοντα.

Οι σταλαγμίτες και οι σταλακτίτες στα περάσματα των σπηλαίων χρειάζονται περαιτέρω εξερεύνηση όπως φάνηκε στην [11]. Τα ασύρματα σήματα στα σπήλαια είναι ευεργετικά για την επιστημονική έρευνα και τη διαχείριση του τουρισμού

Στην πλήρη ανάλυση ραδιοσυχνοτήτων [6] έγινε υπολογιστική μελέτη διάδοσης και εξασθένησης σήματος σε περιβάλλον σπηλαίων με απώλειες. Οι εξισώσεις Maxwell πλήρους κύματος επιλύθηκαν απευθείας στο πεδίο του χρόνου. Στατιστικά δεδομένα που παράγονται για τη φασματική πυκνότητα ισχύος και τη φάση του ηλεκτρικού πεδίου συλλέχθηκαν.

Στην μέτρηση μοντέλου ανώμαλου εδάφους για πιθανές εφαρμογές σε σπήλαια [7] κατασκευάστηκε ένα μοντέλο ανώμαλου εδάφους για πιθανές εφαρμογές σε σπήλαια. Η μέτρηση πεδίου πραγματοποιήθηκε στα 2,4 GHz και φάνηκε ότι προσομοίωση ιχνηλάτησης ακτίνων με συντελεστή σκέδασης ταιριάζει καλύτερα με το μετρημένο αποτέλεσμα.

Πίνακας 1: Σύγκριση τεχνολογιών που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία

Τεχνολογία	Ερευνητές	Σκοπός Έρευνας	Μέθοδοι	Τύπος Έρευνας	Κύρια Πορίσματα - Συμπεράσματα
LoRA WAN	Guozheng Zhao, Kaiqiang Lin, Tong Hao [1]	Ανάπτυξη προσομοίωσης για να αξιολογηθεί η σκοπιμότητα της υπόγειας παρακολούθησης χρησιμοποιώντας υπόγειο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WUSN) που βασίζεται στο LoRaWAN	Ο προσομοιωτής έκανε 20 προσομοιώσεις με διαφορετικές ρυθμίσεις δικτύου και υπολόγισε πολλές μετρήσεις για κάθε προσομοίωση, όπως: Goodput (bps), αναλογία σφάλματος καθυστέρησης (DER) και απόδοση ελέγχου ισχύος (EPP). Ο προσομοιωτής εντόπισε επίσης πιθανές συγκρούσεις μεταξύ συσκευών στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιώντας τέσσερις διαφορετικές λειτουργίες: σύγκρουση συχνότητας, Sf(sps), ισχύος, χρονική σύγκρουση	Πείραμα μέσω προσομοίωσης	Μέσω πειραμάτων προσομοίωσης, αυτοί οι παράγοντες διερευνήθηκαν ποσοτικά και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα WUSN που βασίζονται στο LoRaWAN επέτρεψαν βαθύτερη και ευρύτερη υπόγεια παρακολούθηση με καλή απόδοση δικτύου σε σύγκριση με τα παραδοσιακά WUSN.
UHF	Milan Rak and Pavel Pechac [2]	Διερεύνηση της διάδοσης ραδιοκυμάτων σε σπήλαια για συχνότητες, 446 MHz και 860 MHz.	Τα συνεχή κύματα δημιουργήθηκαν από φορητούς πομπούς εξοπλισμένους με οριζόντια πανκατευθυντικές μονοπολικές κεραίες που πολώθηκαν κατακόρυφα. Η κεραία λήψης μετακινήθηκε κατά μήκος του προφίλ της συλλογής αναζητώντας το μέγιστο επίπεδο σήματος, εξαλείφοντας τα τοπικά ελάχιστα που προκαλούνται από τη διάδοση πολλαπλών διαδρομών.	Πειράματα και Μαθηματική Ανάλυση	Η μετρηθείσα ειδική εξασθένηση στις πρώτες τέσσερις θέσεις ήταν σε καλή συμφωνία με τις θεωρητικές προβλέψεις αλλά στην τοποθεσία Ε, τα αποτελέσματα διέφεραν σημαντικά. Αυτή η απόκλιση αποδόθηκε σε λανθασμένη εκτίμηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Παρατηρήθηκε συνδυασμός πολλαπλών τρόπων λειτουργίας. Αυτό αποδόθηκε στην αυξημένη απόσταση, η οποία προκάλεσε σημαντική διασπορά. Η σκέδαση είχε ως αποτέλεσμα την εκπόλωση των κυμάτων και παρόμοιες απώλειες διαδρομής και για τις δύο ορθογώνιες πολώσεις. Η μελέτη διαπίστωσε ότι το διάσπαρτο πεδίο συνέβαλε σημαντικά στη διάδοση του σήματος στις στροφές.

ZigBee (802.15.4g)	M.I. Martínez-Garrido, R. Fort [12]	Αξιολόγηση μιας πλατφόρμας ασύρματης επικοινωνίας για χρήση σε διάφορα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων εσωτερικών και εξωτερικών που σχεδιάστηκε για να ανιχνεύει αυτόματα νέες κινήσεις και να ενσωματώνει τα αντίστοιχα δεδομένα.	Οι παράμετροι που μετρώνται μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: αφενός, τις μετρήσεις που λαμβάνονται από τους ίδιους τους αισθητήρες (σε αυτή τη μελέτη θερμοκρασία και σχετική υγρασία), και αφετέρου την ποιότητα των επικοινωνιών και την απαίτηση ενέργειας.	Πειράματα	Ποσοτικοποίησε την επίδραση των εμποδίων στη διαδρομή μεταξύ της κίνησης και του σταθμού βάσης, την ενέργεια που καταναλώνεται από τα τερματικά, μετρούμενη ως προς την ισχύ της μπαταρίας. Ο πιο επιζήμιος παράγοντας βρέθηκε ότι ήταν η πλήρης απόφραξη των κεραιών εκπομπής από παρακείμενα μεταλλικά υλικά.
WiFi	Pablo F. Miaja, Fermin Navarro-Medina, Daniel G. Aller, Germán León, Alejandro Camanzo, Carlos Manuel Suarez, Francisco G. Alonso, Diego Nodar, Francesco Sauro, Massimo Bandecchi, Loredana Bessone, Fernando Aguado-Agelet, Manuel Arias	Χρήση ενός πρωτοκόλλου IEEE 802.11 για τη δημιουργία ραδιοδέσμης μεταξύ των σημείων πρόσβασης (CH) και κινητών τερματικών (CE).	Οποιοδήποτε από τα κινητά τερματικά (CE) μπορεί να λειτουργήσει ως «κινητά» σημεία πρόσβασης που διευκολύνουν την επικοινωνία απευθείας οπτικής επαφής (LOS).	Μηχανική συστημάτων που βασίζονται μοντέλα	Το κύριο πλεονέκτημα του 802.11ah έγκειται στη χαμηλότερη συχνότητα που χρησιμοποιείται, κάτω από 1 GHz, που ικανοποιεί απαιτήσεις μεγάλης εμβέλειας ή ισοδύναμα μειωμένες ανάγκες ισχύος μετάδοσης, καθώς και βελτιωμένη διείσδυση εμποδίων, σε βάρος της διαθέσιμης απόδοσης.



ELF (Extremely Low Frequency)	Jarred Glickstein, Jifu Liang, Seungdeog Choi, Arjuna Madanayake, and Soumyajit Mandal [13]	Σχεδιασμός και τη δοκιμή ενός αποτελεσματικού συστήματος μετάδοσης δεδομένων.	Η πρωτότυπη μηχανική κεραία δοκιμάστηκε για να εξεταστεί η πρακτική αποτελεσματικότητά της.	Θεωρητική Ανάλυση & Πειραματικός Έλεγχος	Ένας πομπός ELF που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας ένα μηχανικά περιστρεφόμενο μαγνητικό δίπολο αξιολογήθηκε για να αποδειχθεί η χρήση του για ασύρματες επικοινωνίες μη οπτικής επαφής σε αγωγίμο μεσο.
WiFi	William Walsh, Jay Gao [4]	Εξέταση ενός πρόχειρου μοντέλου μιας σπηλιάς και να συζήτηση σχετικά γενικών ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων.	Τέσσερις περιοχές εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης: το περιβάλλον επικοινωνίας στα πέντε μέτρα πίσω από το εμπόδιο, το περιβάλλον επικοινωνίας περίπου 18 μέτρα μπροστά από το εμπόδιο, το σήμα κοντά στα τοιχώματα του σπηλαίου και το σήμα ως εισχωρεί σε μια πλευρική δίοδο που αποκλείεται από τη θέα στο πίσω μέρος της σπηλιάς.	Μοντελοποίηση σε H/Y	Λαμβάνεται καλό σήμα WiFi σε όλο το σπήλαιο μήκους 100 μέτρων, αλλά σημειώνεται ότι η γεωμετρία κάθε σπηλαίου πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά. Η επιλεγμένη γεωμετρία μπορεί να είναι αισιόδοξη καθώς συλλαμβάνει μεγάλη ποσότητα της μεταδιδόμενης ενέργειας και παρέχει πολλές ευκαιρίες διασποράς.
Ασαφή Λογική & BPSK (350MHz)	Muhammed Enes Bayrakdar [14]	Ανάπτυξη μιας μεθόδου που διασφαλίζει τη μετάδοση δεδομένων χωρίς απώλειες, ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε υπόγεια δίκτυα αισθητήρων, βελτιστοποίηση της επιλογής των σταθμών συλλογής για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου.	Ασαφή (Fuzzy) λογική χρησιμοποιείται για τις λειτουργίες επιλογής βάσει κανόνων για τον προσδιορισμό της καταλληλότερης τοποθεσίας του σταθμού συλλογής. Βασικές παράμετροι όπως η καθυστέρηση, η απόδοση και η κατανάλωση ενέργειας διερευνώνται.	Simulation Modeling (Matlab & Riverbed)	Το προτεινόμενο σχέδιο επιλέγει αποτελεσματικά τον καταλληλότερο σταθμό συλλογής, ελαχιστοποιώντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν σημαντικές βελτιώσεις στη μέση καθυστέρηση και στη μέγιστη απόδοση. Η μελέτη επιβεβαιώνει ότι η προτεινόμενη προσέγγιση βασισμένη σε κανόνες, χρησιμοποιώντας ασαφή λογική για την επιλογή σταθμών συλλογής, ενισχύει την απόδοση και την αποδοτικότητα των ασύρματων υπόγειων δικτύων αισθητήρων.



BPSK (315-700MHz)	Muhammed Enes Bayrakdar [15]	Στόχος είναι η παροχή μιας αξιόπιστης μεθόδου για την ανίχνευση επιβλαβών υπόγειων παρασίτων εντόμων που απειλούν την ανάπτυξη των λαχανικών	Ένα μαθηματικό μοντέλο περιγράφει τη δομή του δικτύου αισθητήρων και την επικοινωνία τους με τους σταθμούς συλλογής. Το μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιείται για να καταδείξει την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης τεχνικής σε ελεγχόμενο περιβάλλον.	Μαθηματική Ανάλυση & Προσομοίωση σε Λογισμικό (Riverbed)	Η τεχνική που χρησιμοποιεί κατάλληλους ακουστικούς υπόγειους αισθητήρες εντοπίζει αποτελεσματικά τα παράσιτα με βάση το επίπεδο θορύβου που παράγουν. Στη συνέχεια, οι πληροφορίες μεταδίδονται στο σταθμό συλλογής για περαιτέρω ενέργειες. Οι αισθητήρες εισέρχονται σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας όταν δεν υπάρχει σημαντική υπόγεια δραστηριότητα. Τέλος τα δεδομένα μεταδίδονται στον σταθμό συλλογής είτε απευθείας είτε μέσω άλλων κόμβων (ad-hoc), εξασφαλίζοντας στιβαρή και ευέλικτη επικοινωνία ακόμη και σε διαφορετικά βάθη.
WASP (Wireless Ad-hoc System for Positioning)	Mark Hedley, Ian Gipps [16]	Βελτίωση της ασφάλειας και της παραγωγικότητας των υπόγειων εργασιών εξόρυξης με την ακριβή παρακολούθηση των οχημάτων σε επιχειρήσεις σπηλαίων μπλοκ.	Πλακέτες κυκλωμάτων WASP για μέτρηση επικοινωνίας και ώρας άφιξης (TOA), κόμβους τοποθετημένους σε οχήματα, κόμβους αγκύρωσης σε σταθερές θέσεις και υπολογιστές για επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων. Αλγόριθμος για τον υπολογισμό του εύρους που βασίζεται σε μετρήσεις TOA και ένας αλγόριθμος παρακολούθησης σχεδιασμένος να λειτουργεί με χαμηλή πυκνότητα κόμβων αναφοράς.	Μαθηματική Μοντελοποίηση & Πειραματική Υλοποίηση	Το σύστημα απέδειξε την ικανότητα ακριβούς παρακολούθησης οχημάτων ορυχείων και διεργασιών εξόρυξης μεταλλεύματος σε ένα επιχειρησιακό υπόγειο ορυχείο. Κατάφερε να διατηρήσει αξιόπιστη λειτουργία για μεγάλο χρονικό διάστημα (ένα έτος), αποδεικνύοντας την στιβαρότητα και την αποτελεσματικότητά του σε δύσκολα υπόγεια περιβάλλοντα. Τόνισε τα σημαντικά οφέλη της ασύρματης παρακολούθησης για τη βελτίωση της ασφάλειας των ανθρακωρύχων και τη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης με τη μείωση των συγκρούσεων και την καλύτερη παρακολούθηση της παραγωγής.
WiFi	Manoja D. Weiss Kevin L. Moore [17]	Ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός αλγορίθμου ασύρματης πρόσδεσης που βασίζεται στη λαμβανόμενη ισχύ για μια αλυσίδα αυτόνομων κινητών ραδιοφώνων (AMR) που εξερευνούν υπόγειες σήραγγες με πολλαπλές στροφές και γωνίες	Προσομοίωση για τη σύνδεση με RSS. Η κίνηση AMR εξασφαλίζει συνδέσμους μεγαλύτερους από ένα όριο RSS.	Προσομοίωση	Ο αλγόριθμος ασύρματης πρόσδεσης επιτρέπει στα AMR να διατηρούν ισορροπημένο εύρος ζώνης μεταξύ των πλησιέστερων γειτόνων, αποτρέποντας οποιαδήποτε μεμονωμένη σύνδεση να γίνει bottleneck. Ο αλγόριθμος διατηρεί με επιτυχία το RSS πάνω από το απαραίτητο όριο για τη διασφάλιση συνεχούς επικοινωνίας, ακόμη και σε συνθήκες NLOS. Σε σύγκριση με τη σύνδεση LOS, η πρόσδεση βάσει NLOS με κεραίες μέτριας υψηλής απολαβής σχεδόν διπλασιάζει το εύρος εξερεύνησης στα ανθρακωρυχεία.

WLAN 2.4GHZ	Qi Ping Soo, Soo Yong Lim, David Wee Gin Lim, Nurhidayah Rusli, Ka Heng Chong, Kian Meng Yap, Sian Lun Lau [7]	Διερεύνηση της ασύρματης επικοινωνίας σε περιβάλλοντα σπηλαίων, τα οποία χαρακτηρίζονται από ανώμαλα εδάφη	Οι ερευνητές πραγματοποίησαν μετρήσεις πεδίου σε ένα μοντέλο ανώμαλου εδάφους που κατασκεύασαν. Αυτό το μοντέλο προσομοιώνει τις ακανόνιστες συνθήκες εδάφους που βρίσκονται μέσα σε σπηλιές. Έπειτα συνέκριναν τα αποτελέσματα με δύο προσομοιώσεις ανίχνευσης ακτίνων. Η μία προσομοίωση χρησιμοποιούσε το αρχικό μοντέλο, ενώ η άλλη ενσωμάτωσε έναν παράγοντα διασποράς για να ταιριάζει καλύτερα με τις πραγματικές συνθήκες	Μοντελοποίηση & Προσομοίωση	Η προσομοίωση ανίχνευσης ακτίνων που περιελάμβανε τον παράγοντα σκέδασης έδειξε καλύτερη συμφωνία με τα μετρούμενα αποτελέσματα από το αρχικό μοντέλο, υποδεικνύοντας τη σημασία της εξέτασης των επιδράσεων σκέδασης σε τέτοια περιβάλλοντα.
RF 200MHz	J. Pingenot, R. Rieben, D. White [6]	Διεξαγωγή υπολογιστικής ανάλυσης της διάδοσης του σήματος και της εξασθένησης μιας διπολικής κεραίας 200 MHz σε περιβάλλον σπηλιάς.	Η μελέτη λύνει τις εξισώσεις Maxwell πλήρους κύματος απευθείας στο πεδίο του χρόνου μέσω μιας μεθόδου διακριτοποίησης πεπερασμένων στοιχείων διανυσματικού τομέα χρόνου υψηλής τάξης. Ακόμη το σπήλαιο έχει μοντελοποιηθεί ως ένας ευθύς και απωλεστικός τυχαίος τραχύς τοίχος. Επίσης έγινε χρήση συναρτήσεων βάσης παρεμβολής $H(\text{curl})$ δεύτερης τάξης και προσαρμοσμένων κανόνων τετραγωνισμού για ακρίβεια.	Μαθηματική Μοντελοποίηση	Η μελέτη παρουσιάζει αποτελέσματα για τη φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) και τη φάση των συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου, που δείχνουν σημαντική υποβάθμιση του σήματος σε απόσταση. Ακόμη οι σπηλιές με τραχιά τοιχώματα εισάγουν τυχειότητα στη διάδοση του σήματος, γεμίζοντας τα κενά που προκαλούνται από καταστροφικές παρεμβολές που παρατηρούνται σε σπήλαια με λεία τοιχώματα. Τέλος αυξάνει την ενέργεια ορισμένων συστατικών του ηλεκτρικού πεδίου ( $E_x$ , $E_y$ ) περαιτέρω μέσα στο σπήλαιο, υποδεικνύοντας ένα πιο περίπλοκο περιβάλλον διάδοσης από ένα με λείες επιφάνειες.

900MHz, 2.4GHz, 5.8GHz	Qi Ping Soo, Soo Yong Lim, David Wee Gin Lim, Kian Meng Yap, Sian Lun Lau [11]	Μέτρηση και ανάλυση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων σε μια φυσική σπηλιά που έγινε κελάρι κρασιού	Η μελέτη περιελάμβανε τη λήψη μετρήσεων εντός του κελαριού στις καθορισμένες συχνότητες. Εξετάστηκαν τόσο σενάρια οπτικής επαφής (LOS) όσο και σενάρια μη οπτικής επαφής (NLOS). Έγιναν μετρήσεις και ανάλυση σε διαφορετικές θέσεις μέσα στο σπήλαιο για να κατανοηθεί πώς το περιβάλλον του σπηλαίου επηρεάζει τη διάδοση του σήματος.	Ανάλυση μέσω Πειραμάτων	Η μελέτη διαπίστωσε σημαντική εξασθένηση σήματος στο σπήλαιο, με διαφορετικές συχνότητες να παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα εξασθένησης. Όπως αναμενόταν, η ισχύς του σήματος ήταν υψηλότερη στα σενάρια LOS σε σύγκριση με τα σενάρια NLOS. Οι υψηλότερες συχνότητες (2,4 GHz και 5,8 GHz) παρουσίασαν μεγαλύτερη εξασθένηση σε σύγκριση με τις χαμηλότερες συχνότητες (900 MHz), κάτι που είναι σύμφωνο με τη γενική θεωρία διάδοσης.
Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων 868 MHz, 2.4 GHz & 5 GHz	Tomás Laborra, Leire Azpilicueta, Peio Lopez Iturri, Erik Aguirre, and Francisco Falcone [18]	Ανάλυση και να εκτίμηση της ασύρματης κάλυψης στο εσωτερικό των σπηλαίων για εφαρμογές στη σπηλαιολογία.	Η έρευνα χρησιμοποίησε έναν εσωτερικό κώδικα προσομοίωσης 3D Ray Launching σε μια σχηματική αναπαράσταση ενός πραγματικού σπηλαίου στη Ναβάρρε. Εξέτασε την τοπολογία και τη μορφολογία του σπηλαίου, συμπεριλαμβανομένων των ιδιοτήτων των υλικών, για να εκτιμήσει τα επίπεδα ισχύος που έλαβε μέσα στο σπήλαιο. Η εκτιμώμενη λαμβανόμενη ισχύς αναλύθηκε για πομπό τοποθετημένο στην είσοδο του σπηλαίου, σε ύψος 1,5 μέτρου.	Μοντελοποίηση Προσομοίωσης	Η απόδοση του ασύρματου δικτύου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοπολογία του σπηλαίου. Η προσομοίωση 3D Ray Launching παρείχε ακριβείς εκτιμήσεις των λαμβανόμενων επιπέδων ισχύος, επικυρώνοντας τη σκοπιμότητα χρήσης WSN σε σπηλιές. Διαφορετικές ζώνες συχνότητων (868 MHz, 2.4 GHz και 5 GHz) αξιολογήθηκαν ως προς την απόδοσή τους όσον αφορά τη διάδοση και την κάλυψη του σήματος. Μια συνολική αύξηση στην απόδοση του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση της ντετερμινιστικής μεθόδου προσομοίωσης που παρέχεται από τον κώδικα 3D Ray Launching.

Ray Tracing	Qi Ping Soo, Soo Yong Lim, and David Wee Gin Lim [3]	Μελέτη της συμπεριφοράς των ραδιοκυμάτων σε μια τυχαία τραχιά επιφάνεια χρησιμοποιώντας την τεχνική ανίχνευσης ακτίνων	Δημιουργία ενός τυχαίου προφίλ τραχιάς επιφάνειας που με ένδειξη της θέσης του πομπού (Tx) και του δέκτη(Rx). Τοποθέτηση στο 1m μακριά από το Tx, ενώ οι διαδοχικές θέσεις Rx διασκορπίστηκαν 0.3m κατά μήκος του μονοπατιού προσομοίωσης συνολικού μήκους 58.78m. Χρήση του κριτηρίου Rayleigh και ενός συνδυασμού από λείες και τραχιές επιφάνειες για τον συντελεστή ανάκλασης Fresnel.	Μαθηματική Μοντελοποίηση & Προσομοίωση	Παρατηρείται ότι η ισχύς του σήματος μεταξύ των Tx και Rx επηρεάζεται κυρίως από την απόσταση για την λεία επιφάνεια καθώς και για την τυχαία τραχιά επιφάνεια εδάφους. Ακόμη παρατηρείται ότι σε αυτές τις δύο περιπτώσεις, το φαινόμενο της γωνίας Brewster εμφανίζεται σε απόσταση περίπου 11m από το Tx ή την 34η θέση του Rx.
ICWCS (In-Cave Wireless Communication System)	A. Gokhan Yavuz, Z. Cihan Taysi, Esra Celik [5]	Ανασκόπηση των Συστημάτων Επικοινωνίας σε Σπήλαια & Παρουσίαση της Τοπολογίας τους	Παρουσίαση δύο τύπων κόμβων: τους κόμβους ραχοκοκαλιάς και τους κινητούς κόμβους, καθένας από τους οποίους έχουν ένα αναγνωριστικό μήκους οκτώ χαρακτήρων και καταχωρούνται στον διακομιστή καταλόγου για παρακολούθηση. Οι κόμβοι ραχοκοκαλιάς έχουν έναν δείκτη RSS για τον μακρινότερο κόμβο και οι κινητοί κόμβοι που αναμεταδίδουν αιτήματα εγγραφής, εξετάζονται στους πίνακες εγγραφής των κόμβων ραχοκοκαλιάς και συνδέονται σε αυτόν με το μεγαλύτερο RSS	Επισκόπηση Τεχνολογιών & Αναφορά	Οι κόμβοι κορμού ICWCS τροφοδοτούνται με μπαταρίες 12V, 1.3Ah που παρέχουν λίγο περισσότερες από 7 ημέρες συνεχούς λειτουργίας. Οι κινητοί κόμβοι ήταν εξοπλισμένοι με τρεις επαναφορτιζόμενες 1.2V, μπαταρίες μεγέθους 700mAh AAA που παρέχουν τριάντα ώρες συνεχούς λειτουργίας. Ωστόσο η παρούσα υλοποίηση διαχειρίζεται μόνο μία επικοινωνία από σημείο σε σημείο.



Ασύρματη δοση	Διά- Donald G. Dudley [10]	Μοντελοποίηση της Ασύρ- ματης Διάδοσης σε Κυ- κλική Σήραγγα με Απώ- λειες	Διεγείρονται φ-συμμετρικές λει- τουργίες με ηλεκτρικούς/μαγνητι- κούς βρόχους σε κυκλικό βρόχο. Ο μετασχηματισμός Fourier και η ολοκλήρωση περιγράμματος χρη- σιμοποιούνται για την εύρεση τρο- πικών πεδίων. Αναλύονται οι δια- κυμάνσεις του πεδίου και λαμβάνο- νται συχνότητες αποκοπής για δια- φορετικές συχνότητες και αγωγιμό- τητα τοίχων. Οι διακυμάνσεις πε- δίου είναι γρήγορες λόγω πολλών τρόπων λειτουργίας στα $f=1\text{GHz}$ . Στα $f=2\text{GHz}$ , υπάρχουν περισσότε- ρες λειτουργίες και η πτώση είναι ταχύτερη (25dB/1000m).	Μαθηματική Ανάλυση	Φαίνεται το αποτέλεσμα για 1GHz και για 2GHz. Για 1GHz, η πτώση στο πεδίο είναι περίπου 170dB σε 1000m. Για 2 GHz, χρησιμοποιούνται 29 λειτουργίες και βρίσκεται ότι η πτώση είναι περίπου 60dB. Σε σύγκριση με τις ίδιες παραμέτρους στην περίπτωση TEz είναι σαφές ότι η πτώση είναι πολύ πιο σοβαρή για τη διέγερση του μαγνητικού ρεύματος, 170 έναντι 40dB στο 1GHz και 60 έναντι 25dB στα 2GHz.
WiFi	Michael R. Souryal, Andreas Wapf, and Nader Moayeri [19]	Ενίσχυση της επικοινωνια- κής κάλυψης με την ανά- πτυξη ασύρματων αναμε- ταδοτών για τη δημιουρ- γία μιας ραχοκοκαλιάς δι- κτύου.	Ανάπτυξη και δοκιμή ενός αυτομα- τοποιημένου αλγόριθμου για την επέκταση της κάλυψης επικοινων- νίας σε πραγματικό χρόνο. Το πείραμα χρησιμοποιούσε υπολογι- στές εξοπλισμένους με ραδιόφωνα IEEE 802.11b/g, επαναφορτιζόμε- νες μπαταρίες και κεραίες. Ο αλγό- ριθμος έδωσε οδηγίες στους χρή- στες να αναπτύξουν κόμβους με βάση αμφίδρομες μετρήσεις SNR. Οι μετρήσεις απόδοσης όπως η κα- θυστέρηση πακέτων, η διεκπεραί- ωση και η απώλεια πακέτων μετρή- θηκαν κατά τη διάρκεια και μετά την ανάπτυξη του δικτύου.	Εφαρμογή Πει- ράματος	Ένα δίκτυο εννιά αναμεταδοτών αναπτύχθηκε με επιτυχία με καθυστερήσεις μετ' επιστροφής κάτω από 80ms. Η χρήση του SNR για την αξιολόγηση της ποιότητας ζεύξης επέτρεψε την έγκαιρη ανίχνευση των οριακών ζεύξεων, διευκολύνοντας την έγκαιρη ανάπτυξη αναμεταδοτών. Το δίκτυο παρείχε αξιόπι- στη αμφίδρομη επικοινωνία φωνής και δεδομένων σε ένα περιβάλλον που προηγουμένως θεωρούνταν νεκρή ζώνη για επικοινωνίες δημόσιας ασφάλειας.

5G Cellular	Philip Branch [8]	Αξιολόγηση της καταλληλότητας και των πιθανών πλεονεκτημάτων των κυψελοειδών δικτύων 5G έναντι του WiFi για επικοινωνίες σε επιχειρήσεις εξόρυξης υπόγειων σπηλαίων.	Εξέταση των τεχνικών πτυχών του 5G, όπως ρυθμοαπόδοση, καθυστέρηση, εύρος ζώνης και ο επανασχεδιασμός του Δικτύου Ραδιοπρόσβασης (Radio Access). Σύγκριση της απόδοσης και της οικονομικής αποδοτικότητας του 5G με τις υπάρχουσες τεχνολογίες WiFi και LTE στις εργασίες εξόρυξης. Προσδιορισμός και συζήτηση συγκεκριμένων περιπτώσεων όπως των δικτύων αισθητήρων και της βιντεοεπιτήρησης.	Οικονομική και τεχνική ανάλυση σκοπιμότητας.	Το 5G προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες, χαμηλότερη καθυστέρηση και μεγαλύτερη κάλυψη σε σύγκριση με το WiFi, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο και υπόγεια χρήση. Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός του μειώνει επίσης το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.
Beamforming	Sathish Chandran [20]	Βελτίωση της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων και καταστολή παρεμβολών σε συστοιχίες προσαρμοστικής δέσμης ευρείας ζώνης (wideband adaptive beamforming)	Η μελέτη χρησιμοποιεί μια τεχνική προσαρμοστικής διάταξης διαμόρφωσης δέσμης υποζώνης (ABA) χρησιμοποιώντας μια συστοιχία φίλτρου καθρέφτη τετραγωνικής όγδοης τάξης (Quadratic Residue Decomposition - QMF). Η QMF χωρίζει το εύρος ζώνης του εισερχόμενου σήματος σε δύο υποζώνες. Η μέθοδος Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) χρησιμοποιείται για τη διαδικασία διαμόρφωσης δέσμης, η οποία ελαχιστοποιεί τη διακύμανση εξόδου ενώ διατηρεί μια απόκριση χωρίς παραμόρφωση στην επιθυμητή κατεύθυνση. Αυτή η μέθοδος υλοποιείται χρησιμοποιώντας την Τετραγωνική Αποσύνθεση Υπολειμμάτων (QRD).	Μαθηματική Μοντελοποίηση - Επεξεργασία Σήματος	Η εισαγωγή της επεξεργασίας υποζώνης με χρήση συστοιχίας QMF όγδοης τάξης βελτιώνει σημαντικά το κέρδος σήματος προς την κατεύθυνση κάθετη προς την προσαρμοστική διάταξη διαμόρφωσης δέσμης. Η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει βαθιά καταστολή των παρεμβολών, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος επικοινωνίας. Η QMF βοηθά στη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας αποδεκατίζοντας τη ροή δεδομένων, διατηρώντας έτσι την ποιότητα του σήματος, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τα φαινόμενα aliasing.

### III Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η εργασία καταδεικνύει τη σκοπιμότητα των υπόγειων ασύρματων δικτύων επικοινωνίας σε υπόγεια περιβάλλοντα. Αυτά τα δίκτυα μπορούν να υποστηρίξουν μικρό αριθμό πελατών, με μικρά εύρη ζώνης και υψηλή ανοχή καθυστέρησης, και μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να είναι αξιόπιστα και αποτελεσματικά σε τέτοια απαιτητικά περιβάλλοντα. Η μελέτη παρέχει ένα σημείο εκκίνησης για μελλοντική έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

### IV Συζήτηση

Σε θεωρητικό επίπεδο έχουν προταθεί τεχνολογίες extremely low frequency (elf) οι οποίες είναι ήδη σε χρήση σε υποβρύχια επειδή τα ραδιοκύματα ELF μπορούν να διεισδύσουν στο θαλασσινό νερό σε πολύ μεγαλύτερο βάθος από τα ραδιοκύματα υψηλότερης συχνότητας, τα οποία απορροφώνται από το νερό. Τα κύματα ELF (3 - 30Hz) έχουν πολύ μεγάλα μήκη κύματος, που κυμαίνονται από εκατοντάδες έως χιλιάδες χιλιόμετρα, και παράγονται από μια μεγάλη κεραία που ονομάζεται «δίπολο εδάφους» ή «δίπολο γης». Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία ELF έχουν συνήθως μήκος πολλών χιλιομέτρων και συχνά βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές με χαμηλά επίπεδα ανθρωπογενών παρεμβολών.

#### IV.I

Σε πειραματικό επίπεδο έχουν υλοποιηθεί και δοκιμαστεί ορισμένα πρότυπα επικοινωνίας τα οποία βασίζονται σε κάποιες από τις αρχές που έχουν προταθεί παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα το HeyPhone είναι ένα φορητό ραδιόφωνο που χρησιμοποιεί μια κεραία βρόχου με διάμετρο ένα μέτρο και έχει την ικανότητα να διαπεράσει το έδαφος σε βάθος μέχρι και 500 περίπου μέτρα, χρησιμοποιεί διαμόρφωση 87KHz Single Side Band (SSB).

#### IV.II

Ακόμη μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία είναι το τηλέφωνο ενός καλωδίου (Single Wire Telephone). Οι συσκευές είναι πολύ απλές, χρησιμοποιώντας ένα μόνο op-amp τόσο για να στείλουν όσο και να λάβουν ένα ηχητικό σήμα (φωνή) κατά μήκος ενός μόνο μονωμένου καλωδίου, χρησιμοποιώντας τη χωρητικότητα σύζευξης χειριστών στη γείωση για την επιστροφή. Ο δέκτης έχει πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου. Η ζήτηση ισχύος είναι πολύ χαμηλή, με πολλές ώρες (ή ημέρες) λειτουργίας από μπαταρία 9 volt. Απαιτείται πολύ μικρή σύζευξη στο έδαφος στο τέλος της λήψης. Το άκρο μετάδοσης οδηγεί

κυρίως στην κατανεμημένη χωρητικότητα του καλωδίου στη γείωση. Τα πολύ μεγάλα καλώδια (χιλιόμετρα) θα απαιτήσουν αρκετά καλή σύζευξη στη γείωση στο άκρο μετάδοσης. Προφανώς, οι αμφίδρομες επικοινωνίες πάνω από ένα πολύ μακρύ σύρμα θα απαιτήσουν αρκετά καλούς λόγους και στα δύο άκρα, όπως ένα μικρό πείρο σε βρωμιά ή ένα γυμνό σύρμα στο νερό.

### Αναφορές

- [1] G. Zhao, K. Lin και T. Hao, "A feasibility study of LoRaWAN-based wireless underground sensor networks for underground monitoring", Αγγλικά, *Computer Networks*, τόμ. 232, σ. 109 851, 1 Αύγ. 2023, issn: 1389-1286. doi: 10.1016/j.comnet.2023.109851. διεύθυν.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128623002967> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [2] M. Rak και P. Pechac, "UHF propagation in caves and subterranean galleries", Αγγλικά, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 55, αρθμ. 4, σσ. 1134–1138, Απρ. 2007, Conference Name: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, issn: 1558-2221. doi: 10.1109/TAP.2007.893385. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4148080> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [3] Q. P. Soo, S. Y. Lim και D. W. Gin Lim, "Investigation of rough surfaces for propagation modeling in caves", Αγγλικά, στο *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, ISSN: 1947-1491, Ιούλ. 2018, σσ. 555–556. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609186. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8609186> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [4] W. Walsh και J. Gao, "Communications in a cave environment", Αγγλικά, στο *2018 IEEE Aerospace Conference*, Μαρ. 2018, σσ. 1–8. doi: 10.1109/AERO.2018.8396606. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8396606> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [5] A. Yavuz, Z. C. Taysi και E. Özkan, "In-cave wireless communication system", Αγγλικά, 18 Οκτ. 2009, σσ. 161–164. doi: 10.1109/NGMAST.2009.58.

- [6] J. Pingnot, R. Rieben και D. White, “Full wave analysis of RF signal attenuation in a lossy cave using a high order time domain vector finite element method”, Αγγλικά, στο *IEEE/ACES International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics, 2005.*, Απρ. 2005, σσ. 658–661. doi: 10.1109/WCACEM.2005.1469674. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1469674> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [7] Q. P. Soo, S. Yong Lim, D. W. Gin Lim κ.ά., “Measurement of an uneven terrain model for potential applications in caves”, Αγγλικά, στο *2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Νοέ. 2019, σσ. 1–3. doi: 10.1109/APACE47377.2019.9021041. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9021041> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [8] P. Branch, “Fifth generation cellular networks for underground block cave mining: A position paper”, Αγγλικά, στο *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, ISSN: 2162-1233, Οκτ. 2021, σσ. 25–30. doi: 10.1109/ICTC52510.2021.9620942. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9620942> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [9] J. Ming, A. Jin, J. Sun, D. Hu και Y. Xia, “Study on the detecting technology of mine internet of things based on RSSI technology”, Αγγλικά, στο *2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC)*, ISSN: 2379-1276, Μάι. 2019, σσ. 1–4. doi: 10.1109/WOCC.2019.8770663. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8770663> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [10] D. Dudley, “Wireless propagation in circular tunnels”, Αγγλικά, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 53, αριθμ. 1, σσ. 435–441, Ιαν. 2005, Conference Name: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, issn: 1558-2221. doi: 10.1109/TAP.2004.836407. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1377619> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [11] Q. P. Soo, S. Yong Lim, D. W. Gin Lim, K. Meng Yap και S. Lun Lau, “Propagation measurement of a natural cave-turned-wine-cellar”, Αγγλικά, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, τόμ. 17, αριθμ. 5, σσ. 743–746, Μάι. 2018, Conference Name: IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, issn: 1548-5757. doi: 10.1109/LAWP.2018.2813310. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8309269> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [12] M. I. Martínez-Garrido και R. Fort, “Experimental assessment of a wireless communications platform for the built and natural heritage”, Αγγλικά, *Measurement*, τόμ. 82, σσ. 188–201, 1 Μαρ. 2016, issn: 0263-2241. doi: 10.1016/j.measurement.2015.12.036. διεύθυν.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026322411500696X> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [13] J. S. Glickstein, J. Liang, S. Choi, A. Madanayake και S. Mandal, “Power-efficient ELF wireless communications using electro-mechanical transmitters”, Αγγλικά, *IEEE Access*, τόμ. 8, σσ. 2455–2471, 2020, Conference Name: IEEE Access, issn: 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2961708. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8939554> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [14] M. E. Bayrakdar, “Rule based collector station selection scheme for lossless data transmission in underground sensor networks”, Αγγλικά, *China Communications*, τόμ. 16, αριθμ. 12, σσ. 72–83, Δεκ. 2019, Conference Name: China Communications, issn: 1673-5447. doi: 10.23919/JCC.2019.12.005. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8968724> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [15] M. E. Bayrakdar, “A smart insect pest detection technique with qualified underground wireless sensor nodes for precision agriculture”, Αγγλικά, *IEEE Sensors Journal*, τόμ. 19, αριθμ. 22, σσ. 10 892–10 897, Νοέ. 2019, Conference Name: IEEE Sensors Journal, issn: 1558-1748. doi: 10.1109/JSEN.2019.2931816. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8779702> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [16] M. Hedley και I. Gipps, “Accurate wireless tracking for underground mining”, Αγγλικά, στο *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, ISSN: 2164-7038, Ιούν. 2013, σσ. 42–46. doi: 10.1109/ICCW.2013.6649198. διεύθυν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6649198> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [17] M. D. Weiss και K. L. Moore, “Autonomous mobile radios for enhancing wireless communications through wireless tethering in tunnel-like environments”, Αγγλικά, *IFAC Proceedings Volumes*, τόμ. 42, αριθμ. 22, σσ. 31–36, 2009, issn: 1474-6670. doi: <https://doi.org/10.3182/20091006-3-US-4006.00006>. διεύθυν.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015340143>.



- [18] T. Laborra, L. Azpilicueta, P. L. Iturri, E. Aguirre και F. Falcone, “Estimation of wireless coverage in complex cave environments for speleology applications”, Αγγλικά, στο *2014 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, Ιούλ. 2014, σσ. 120–120. doi: 10.1109/USNC-URSI.2014.6955502. διεύθν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6955502> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [19] M. R. Souryal, A. Wapf και N. Moayeri, “Rapidly-deployable mesh network testbed”, Αγγλικά, στο *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, ISSN: 1930-529X, Νοέ. 2009, σσ. 1–6. doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425597. διεύθν.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5425597> (επίσκεψη 13/11/2023).
- [20] S. Chandran, “Wideband adaptive beamforming array with improved radiation characteristics”, Αγγλικά, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, τόμ. 4, αρθμ. 5, σσ. 1969–1973, Σεπτ. 2005, Conference Name: IEEE Transactions on Wireless Communications, issn: 1558-2248. doi: 10.1109/TWC.2005.853885. διεύθν.: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1532177> (επίσκεψη 13/11/2023).