

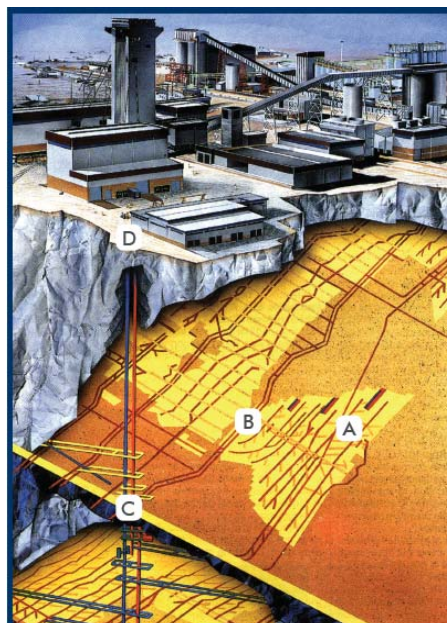
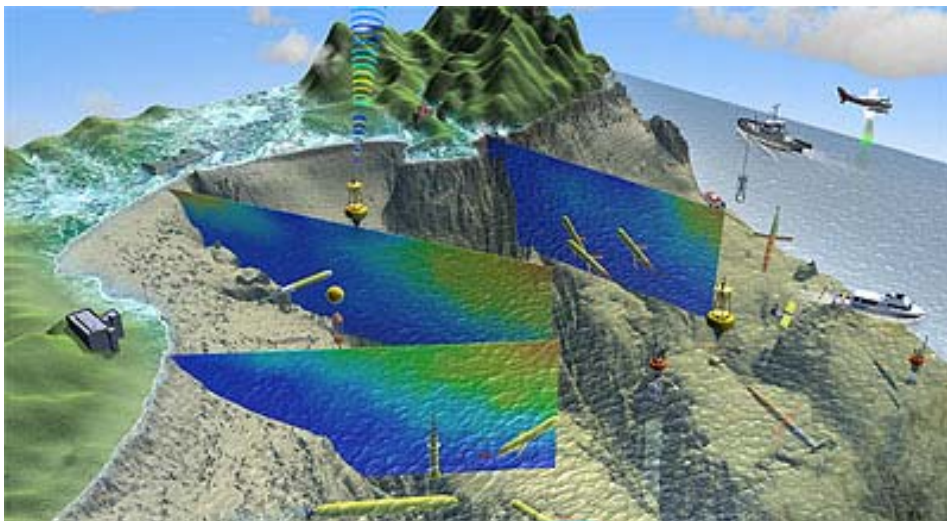
Πανεπιστήμιο Μακεδονίας  
ΠΜΣ Πληροφοριακά Συστήματα  
Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων  
Καθηγητής: Α.Α. Οικονομίδης

University of Macedonia  
Master Information Systems  
Networking Technologies  
Professor: A.A. Economides

ΓΙΑΝΤΣΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

**Θέμα εργασίας: Υποθαλάσσια & υπόγεια δίκτυα αισθητήρων**

**Work title: Underwater & underground sensor networks**



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2009

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
1. Εισαγωγή	3
1.1 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Ενσύρματων έναντι Ασύρματων Δικτύων	4
2. Εφαρμογές Υπόγειων Δικτύων	4
3. Σχεδιαστικές Προκλήσεις	
3.1 Διατήρηση ενέργειας	7
3.2 Σχεδιασμός τοπολογίας δικτύου	7
4. Σχεδιασμός Κεραίας	8
5. Περιβαλλοντικές αντιξοότητες (Environmental extremes)	9
5.1. Παράγοντες επιρροής Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων	9
5.2. Παράγοντες διακύμανσης διηλεκτρικής σταθεράς εδάφους	10
6. Εναλλακτικές τεχνολογίες φυσικού επιπέδου	10
7. Αρχιτεκτονική της επικοινωνίας	11
7.1 Επίπεδο τομής (Cross – layering)	11
8. Υποθαλάσσιοι Αισθητήρες Δικτύων–Underwater Acoustic Sensor Networks	12
8.1 Εφαρμογές Υποθαλάσσιων Δικτύων	12
8.2 Διαφορές Ακουστικών από Οπτικά κύματα	13
8.3 Μειονεκτήματα μεθόδου – Προκλήσεις σχεδιασμού ενός UWASN	13
9. Η αρχιτεκτονική της επικοινωνίας ενός UWASN	
9.1 Στατικά 2D UW-ASNs παρακολούθησης πυθμένα	14
9.2 Στατικά 3D UW-ASNs παρακολούθησης κατακόρυφης στήλης	15
9.3 3D UW-ASN για AUVs	16
10. Διαφορές Υποθαλάσσιων από Επίγεια Δίκτυα	17
11. Αρχιτεκτονική υποθαλάσσιων αισθητήρων	17
11.1. Προοπτικές βελτίωσης αισθητήρων	18
12. Πρωτόκολλο στοίβας τέμνοντος επιπέδου (Cross – layer)	18
13. Διάρκεια ζωής της μπαταρίας των αισθητήρων	18
14. Παράγοντες επιρροής μιας υποθαλάσσιας ακουστικής επικοινωνίας (UAC)	19
15. Προκλήσεις	20
16. Συμπεράσματα	20
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	21

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η εργασία παρουσιάζει την ιδέα των Ασύρματων Υπόγειων & Υποθαλάσσιων Ακουστικών Αισθητήρων Δικτύωσης. Τα υπόγεια δίκτυα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο μιας ποικιλίας συνθηκών, όπως ιδιότητες του εδάφους για αγροτικές εφαρμογές και τοξικές ουσίες για περιβαλλοντική παρακολούθηση. Σε αντίθεση με τις υπάρχουσες μεθόδους που αξιοποιούν θαμμένους αισθητήρες συνδεδεμένους με την επιφάνεια μέσω καλωδίων, τα ασύρματα δίκτυα δε στηρίζονται σε συνδέσεις με καλώδια. Κάθε συσκευή περιλαμβάνει όλους τους απαραίτητους αισθητήρες, μνήμη, επεξεργαστή, ράδιο, κεραία και πηγή ενέργειας. Οι προκλήσεις της διατήρησης ενέργειας, απεγκατάστασης από το έδαφος και η επαναφόρτιση των συσκευών, απαιτεί ώστε τα πρωτόκολλα επικοινωνίας να είναι όσο πιο επαρκεί γίνεται.

Στα υποθαλάσσια δίκτυα, οι αισθητήρες των κόμβων αξιοποιούνται σε εφαρμογές ωκεανογραφικής συλλογής δεδομένων, παρακολούθησης μόλυνσης, παράκτιας εξερεύνησης, αποτροπής καταστροφών, υποβοηθούμενης πλοήγησης και τακτικής παρακολούθησης. Μη επανδρωμένα ή αυτόνομα υποθαλάσσια οχήματα, εξοπλισμένα με αισθητήρες, επιτρέπουν την εξερεύνηση των υποθαλάσσιων φυσικών πηγών και τη συλλογή επιστημονικών δεδομένων, σε συνεργαζόμενες αποστολές παρακολούθησης. Σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζονται, οι προκλήσεις για την ανάπτυξη ενός επαρκούς και αποδοτικού δικτύου και η προσέγγιση ενός επιπέδου τομής για την ολοκλήρωση όλων των λειτουργιών των επικοινωνιών.

## ABSTRACT

This work introduces the concept of Wireless Underground Sensor Networks (WUSNs) & Underwater Acoustic Sensor Networks (UWASNs). WUSNs can be used to monitor a variety of conditions, such as soil properties for agricultural applications and toxic substances for environmental monitoring. Unlike existing methods of monitoring underground conditions, which rely on buried sensors connected via wire to the surface, WUSN devices are deployed completely below ground and do not require any wired connections. Each device contains all necessary sensors, memory, a processor, a radio, an antenna and a power source. The challenges for conserving energy, unearthing and recharging WUSN devices, require that communication protocols to be as efficient as possible.

Underwater sensor nodes will find applications in oceanographic data collection, pollution monitoring, offshore exploration, disaster prevention, assisted navigation and tactical surveillance applications. Unmanned or autonomous underwater vehicles (UUVs, AUVs), equipped with sensors, will enable the exploration of natural undersea resources and gathering of scientific data in collaborative monitoring missions. Thus are presented, the challenges for the development of a sufficient and efficient networking and a cross-layer approach to the integration of all communication functionalities.

## 1. Εισαγωγή

### A. Υπόγειοι αισθητήρες δικτύων – Underground sensor networks

Οι αισθητήρες δικτύου (sensor networks) κατέχουν ευρεία θέση στον τομέα της έρευνας. Η ποικιλία των υπαρχόντων και των μελλοντικών εφαρμογών, ξεκινώντας από τη γεωργία και τη γεωλογία έως την ασφάλεια (φύλαξη) και πλοήγηση (navigation), έχει επικεντρώσει την προσοχή των ερευνητών στις δυνατότητες παρακολούθησης ποικίλων υπόγειων συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα, στη γεωργία χρησιμοποιούνται υπόγειοι αισθητήρες για την παρακολούθηση των συνθηκών στο έδαφος όπως του νερού και των ορυκτών συστατικών. Χρησιμοποιούνται ευρέως επίσης για την παρακολούθηση της ακεραιότητας των υπόγειων δομών του εδάφους, όπως για την εφαρμογή υδραυλικών εγκαταστάσεων καθώς επίσης και για την παρακολούθηση κατολισθήσεων και σεισμών με την αξιοποίηση σεισμομετρικών οργάνων (seismometers), θαμμένων υπογείως.

Η παρούσα τεχνολογία των υπόγειων αισθητήρων, αποτελείται από την εγκατάσταση (θάψιμο) ενός αισθητήρα (Εικόνα 1) και η καλωδίωσή του με ένα καταγραφικό δεδομένων (data logger) στην επιφάνεια της γης, το οποίο αποθηκεύει τις ενδείξεις του αισθητήρα για μελλοντική ανάκτηση και επεξεργασία. Ένα καταγραφικό (Εικόνα 2), μπορεί να είναι εξοπλισμένο με μια συσκευή για ενσύρματη ή ασύρματη μονού βήματος (single-hop) οπίσθια έλξη (back haul) προς έναν κεντρικό συσσωρευτή (centralized sink), όπου συνήθως η ανάκτηση των δεδομένων γίνεται χειροκίνητα μέσω του καταγραφικού. Σ' αυτήν την περίπτωση οι συσκευές αισθητήρων απαιτούν την τοποθέτησή τους στην επιφάνεια του εδάφους και την ενσύρματη σύνδεσή τους με θαμμένους αισθητήρες, μ' αποτέλεσμα να είναι ορατοί, εύκολοι στην τοποθέτηση, timeliness of the data, να παρουσιάζουν αξιοπιστία και δυνατότητα πυκνής κάλυψης.



**Εικόνα 1.** Αισθητήρας υπόγειου δικτύου **Εικόνα 2.** Καταγραφικό δεδομένων

Βελτίωση αυτής της μορφής του δικτύου, αποτελούν τα Ασύρματα Δίκτυα Υπόγειων Αισθητήρων (Wireless Underground Sensor Networks – WUSNs), όπου η πλειοψηφία των αισθητήριων συσκευών, συμπεριλαμβανομένων και των μέσων μετάδοσης και λήψης, βρίσκεται υπογείως.

## 1.1 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Ενσύρματων έναντι Ασύρματων

Τα πλεονεκτήματα των ασύρματων έναντι των ενσύρματων δικτύων είναι τα εξής:

α) Απόκρυψη (Concealment) – Οι καταγραφείς τοποθετούνται στην επιφάνεια του εδάφους με ενσύρματη σύνδεση με τους υπόγειους αισθητήρες. Ο υπέργειος εξοπλισμός υπόκειται σε πιθανό κίνδυνο από τη διέλευση των μηχανών κατά τις γεωργικές εργασίες. Επίσης οι ορατές συσκευές μπορεί να μην είναι αποδεκτές κατά και για αισθητικούς αλλά και για λειτουργικούς λόγους κατά την παρακολούθηση αθλητικών εγκαταστάσεων ή κήπων. Στην αντίθετη περίπτωση τα ασύρματα δίκτυα υπερέχουν διότι, το πλείστον του εξοπλισμού είναι κάτω από τη γη μ' αποτέλεσμα να μην τίθεται θέμα καταστροφής τους, ακόμη και κλοπής ή βανδαλισμού τους μιας και είναι τελείως αόρατα. [3]

β) Ευκολία τοποθέτησης και ανάπτυξης του δικτύου (Ease of deployment) – Η ανάγκη επέκτασης του δικτύου θα απαιτούσε επιπρόσθετους καταγραφείς και καλωδιώσεις στην περίπτωση του ενσύρματου δικτύου. Στην αντίθετη περίπτωση, απλά γίνεται η τοποθέτηση του αισθητήρα στο επιθυμητό σημείο ή εντός του εύρους επικοινωνίας με μια άλλη συσκευή χωρίς κοπιαστικές ή χρονοβόρες ενέργειες.

γ) Timeliness of data – Οι καταγραφείς συνήθως αποθηκεύουν τις μετρήσεις των αισθητήρων για μεταγενέστερη ανάκτηση. Στα ασύρματα δίκτυα, γίνεται σε πραγματικό χρόνο (real time) η μετάδοση των μετρήσεων στον κεντρικό συσσωρευτή.

δ) Αξιοπιστία (Reliability) – Τα WUSNs, δίνουν τη δυνατότητα σε κάθε αισθητήρα να προωθούν τις μετρήσεις ανεξάρτητα, εξαλείφοντας έτσι την παρουσία του καταγραφικού καθώς επίσης και των καλωδιώσεων που θα έπρεπε να θαφτούν μεταξύ του καταγραφικού και του αισθητήρα που χρησιμοποιούνται στα WSNs. Επιπροσθέτως τα WUSNs αυτοθεραπεύονται (self-healing), δηλαδή οι αποτυχίες των συσκευών μπορούν να επαναδρομολογηθούν και ο χειριστής του δικτύου μπορεί να ενημερωθεί γι' αυτήν την αποτυχία σε πραγματικό χρόνο.

ε) Πυκνότητα κάλυψης (Coverage density) – Στα ενσύρματα δίκτυα οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι κοντά στους καταγραφείς, προς αποφυγή της μεταξύ τους απόστασης. Συνεπώς η πυκνότητα κάλυψης είναι ανισομερής, υψηλή γύρω από τον καταγραφέα και οπουδήποτε αλλού στον περιβάλλοντα χώρο χαμηλή. Τα WUSNs όμως, επιτρέπουν τους αισθητήρες να αναπτυχθούν ανεξάρτητα από τη θέση του καταγραφέα.

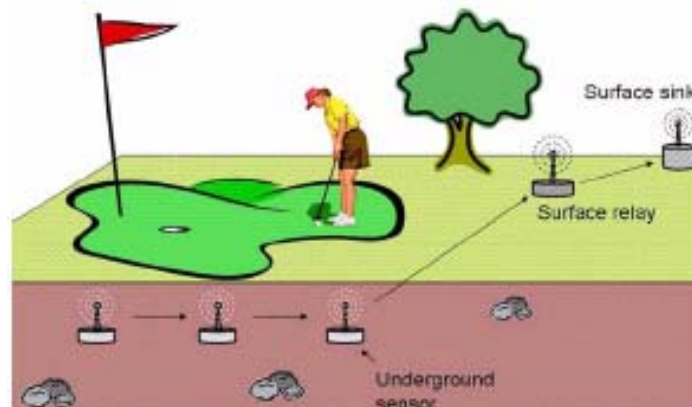
## 2. Εφαρμογές Υπόγειων Δικτύων

Κατηγοριοποιώντας την τρέχουσα και μελλοντική τεχνολογία στις εφαρμογές που βρίσκουν πεδίο ανάπτυξης, διακρίνουμε 4 κατηγορίες:

### α) Παρακολούθηση του περιβάλλοντος

Ένας αισθητήρας χρησιμοποιείται στη γεωργία για την παρακολούθηση της κατάστασης του υπεδάφους, αναφορικά με το νερό και το περιεχόμενο σε ορυκτά, ούτως ώστε να διατεθούν στοιχεία για την απαραίτητη ποσότητα άρδευσης και χρήσης λιπασμάτων. Ένα WUSNs μπορεί να αξιοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, εκμεταλλευόμενο τη δυνατότητα τοποθέτησης σε πυκνή κατανομή, ώστε να γίνεται π.χ. ενεργοποίηση ποτίσματος μέσω τοπικών αισθητήρων μόνο στις περιοχές που υπάρχει ουσιαστική ανάγκη, βάσει των κριτηρίων που έχουν τεθεί. Πιο συγκεκριμένα, σε μια εγκατάσταση θερμοκηπίου οι αισθητήρες θα μπορούσαν να τοποθετηθούν σε κάθε μια γλάστρα καθ' ενός φυτού χωριστά.

Το υπέδαφος των αθλητικών εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται για γκολφ (Εικόνα 3), ποδόσφαιρο, τένις κ.τ.λ., απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλης υγρασίας, χλόης και γενικότερα εδαφικών ιδιαιτεροτήτων, για το σκοπό για τον οποίο διατίθενται. Γι' αυτό η διατήρηση του υπεδάφους χρήζει ιδιαίτερης βαρύτητας κάτι που μπορεί με ιδιαίτερη ευκολία να διαχειριστεί από ένα WUSNs.



**Εικόνα 3.** Ένα WUSNs για παρακολούθηση γηπέδου γκολφ

Μια εξίσου σημαντική επιδίωξη είναι, η ανίχνευση της συγκέντρωσης τοξικών ουσιών ιδίως σε υπεδάφη πλησίον λιμνών, όπου οι εκβολές χημικών θα μπορούσαν να μολύνουν τις προμήθειες του πόσιμου νερού. Σ' αυτήν την περίπτωση βέβαια θα ήταν προσδοκώμενη η αξιοποίηση ενός υβριδικού δικτύου υπογείων & υποθαλάσσιων αισθητήρων.

Επιπροσθέτως τα WUSNs, μπορούν να αξιοποιηθούν για την πρόβλεψη κατολισθήσεων κατόπιν παρακολούθησης μετακίνησης του εδάφους. Οι παρούσες μέθοδοι, κοστίζουν και είναι χρονοβόρες στην εγκατάσταση. Αντιθέτως τα WUSNs εγκαθίστανται με μικρό κόστος μιας και η όλη διαδικασία επικεντρώνεται στο θάψιμο της κάθε συσκευής και μόνο. Η τεχνολογία των WUSNs θα επιτρέψει για πυκνότερη εγκατάσταση συσκευών αισθητήρων ώστε οι κατολισθήσεις να γίνονται εγκαίρως αντιληπτές από τους κατοίκους περιοχών που πλήττονται περισσότερο, με αποτέλεσμα την έγκαιρη εκκένωση της πληγείσας περιοχής. [4]

Εξίσου σημαντική εφαρμογή βρίσκουν τα WUSNs, στην ανίχνευση της ποιότητας του αέρα στα ορυχεία. Η ανάπτυξη μεθανίου και μονοξειδίου του άνθρακα, αποτελεί από τα βασικά προβλήματα εκρήξεων ή έναυσης πυρκαγιών, μ' αποτέλεσμα την επιτακτική ανάγκη ελέγχου της πίεσης αυτών των αερίων. Αυτή η εφαρμογή θα συνέβαλλε στην υβριδική αρχιτεκτονική των υπόγειων αισθητήρων ανοικτού αέρα (underground open – air sensors) και των υπόγειων θαμμένων αισθητήρων (underground embedded sensors), εγκατεστημένων μεταξύ της επιφάνειας του υπεδάφους και της οροφής του τούνελ του ορυχείου. Έτσι τα δεδομένα από τους αισθητήρες στο ορυχείο θα δρομολογούνταν τάχιστα στους κατακόρυφους σταθμούς της επιφάνειας, από ότι κατά μήκος του τούνελ του ορυχείου. [5]

Αναφορικά με την εφαρμογή του δικτύου στα ορυχεία, θα μπορούσε να αναφερθεί η χρήση ηχητικών αισθητήρων (audio sensors), όπως π.χ. ένα ισχυρό με υψηλή ευαισθησία χαμηλής ισχύος μικρόφωνο, κατάλληλο για υπόγεια περιβάλλοντα, επικολλημένο στους διανεμημένους υπόγειους αισθητήρες για την υποστήριξη ανίχνευσης και διάσωσης εγκλωβισμένων εργατών σε ορυχεία. Μικρόφωνα των WUSNs, θα μπορούσαν να αποβούν χρήσιμα για τη μελέτη των θορύβων από ζώα του υπεδάφους στο φυσικό τους περιβάλλον.



Παρακολούθηση ηφαιστειογενών εκρήξεων, σεισμών και προβλέψεις αυτών, θα μπορούσαν να διαχειριστούν από την ανάπτυξη της τεχνολογίας για τα WUSNs. [6] Σ' αντίθεση με τις προβλέψεις κατολισθήσεων όπου ενδιαφέρει η μετακίνηση του υπεδάφους κοντά στην επιφάνεια, χρήσιμα στοιχεία για τη δημιουργία σεισμών προέρχονται από πολλαπλάσια βάθη υπό της επιφάνειας της γης. Η πολύ-βηματική φύση των WUSNs, επιτρέπει ώστε να δρομολογηθούν τα δεδομένα πίσω σε ένα συλλέκτη πάνω από την επιφάνεια της γης, μέσω μιας πολλαπλού βάθους τοπολογία.

#### **β) Παρακολούθηση υποδομής εδάφους**

Στο υπέδαφος, συναντούμε σωληνώσεις, ηλεκτρικές καλωδιώσεις, δεξαμενές αποθήκευσης υγρών καυσίμων κ.τ.λ. Τα WUSNs, μπορούν να διατεθούν για την παρακολούθηση όλων αυτών, όπως π.χ. για την αποφυγή διαρροών από τη δεξαμενή και διατήρηση στάθμης υγρών της, καθώς επίσης αποτροπή από υπερχειλίση στις περιπτώσεις δεξαμενών λυμάτων και ανίχνευση και επιδιόρθωση υπόγειων σωληνώσεων. [7]

Οι αισθητήρες μπορούν αν φανούν χρήσιμοι επίσης και στις περιπτώσεις παρακολούθησης της υγιούς κατάστασης οποιουδήποτε υπόγειου τμήματος, είτε πρόκειται για θεμέλια κτιρίου, γέφυρας, φράγματος. Τοποθετημένοι στο εσωτερικό των τμημάτων, παρακολουθούν καταπονήσεις, αντοχές και άλλες παραμέτρους. [8]

#### **γ) Προσδιορισμός θέσης αντικείμενων**

Συσκευές υπόγειων στατικών αισθητήρων, που γνωρίζουν τις συντεταγμένες θέσης τους, χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς για υπηρεσίες προσδιορισμού θέσης διαφόρων αντικειμένων. Μια υποθετική εφαρμογή θα μπορούσε να αφορά επικοινωνία αισθητήρων κάτω από το υπέδαφος, με τα οχήματα που κινούνται στο δρόμο, δίνοντας πληροφορίες για την κατάσταση των αρτηριών σε προπορευόμενα σημεία ή για την κατάσταση λειτουργίας των σηματοδοτών, προς αποφυγή μπουτιλιαρισμάτων.

Πληροφορία θέσης θα μπορούσε να εξυπηρετεί και σκοπούς πλοήγησης για αυτόνομα συστήματα, όπου π.χ. μια αυτόνομη μονάδα διανομής λιπάσματος, καθοδηγούμενη κατάλληλη ανάλογα με τα κριτήρια και τις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί, σε επικοινωνία με τους υπόγειους αισθητήρες ανάλογα με τις ανάγκες του εδάφους να διανέμει λίπασμα εκεί που ουσιαστικά υπάρχει ανάγκη.

Τέλος, η τεχνολογία των WUSNs, μπορεί να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό επιζώντων στην περίπτωση κατάρρευσης κτιρίου. Η φιλοσοφία έχει ως εξής, σε διάφορα σημεία του κτιρίου υπάρχουν στατικοί αισθητήρες. Οι κάτοικοι, κουβαλούν μαζί τους αισθητήρες που έρχονται σε επικοινωνία με τους στατικούς. Σε περίπτωση κατάρρευσης, έχουμε μια σκιαγράφιση της πιθανής περιοχής αναζήτησης επιζώντων.

#### **δ) Συνοριοφύλαξη και παρακολούθηση ασφαλείας**

Τα WUSNs, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση παρουσίας και κίνησης πάνω από την επιφάνεια της γης είτε από ανθρώπους είτε από αντικείμενα. Ομοίως με την προηγούμενη μέθοδο, οι εγκατεστημένες συσκευές πρέπει να' ναι σταθερές και να γνωρίζουν τη θέση τους. Σ' αντίθεση με την παραπάνω μέθοδο όπου τα αντικείμενα ανακοινώνουν την παρουσία τους μέσω άμεσης επικοινωνίας με τις θαμμένες συσκευές, η παρακολούθηση της παρουσίας απαιτεί τη χρήση αισθητήρων, όπως πίεσης, ακουστικού ή μαγνητικού, για τον προσδιορισμό της παρουσίας ενός ανθρώπου ή ενός αντικείμενου. Χρήσιμη για φύλαξη οικίας και υπηρεσίες παροχής φύλαξης γενικότερα, όπου οι αισθητήρες μπορούν να εγκατασταθούν περιμετρικά ενός κτιρίου και να μην γίνουν αντιληπτές από εισβολείς μιας και δεν είναι ορατές για να απενεργοποιηθούν.

ΑΣύρματοι αισθητήρες πίεσης, τοποθετημένοι σε χαμηλό σχετικά βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ειδοποιήσουν τη

συνοριοφυλακή για παράνομη είσοδο. Κάθε αισθητήρας που έχει εγκατασταθεί, έχει προγραμματιστεί με πληροφορίες θέσης, οπότε επιτρέπει την ενημέρωση της ακριβούς τοποθεσίας ενεργοποίησης και συνεπώς παράνομης εισόδου.

Δεν απαιτούν ιδιαίτερη υποδομή μιας και είναι αυτό-ενεργοποιούμενα.

### 3. Σχεδιαστικές Προκλήσεις

#### 3.1 Διατήρηση ενέργειας

Το υπόγειο περιβάλλον απαιτεί ώστε τα WUSNs να έχουν μεγαλύτερη ισχύ μετάδοσης από ότι οι επίγειες συσκευές των WSNs. Η πρόσβαση στις συσκευές των WUSNs, είναι πολύ πιο δύσκολη σε σχέση με των WSNs, έως αδύνατη, είτε για ολική αντικατάσταση λόγω βλάβης είτε για αντικατάσταση μπαταρίας. Μόνοι τρόποι εξασφάλισης ενέργειας στις συσκευές των WUSNs, είναι είτε μέσω μετατροπής των σεισμικών δονήσεων είτε μέσω θερμικών διαβαθμίσεων σε ενέργεια, μέθοδοι που βρίσκονται ακόμη υπό μελέτη και πειραματισμό, σ' αντίθεση με τις συσκευές των WSNs, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεταξύ των άλλων και την ηλιακή ενέργεια σαν εναλλακτική πηγή ενέργειας μέσα από συστοιχία φωτοβολταϊκών.

Πρωταρχικός σκοπός στα WUSNs, είναι η επίτευξη της διατήρησης ενέργειας μέσω υλικοτεχνικού εξοπλισμού (hardware) και πρωτόκολλων επικοινωνίας (communication protocols), που να παρουσιάζουν ενεργειακή επάρκεια. [9,10]

#### 3.2 Σχεδιασμός τοπολογίας δικτύου

Η αξιοπιστία και η διατήρηση ενέργειας ενός δικτύου είναι ιδιαίτερης σημασίας για το σχεδιασμό της τοπολογίας ενός WUSN καθώς επίσης και για που προορίζεται, το οποίο διαφέρει αισθητά από ένα WSN.

Για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, κόστους εγκατάστασης και βέλτιστου σχεδιασμού τοπολογίας, λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

**α)** Μελλοντικές εφαρμογές (Intended Application) – Οι συσκευές αισθητήρων πρέπει να τοποθετούνται κοντά στο φαινόμενο που πρόκειται να παρακολουθήσουν, γεγονός το οποίο καθορίζει και το βάθος εγκατάστασής τους. Άλλη πυκνότητα παρουσιάζουν στην περίπτωση οικιακής φύλαξης και άλλη στην περίπτωση παρακολούθησης εδαφικής συμπεριφοράς για γεωργικές εφαρμογές.

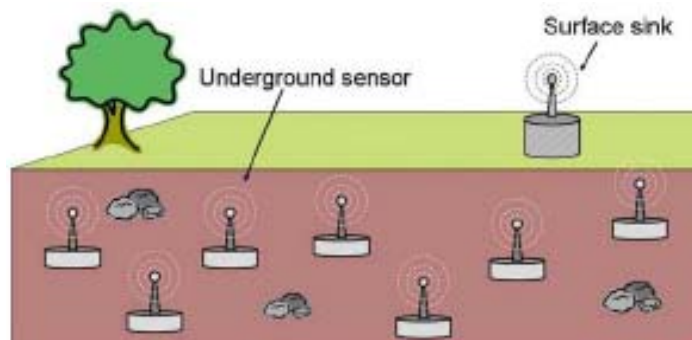
**β)** Ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας (Power usage minimization) – Η εξασθένιση είναι ανάλογη της απόστασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Η ελαχιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί σχεδιάζοντας μια τοπολογία με μεγάλο αριθμό μικρής απόστασης βημάτων (short – distance hops) παρά μικρού αριθμού μεγάλης απόστασης βημάτων (long – distance hops).

**γ)** Κόστος (Cost) – Ενώ τα WSN απαιτούν μόνο απλή σωματική διανομή των συσκευών, στην περίπτωση των WUSNs όπου απαιτείται και εκσκαφή ανάλογα με το βάθος, το κόστος μεταβάλλεται. Έτσι για την αποφυγή υψηλού κόστους, κατευθυνόμαστε σε εγκατάσταση χαμηλού βάθους και τοποθέτηση μικρότερου αριθμού αισθητήρων. Παρ' όλ' αυτά, αυτή η τακτική έρχεται σ' αντίθεση με τη μέθοδο της ελαχιστοποίησης κατανάλωσης ενέργειας, γι' αυτό πρέπει να οριστεί μελλοντικά μια χρυσή τομή.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, δύο είναι οι πιθανές τοπολογίες:

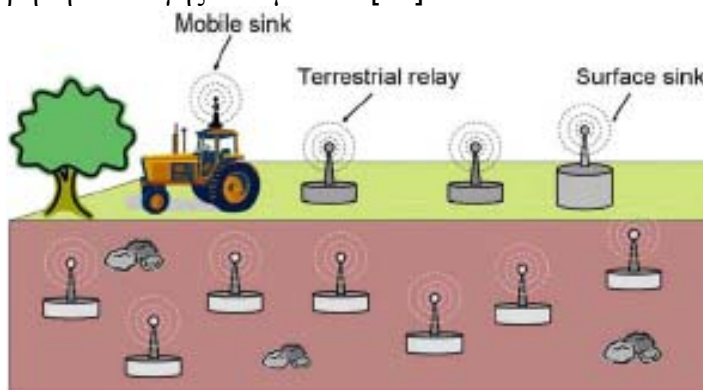
**i)** **Υπόγεια τοπολογία (Underground Topology)**, όπου όλοι οι αισθητήρες είναι υπόγειοι και μόνο ο συσσωρευτής έχει την ευελιξία να βρίσκεται και πάνω στην επιφάνεια (Εικόνα 4). Οι αισθητήρες μπορούν να είναι είτε μονού βάθους (single depth) οπότε και βρίσκονται όλοι στο ίδιο ύψος είτε πολλαπλού βάθους (multi depth) όπου το ύψος που βρίσκονται μεταξύ τους ποικίλλει.





Εικόνα 4. Υπόγεια τοπολογία

ii) **Υβριδική τοπολογία (Hybrid Topology)**, όπου επικρατεί μια ανάμιξη υπόγειων και υπέργειων θέσεων των αισθητήρων (Εικόνα 5). Λόγω βέλτιστης μετάδοσης σήματος στον αέρα, οι συσκευές που βρίσκονται σ' αυτό το μέσο, έχουν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Μπορεί επίσης υπεργείως να βρίσκεται μόνο ο συσσωρευτής ο οποίος να περνά από κάθε υπόγειο αισθητήρα, εντός ικανοποιητικής ζώνης, για να συλλέγει τα δεδομένα. Σ' αυτήν την περίπτωση το αρνητικό είναι πως έχουμε καθυστέρηση συλλογής δεδομένων. [11]



Εικόνα 5. Υβριδική τοπολογία

#### 4. Σχεδιασμός Κεραίας

Οι προκλήσεις για το σχεδιασμό της κατάλληλης κεραίας αφορούν:

**α) Απαιτήσεις μεταβλητών (Variable Requirements).** Ανάλογα με την εφαρμογή προσαρμόζονται και οι απαιτήσεις των κεραίων. Παράγοντες που επηρεάζουν τις μεταβλητές εμπλέκουν την απόσταση από το έδαφος που καθορίζουν και το μέγεθος της ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, καθώς επίσης όσες είναι πολύ κοντά στο έδαφος μπορεί να αναμεταδώσουν σήματα μεταξύ βαθύτερων συσκευών και επιφανειακών συσκευών. Σ' αυτήν την περίπτωση οι βαθύτερες συσκευές απαιτούν κεραίες που εστιάζονται τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση.

**β) Μέγεθος (Size).** Όσο πιο χαμηλή η συχνότητα τόσο μεγαλύτερη η απόσταση διάδοσης σε μερικά μέτρα. Όσο πιο μικρή είναι η συχνότητα τόσο πιο μεγάλη είναι η κεραία, οπότε τίθεται θέμα κατασκευής της κεραίας του αισθητήρα για την κατάλληλη τοποθέτηση. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για συχνότητα 100 MHz μια κεραία τέταρτου μήκους κύματος (quarter – wavelength) θα'χε διάσταση 0,75 m. [12]

**γ) Κατεύθυνση (Directionality).** Μελλοντική έρευνα θα δείξει για μια συσκευή ενός WUSN, αν μια omni-directional κεραία ή πολλές ανεξάρτητες directional κεραίες, είναι κατάλληλες. Το πιθανότερο είναι η λύση να βρίσκεται στον εξοπλισμό

μιας κεραίας με προσανατολισμό τόσο για οριζόντια όσο και για κατακόρυφη επικοινωνία.

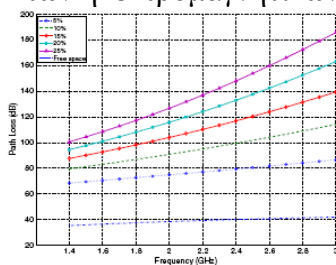
## 5. Περιβαλλοντικές αντιξοότητες (Environmental extremes)

Απειλές στη λειτουργία ενός WUSN, αποτελούν το νερό, η θερμοκρασία, τα ζώα, τα έντομα, ο εξοπλισμός εκσκαφής. Απ' αυτούς τους παράγοντες, θα πρέπει να μένουν το δυνατό ανεπηρέαστοι οι, επεξεργαστές, τα ραδιοκύματα, οι τροφοδοσίες ρεύματος και άλλος εξοπλισμός. Επίσης το φυσικό μέγεθος των WUSN συσκευών, πρέπει να' ναι μικρό ώστε να διατηρείται μικρό και το κόστος εγκατάστασης. Η τεχνολογία των μπαταριών πρέπει να είναι ανθεκτική στις υπόγειες θερμοκρασίες και το κέλυφος των συσκευών να είναι ανθεκτικό σε καταπονήσεις από διάφορα υπέργεια φορτία. [1]

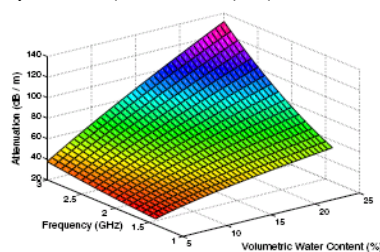
### 5.1. Παράγοντες επιρροής Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υπογείως, επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

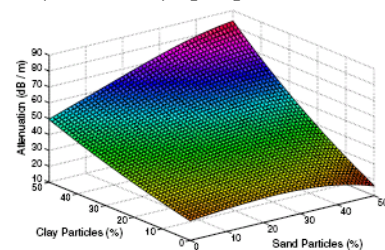
**α) Υπερβολικό χάσιμο μονοπατιού (Extreme path loss).** Το χάσιμο μονοπατιού εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του εδάφους και της περιεκτικότητάς του σε νερό. Το έδαφος κατηγοριοποιείται ανάλογα με το μέγεθος των μορίων του. Σε φθίνουσα σειρά βάσει μεγέθους είναι, η άμμος, η λάσπη, ο πηλός και μίγμα αυτών και αντίστοιχα ευκολίας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οποιαδήποτε αύξηση της ποσότητας του νερού στο έδαφος, αυξάνει σημαντικά την εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Εικόνα 6), (Εικόνα 7) & (Εικόνα 8). [13]



**Εικόνα 6.** Μονοπατική απώλεια λόγω απορρόφησης υλικού



**Εικόνα 7.** Εξασθένηση σήματος ανά μέτρο, λόγω απορρόφησης υλικού



**Εικόνα 8.** Πρόβλεψη μοντέλου εξασθένησης σήματος λόγω απορρόφησης υλικού

**β) Αντανάκλαση / Διάθλαση (Reflection / Refraction).** Οι συσκευές των WUSNs που εγκαθίστανται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, έχουν δυνατότητα επικοινωνίας τόσο με τις υπόγειες όσο και με τις υπέργειες συσκευές, μέσω π.χ. ενός επιφανειακού συσσωρευτή που χρησιμοποιεί μόνο ραδιοκύμα. Όταν το διαδομένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα φθάσει στο λογισμικό εδάφους – αέρος, μερικώς θα ανακλαστεί πίσω στο έδαφος και μερικώς θα μεταδοθεί στον αέρα. Το αντίστροφο ισχύει για εκπομπές από συσκευές επιφανείας στις υπόγειες.

**γ) Πολύ-μονοπατική εξασθένηση (Multi-path fading).** Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, μόνο που εδώ τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (Electromagnetic Waves – EM) μεσαίων μεταδόσεων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, θα προκαλέσουν επίσης πολύ-μονοπατική εξασθένηση, εξαιτίας των

διάσκορπων πετρών, των ριζών των διαφόρων φυτών και των ποικίλων εδαφικών ιδιοτήτων.

**δ) Μειωμένη ταχύτητα διάδοσης (Reduced Propagation Velocity).** Τα περισσότερα εδάφη έχουν διηλεκτρική σταθερή της τάξης του 1 – 80, οπότε είναι αυτονόητη μια ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης περίπου 10% της ταχύτητας του φωτός.

**ε) Θόρυβος (Noise).** Υπόγειος θόρυβος υπάρχει, αν και γενικά περιορισμένος σε σχετικά χαμηλές συχνότητες (κάτω από 1kHz), που οφείλεται στις γραμμές ισχύος, αστραπές, ηλεκτρικούς κινητήρες και στους ατμοσφαιρικούς θορύβους. [14]

## 5.2. Παράγοντες διακύμανσης διηλεκτρικής σταθεράς εδάφους

Η διηλεκτρική σταθερά στην οποία οφείλεται η εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που διέρχονται από το έδαφος, κυμαίνεται ανάλογα με τους παρακάτω παράγοντες:

**α) Περιεκτικότητα σε νερό (Water content).** Από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που λαμβάνουμε υπόψη για την πρόβλεψη απώλειας σήματος όπου η αύξηση της περιεκτικότητας του νερού καθορίζεται από τον τύπο του εδάφους. Συγκεκριμένα, στα αμμώδη εδάφη με την αύξηση του νερού, παρατηρείται λιγότερη εξασθένηση συγκριτικά με τα πηλώδη. Η εξασθένηση συντελείται επίσης και από το εύρος της συχνότητας που χρησιμοποιείται, όπου στις χαμηλές συχνότητες, πραγματοποιείται μικρότερη εξασθένηση με δεδομένη περιεκτικότητα σε νερό, απ' ό,τι στις υψηλές συχνότητες (Εικόνα 7). [15]

**β) Μέγεθος μορίων (Particle size).** Τα εδάφη ταξινομούνται λόγω της διαμέτρου των μορίων τους και διακρίνονται στα αμμώδη, λασπώδη και πηλώδη. Στα αμμώδη υπόκεινται η ελάχιστες εξασθενίσεις ενώ στα πηλώδη, οι μέγιστες.

**γ) Περιεκτικότητα (Density).** Με την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους, αυξάνεται και η εξασθένηση του σήματος.

**δ) Θερμοκρασία (Temperature).** Αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους, μεταβάλλει τη διηλεκτρική σταθερά και αυξάνει την εξασθένηση του σήματος.

Παράμετρος	Αλλαγή	Επίδραση στην εξασθένηση του σήματος
Νερό	↑	↑
Θερμοκρασία	↑	↑
Πυκνότητα	↑	↑
Άμμος	↑	↓
Πηλός	↑	↑

**Πίνακας 1:** Οι ιδιότητες του εδάφους και η επίδρασή τους στην εξασθένηση του σήματος

## 6. Εναλλακτικές τεχνολογίες φυσικού επιπέδου

Εναλλακτικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για τις υπόγειες επικοινωνίες, είναι **α) η μαγνητική επαγωγή** (Magnetic Induction–MI) και **β) σεισμικά κύματα**. Πλεονεκτήματα χρήσης αυτών είναι:

**α1)** Μέσα με υψηλή πυκνότητα όπως του εδάφους και του νερού προκαλούν μικρή διαφοροποίηση του ρυθμού εξασθένησης των μαγνητικών πεδίων συγκριτικά με αυτή του αέρα, μιας και η μαγνητική διαπερατότητα αυτών των υλικών είναι παρεμφερής.

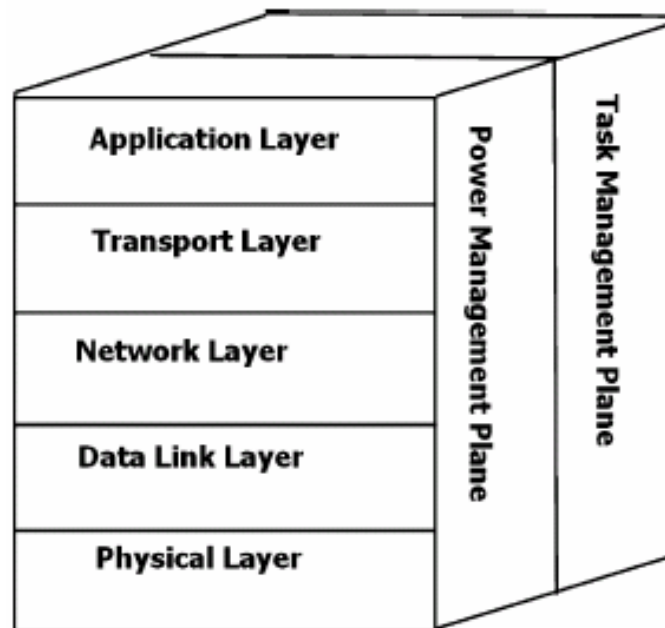
**α2)** Εφόσον το μαγνητικό πεδίο ενεργοποιείται σε κοντινό πεδίο, δεν προκαλεί διαδόσεις (non – propagating). Συνεπώς δεν τίθεται θέμα για πολύ-μονοπατική εξασθένιση (multi-path fading).

**α3)** Με τη ΜΙ λύνεται ο προβληματισμός σχεδιασμού υπόγειας κεραίας, μιας και η μετάδοση και η λήψη γίνεται με τη χρήση μικρών πηνίων σύρματος. [16]

**β1)** Έχουν δοκιμαστεί και σε αμμώδη και σε πετρώδη εδάφη φθάνοντας αποστάσεις έως και 1km. Τα μειονεκτήματα είναι πως για τη μετάδοσή τους χρειάζονται συχνότητες ακόμη χαμηλότερες από αυτές των EM, καθώς επίσης υψηλότερες συχνότητες σεισμικών κυμάτων μπορούν να προκαλέσουν audible coupling στον αέρα. Τέλος, για την παραγωγή τους απαιτείται μεγάλο ποσό ενέργειας. [17]

## 7. Αρχιτεκτονική της επικοινωνίας

Στην (Εικόνα 9) απεικονίζονται τα κλασικά 5 επίπεδα πρωτόκολλων, καθώς επίσης και τα τέμνοντα επίπεδα της διαχείρισης ενέργειας και εργασιών των ασύρματων υπέργειων δικτύων WSN, τα οποία πρωτόκολλα δεν μπορούν να απευθυνθούν στα υπόγεια δίκτυα WUSN παρά μόνο μετά από πολλές ρυθμίσεις - τροποποιήσεις. Παρόλ' αυτά, πρόσφορο έδαφος βρίσκει η ενίσχυση της απόδοσης της στοίβας πρωτόκολλου μέσω του σχεδίου του τέμνοντος επιπέδου (cross-layered design).



Εικόνα 9. Στοίβα πρωτόκολλου ενός WUSN

### 7.1 Επίπεδο τομής (Cross – layering)

Οι ερευνητικές προκλήσεις αφορούν τα εξής:

**α)** Την αξιοποίηση των δεδομένων των αισθητήρων για την πρόβλεψη του καναλιού, εξοπλίζοντας της συσκευές με αισθητήρες υγρασίας, για τη βέλτιστη δρομολόγηση των δεδομένων.

**β)** Την αξιοποίηση των δεδομένων του καναλιού για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων του εδάφους, όπου οι ιδιότητες του καναλιού προβλέπονται από τις μετρήσεις των αισθητήρων. Έτσι γίνονται αντιληπτές οι συνθήκες του εδάφους και σε περιοχές μεταξύ των συσκευών όπου δεν υπάρχουν καθόλου αισθητήρες.

γ) Δρομολόγηση βασισμένη στο πρωτόκολλο φυσικού επιπέδου. Εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός MAC πρωτόκολλου επιπέδου τομής και επίλυσης δρομολόγησης. Οι δρομολογήσεις θα πρέπει να αξιοποιήσουν συνδέσμους όπου, ισχύς χαμηλής μετάδοσης απαιτείται. Επιπροσθέτως, οι μετρήσεις περιεκτικότητας νερού στο υπέδαφος από τις περιβάλλουσες συσκευές, μπορούν να διαμορφώσουν χάρτη, ώστε τα πακέτα πληροφοριών να δρομολογούνται μόνο μέσω των στεγνών περιοχών, όπου εκεί το έδαφος προκαλεί χαμηλότερη εξασθένιση.

δ) Οργάνωση ευκαιριακού MAC (Opportunistic MAC Scheduling).

Με την ανίχνευση αυξανόμενης περιεκτικότητας σε νερό, γίνεται προσπάθεια αποστολής των πακέτων σε υψηλότερο επίπεδο ισχύος για να ξεπεραστούν οι επιπρόσθετες απώλειες, ακολουθούμενη από μια περίοδο παύσης όπου φυλάσσει τα εξερχόμενα πακέτα, περιμένοντας τη μείωση της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια. Έτσι η συσκευή χρειάζεται λιγότερες επανεκπομπές και χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης.[1]

## 8. Υποθαλάσσιοι Αισθητήρες Δικτύων–Underwater Acoustic Sensor Networks

Τα υποθαλάσσια δίκτυα επικοινωνίας, χρησιμοποιούνται για εφαρμογές συλλογής ωκεανογραφικών δεδομένων, παρακολούθησης μόλυνσης, παράκτιας εξερεύνησης, εμπόδισης καταστροφών και για εφαρμογές βοηθούμενης πλοήγησης και τακτικής παρακολούθησης. Πολλαπλά οχήματα μη επανδρωμένα ή αυτόνομα, (unmanned underwater vehicles – UUVs ή autonomous underwater vehicles – AUVs), εξοπλισμένα με υποθαλάσσιους αισθητήρες βρίσκουν εφαρμογές στην εξερεύνηση των φυσικών υποθαλάσσιων πηγών και συλλέγουν επιστημονικά δεδομένα σε συνεργαζόμενες αποστολές παρακολούθησης. Για να γίνει κάτι τέτοιο εφικτό, χρειάζεται η επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ των υποθαλάσσιων συσκευών, δηλαδή ο συντονισμός της λειτουργίας τους με ανταλλαγή πληροφοριών όπως διαμορφώσεων (configuration), τοποθεσίας (location), μετακίνησης (movement) και τέλος η αναμετάδοση των δεδομένων στο σταθμό ξηράς από τους αισθητήρες κόμβους και τα οχήματα. Όλα αυτά αποτελούν ένα αυτόνομο δίκτυο το οποίο δύναται να προσαρμοστεί στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος του ωκεανού.

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται γι' αυτές τις εφαρμογές, ονομάζεται ασύρματη υποθαλάσσια ακουστική δικτύωση (Underwater Acoustic Sensor Networking – UW-ASNs). [2]

### 8.1 Εφαρμογές Υποθαλάσσιων Δικτύων

Το εύρος των εφαρμογών, περιέχει:

α) **Δίκτυα δειγματοληψίας ωκεανού (Ocean Sampling Networks)**. Εδώ γίνεται συνοπτική δειγματοληψία του 3D παράκτιου περιβάλλοντος, με σκοπό την παρατήρηση και την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών αυτού του περιβάλλοντος. Χαρακτηριστικό είναι το πείραμα του Monterey Bay Field Experiment.

β) **Περιβαλλοντική παρακολούθηση (Environmental Monitoring)**. Εκτελείται παρακολούθηση της μόλυνσης (χημική, βιολογική, πυρηνική) της ποιότητας του νερού (ρυακίου, λίμνης, ποταμού, ωκεανού). [18]

γ) **Παρακολούθηση των ρευμάτων και ανέμων των ωκεανών**, με σκοπό τις βέλτιστες καιρικές προβλέψεις μέσω των κλιματικών αλλαγών και την κατανόηση και πρόβλεψη της επίδρασης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο θαλάσσιο οικοσύστημα.

**δ) Ανίχνευση υπερβολικής θερμοκρασιακής κλίσης**, γεγονός που ευνοεί την ανάπτυξη συγκεκριμένων μικρό-οργανισμών.

**ε) Υποθαλάσσιες εξερευνήσεις (Undersea exploration)** για κοιτάσματα ή φυσικές δεξαμενές πετρελαίου, για χάραξη εγκατάστασης υποθαλάσσιων καλωδιώσεων και υποβοήθηση στην ανίχνευση πολύτιμων ορυκτών.

**στ) Αποτροπή καταστροφών (Disaster prevention)**. Τα δίκτυα μετρούν σεισμική δραστηριότητα απόμακρων περιοχών, παρέχοντας προειδοποιήσεις για tsunamis στις παράκτιες περιοχές ή απλά μελετούν τις επιδράσεις των υποθαλάσσιων σεισμών.

**ζ) Υποβοηθούμενη πλοήγηση (Assisted Navigation)**. Πραγματοποιούν βαθυμετρικό προφίλ του πυθμένα της θάλασσας (bathymetry profiling on the seabed), αναγνωρίζοντας κινδύνους, επικίνδυνους βράχους στα ρηγά, αγκυροβολημένα σημεία και ναυάγια.

**η) Κατανεμημένη τακτική παρακολούθηση (Distributed Tactical Surveillance)**. Επιτυγχάνεται η ανίχνευση και κατάταξη υποβρυχίων, μικρών οχημάτων και δυτών, μέσω μικρό-αισθητήρων, μηχανικής, ακτινοβολίας, μαγνητικής και ακουστικής απόκρισης. Τα υποθαλάσσια δίκτυα αισθητήρων, έναντι των παραδοσιακών συστημάτων radar / sonar, έχουν υψηλότερη ακρίβεια και επιτρέπουν την ανίχνευση και κατάταξη μικρότερων στόχων, συνδυάζοντας μετρήσεις από διαφορετικούς τύπους αισθητήρων.

**θ) Αναγνώριση ναρκών (Mine reconnaissance)**. Η ταυτόχρονη λειτουργία πολλαπλών AUVs, με οπτικούς και ακουστικούς αισθητήρες, μπορούν να επιτύχουν τάχιστα περιβαλλοντική αναγνώριση και ανίχνευση αντικειμένων που μοιάζουν με νάρκες. [2]

## 8.2. Διαφορές Ακουστικών από Οπτικά κύματα

Η επικοινωνία μέσω ακουστικών κυμάτων, είναι τεχνολογία τυπικού φυσικού επιπέδου (physical layer) στα υποθαλάσσια δίκτυα. Τα ραδιοκύματα διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις όταν το μέσο είναι νερό άλλα σε υπερβολικά χαμηλές συχνότητες, γεγονός που απαιτεί μεγάλες κεραίες και υψηλή ισχύ μετάδοσης.

Απ' την άλλη τα οπτικά κύματα δεν υποφέρουν από τόσο υψηλή εξασθένιση αλλά επηρεάζονται από τη διασκόρπιση. Πιο συγκεκριμένα, η μετάδοση των οπτικών σημάτων απαιτεί υψηλή ακρίβεια στόχευσης της στενής ακτίνας λέιζερ. Γι' αυτό οι συνδέσεις των υποθαλάσσιων δικτύων στηρίζονται στην ακουστική ασύρματη επικοινωνία. [2]

## 8.3. Μειονεκτήματα μεθόδου – Προκλήσεις σχεδιασμού ενός UWASN

Η παραδοσιακή προσέγγιση παρακολούθησης του ωκεανού οριζοντίως και καθέτως, απαιτεί την τοποθέτηση – εξάπλωση υποθαλάσσιων αισθητήρων, συσκευών, που καταγράφουν δεδομένα κατά τη διάρκεια της αποστολής και τέλος γίνεται ανάκτηση των συσκευών. Αυτή η μέθοδος όμως παρουσιάζει τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

**α)** Μη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, λόγω της πρόσβασης στα καταγεγραμμένα γεγονότα μετά την περισυλλογή των συσκευών (που μπορεί να είναι μακροπρόθεσμη)

β) Αδυναμία διαμόρφωσης των συστημάτων σε απ' ευθείας σύνδεση και αυτό γιατί δεν υπάρχει δυνατότητα διάδρασης μεταξύ των συστημάτων ελέγχου και των συσκευών παρακολούθησης.

γ) Αδυναμία διαπίστωσης δυσλειτουργίας του συστήματος μέχρι τελικής περισυλλογής του.

δ) Περιορισμένη δυνατότητα αποθήκευσης καταγραφής δεδομένων, λόγω των ανάλογων δυνατοτήτων του εξοπλισμού (μνήμες, σκληροί δίσκοι κ.τ.λ.)

**Συνεπώς οι προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει ένα UWASN για να είναι αξιόπιστο, είναι να αντιμετωπίζει όλα τα παραπάνω. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με σύνδεση των συσκευών μεταξύ τους με ασύρματους συνδέσμους, βασισμένους στην ακουστική επικοινωνία.**

Συμπληρωματικά οι προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για τη αποδοτική λειτουργία ενός UWASN, είναι:

α) Το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι αυστηρά περιορισμένο

β) Το υποθαλάσσιο κανάλι μειώνεται αισθητά, ιδίως λόγω του πολύ-μονοπατιού multi-path και εξασθένισης fading

γ) Η καθυστέρηση διάδοσης στο νερό είναι 5 φορές σε μέγεθος μεγαλύτερη από ότι στη ραδιοσυχνότητα των επίγειων καναλιών και τρομερά ευμετάβλητη

δ) Λόγω των ιδιόμορφων χαρακτηριστικών των υποθαλάσσιων καναλιών, κάνουν την εμφάνισή τους ζώνες σκίασης (Shadow zones-temporary losses of connectivity) και high bit error rates

ε) Η ηλιακή ενέργεια δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και λόγω αδυναμίας επαναφόρτισης των μπαταριών, η ισχύς τους είναι περιορισμένη

ς) Λόγω μολύνσεων του υδάτινου περιβάλλοντος και διαβρώσεων που αυτό προκαλεί, οι αισθητήρες υπόκεινται συχνά σε βλάβες. [2]

## 9. Η αρχιτεκτονική της επικοινωνίας ενός UWASN

### 9.1 Στατικά 2D UW-ASNs παρακολούθησης πυθμένα

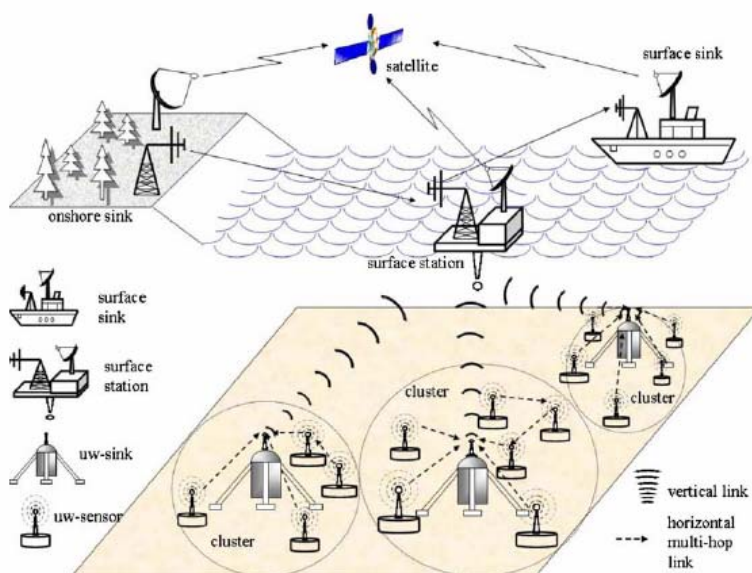
Μια ομάδα κόμβων αισθητήρων αγκυρώνονται στον πυθμένα του ωκεανού και συνδέονται με ένα ή περισσότερους υποθαλάσσιους συσσωρευτές (uw-sinks), μέσω ασύρματης ακουστικής σύνδεσης (Εικόνα 10). Οι συσσωρευτές είναι υπεύθυνοι για τη μετάδοση των δεδομένων από το δίκτυο του πυθμένα σ' ένα σταθμό επιφανείας.

Είναι εφοδιασμένοι με δύο ακουστικούς πομπούς, έναν κατακόρυφο και έναν οριζόντιο. Ο οριζόντιος χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τους κόμβους των αισθητήρων με σκοπό, α) να στέλνονται εντολές και δεδομένα διαμόρφωσης στους αισθητήρες (από συσσωρευτή προς αισθητήρες) και β) να συλλέγονται στοιχεία ελέγχου (από αισθητήρες προς συσσωρευτή). Η κατακόρυφη σύνδεση επιτυγχάνεται για την εκπομπή των δεδομένων από τους συσσωρευτές προς τους σταθμούς επιφανείας. Λόγω μεγάλου βάθους των ωκεανών, οι κατακόρυφοι πομποί πρέπει να' ναι μακράς εμβέλειας έως και 10 χιλιομέτρων.

Παρόλο που η άμεση σύνδεση αισθητήρων και συσσωρευτών είναι ο απλούστερος τρόπος σύνδεσης του υποθαλάσσιου δικτύου, δεν αποδεικνύεται ενεργειακά αποδοτική λύση, ιδίως για κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Επιπροσθέτως, η υψηλή ισχύς μετάδοσης, λόγω την αυξημένων ακουστικών παρεμβολών, πιθανώς να μειώσουν την αποδοτικότητα του δικτύου.



Αντιθέτως της άμεσης σύνδεσης, στα πολύ-βηματικά μονοπάτια (multi-hop paths), τα παραγόμενα στοιχεία μιας πηγής αισθητήρων, μεταδίδονται μέσω ενδιάμεσων αισθητήρων μέχρι να φτάσουν το συσσωρευτή (uw-sink). Έτσι από τη μια εξασφαλίζεται ενεργειακή επάρκεια και αυξημένη δικτυακή χωρητικότητα αλλά από την άλλη έχουμε αυξημένη πολυπλοκότητα της λειτουργίας δρομολόγησης. Στα UW-ASNs αυτής της αρχιτεκτονικής, ο σκοπός είναι να παραδοθούν στοιχεία γεγονότων, εξερευνώντας τα multi-hop paths και να ελαχιστοποιηθεί το signaling overhead, απαραίτητο για την κατασκευή υποθαλάσσιων μονοπατιών την ίδια χρονική στιγμή. [19]



**Εικόνα 10.** Αρχιτεκτονική 2D UW-ASNs

## 9.2. Στατικά 3D UW-ASNs παρακολούθησης κατακόρυφης στήλης

Χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την παρατήρηση φαινομένων που δεν μπορούν να παρατηρηθούν επαρκώς από τα 2D. Εδώ, οι κόμβοι αισθητήρων κινούνται σε διάφορα βάθη με σκοπό την παρατήρηση ενός συγκεκριμένου φαινομένου. Η εγκατάστασή τους γίνεται με στερέωση κάθε κόμβου αισθητήρα σε μια επιφανειακή σημαδούρα, με ρυθμιζόμενο καθ' ύψος σύρμα, για την αντίστοιχη ρύθμιση βάθους ελέγχου του αισθητήρα. Έτσι όμως τίθεται πρόβλημα είτε εμπόδισης πλεύσης των πλοίων είτε γίνονται εύκολα αντιληπτά από εχθρούς κατά τη διάρκεια στρατιωτικών εφαρμογών είτε τα ίδια είναι ευάλωτα στις καιρικές συνθήκες.

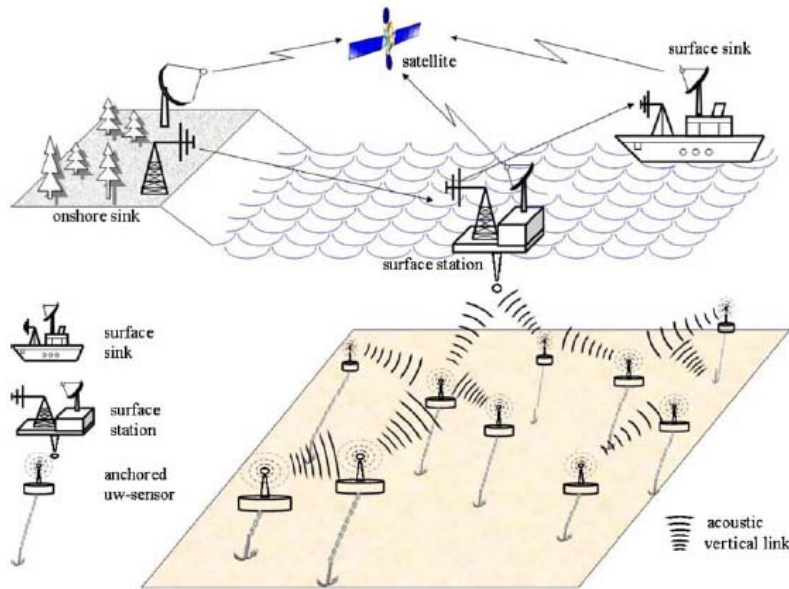
Για την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων γίνεται η αγκύρωση των αισθητήρων στον πυθμένα του ωκεανού (Εικόνα 11), οι οποίοι εξοπλίζονται με μια επιπλέουσα σημαδούρα, η οποία φουσκώνει με αντλία. Η σημαδούρα ωθεί τον αισθητήρα προς την επιφάνεια του ωκεανού και το βάθος του, ρυθμίζεται με τη ρύθμιση του μήκους του σύρματος (με ηλεκτρονικό τρόπο), που συνδέει τον αισθητήρα με την αγκύρωση.

Οι προκλήσεις που προκύπτουν κατά την εφαρμογή μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής δικτύου, σχετίζονται με:

**α)** επιδράσεις των ρευμάτων του ωκεανού στο μηχανισμό ρύθμισης βάθους των αισθητήρων

**β)** εύρος μέτρησης (sensing coverage). Οι αισθητήρες πρέπει να ανταποκρίνονται στην υποχρέωση ρυθμιζόμενης κατακόρυφης πορείας, για την ανάλογη κάλυψη των μετρήσεων

**γ)** κάλυψη επικοινωνίας (communication coverage). Οι συσκευές του δικτύου θα πρέπει να ρυθμίζουν το βάθος που μετακινούνται, με τέτοιο τρόπο ώστε η τοπολογία του δικτύου να είναι συνεχώς συνδεδεμένη, δηλαδή να υπάρχει τουλάχιστον ένα μονοπάτι από κάθε αισθητήρα προς τον επιφανειακό σταθμό. [20]



**Εικόνα 11.** Αρχιτεκτονική 3D UW-ASNs

### 9.3. 3D UW-ASN για AUVs

Τα αυτόνομα υποθαλάσσια οχήματα μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς σύρματα, σχοινιά ή τηλεχειριζόμενο έλεγχο, συνεπώς έχουν ευρύ πλάτος εφαρμογών στην ωκεανογραφία, παρακολούθηση περιβάλλοντος και μελέτη υποθαλάσσιων πηγών. Εξοπλισμένα με αισθητήρες, μπορούν να φτάσουν σε οποιοδήποτε βάθος, δοκιμάζοντας έτσι τις δυνατότητες ενός UWASN. Βέβαια η προσαρμογή αισθητήρων σε ένα AUV, απαιτεί νέο δικτυακό συντονισμό αλγορίθμων όπως:

**α) Προσαρμοσμένη δειγματοληψία (Adaptive Sampling).** Περιλαμβάνει στρατηγικές ελέγχου για την καθοδήγηση του οχήματος όπου τα δεδομένα θα είναι εξαιρετικά χρήσιμα. [21]

**β) Αυτό-διαμόρφωση (Self-configuration).** Περιλαμβάνει διαδικασίες ελέγχου προς ανίχνευση και επιδιόρθωση τρυπών στη σύνδεση λόγω βλάβης κόμβων ή εξασθένισης καναλιού. Το όχημα σ' αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την εγκατάσταση και συντήρηση της δομής του δικτύου των αισθητήρων είτε να τοποθετήσει καινούριους. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν προσωρινά ως αναμεταδότες κόμβων για την αποκατάσταση της σύνδεσης.

Σκοπός τους, να είναι το λιγότερο δυνατό εξαρτημένα από τις επικοινωνίες με τις ακτές. Διαθέτουν συστήματα ηλιακής ενέργειας για αυξημένη διάρκεια ζωής. Υπάρχουν οχήματα που λειτουργούν ως μικρού μεγέθους υποβρύχια και οχήματα που απλά παρασύρονται από τα ρεύματα του ωκεανού μετακινούμενα κατακόρυφα για τη συλλογή των πληροφοριών. Άλλα οχήματα κινούνται με μπαταρία, χρησιμοποιώντας υδραυλικές αντλίες για τη μεταβολή του όγκου τους και συνεπώς μεταβολής ύψους

παρακολούθησης. Κατά την άφιξη στην επιφάνεια της θάλασσας, χρησιμοποιούν GPS για τον εντοπισμό τους. Κινούνται σε βάθη μεταξύ 200 και 1500 μέτρων. Η διάρκεια ζωής τους είναι από μερικές βδομάδες ως μερικούς μήνες. [2]

## 10. Διαφορές Υποθαλάσσιων από Επίγεια Δίκτυα

Οι κύριες διαφορές μεταξύ αυτών των δικτύων είναι:

**α) Κόστος.** Οι επίγειοι έχουν συνεχώς πτωτική πορεία στο κόστος τους ενώ οι υποθαλάσσιοι αισθητήρες είναι εξαιρετικά δαπανηροί, λόγω των σύνθετων πομπών και του εξειδικευμένου υλικοτεχνικού εξοπλισμού που απαιτείται για την αντοχή τους από τις αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες

**β) Εγκατάσταση.** Ενώ οι επίγειοι αισθητήρες είναι πυκνά εγκατεστημένοι, οι υποθαλάσσιοι τείνουν σε ακόμη αραιότερη εγκατάσταση λόγω κόστους και προκλήσεων που εμφανίζονται στον τρόπο εγκατάστασης

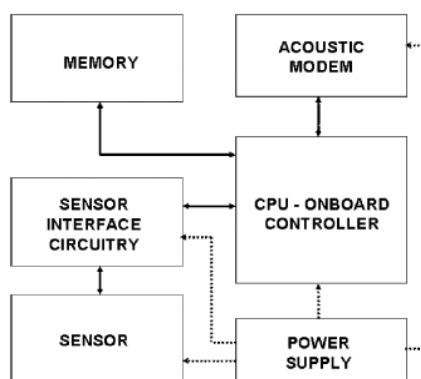
**γ) Ισχύς.** Η ισχύς που απαιτείται για UWASN είναι υψηλότερη από τις επίγειες ραδιοεπικοινωνίες λόγω υψηλότερων αποστάσεων κάλυψης και της πιο σύνθετης επεξεργασίας σήματος στους δέκτες, για την εξομάλυνση των εξασθενίσεων των καναλιών.

**δ) Μνήμη.** Ενώ οι επίγειοι κόμβοι αισθητήρων έχουν πολύ περιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης, οι υποθαλάσσιοι αισθητήρες um-sensors ίσως χρειαστεί να κάνουν κάποια απόκρυψη δεδομένων καθώς το υποθαλάσσιο κανάλι μπορεί να είναι περιοδικό.

**ε) Διαστηματική συσχέτιση (Spatial Correlation).** Λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ των αισθητήρων, συχνά οι μετρήσεις μεταξύ τους δεν είναι συσχετισμένες, σε αντίθεση με τους επίγειους. [2]

## 11. Αρχιτεκτονική υποθαλάσσιων αισθητήρων

Η τυπική εσωτερική αρχιτεκτονική ενός υποθαλάσσιου αισθητήρα, φαίνεται στην Εικόνα 12. Υπάρχει ο κεντρικός ελεγκτής (controller/CPU), συνδεδεμένος με ένα ωκεανογραφικό όργανο ή αισθητήρα. Ο ελεγκτής λαμβάνει δεδομένα από τον αισθητήρα και τα αποθηκεύει στη μνήμη, τα επεξεργάζεται και τα στέλνει σε άλλες συσκευές δικτύου, ελέγχοντας το ακουστικό μόντεμ. [2]



Εικόνα 12. Εσωτερική αρχιτεκτονική ενός υποθαλάσσιου αισθητήρα

### **11.1. Προοπτικές βελτίωσης αισθητήρων**

- α)** Ανάπτυξη οικονομικών νανο-αισθητήρων (nano-sensors), βασισμένοι στη νανοτεχνολογία προς βελτίωση των υλικών τους
- β)** Προγραμματισμός περιοδικών μηχανικών καθαρισμών ενάντια στη διάβρωση και στις διάφορες υποθαλάσσιες ακαθαρσίες
- γ)** Ανάπτυξη ισχυρών αισθητήρων, σταθερών στις υψηλές θερμοκρασιακές αλλαγές και βελτίωση της ακρίβειας δειγματοληπτικών μετρήσεων
- δ)** Ανάπτυξη ολοκληρωμένων αισθητήρων για συνοπτική δειγματοληψία φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων, προς βελτίωση της κατανόησης των διαδικασιών στο θαλάσσιο σύστημα. [2]

### **12. Πρωτόκολλο στοίβας τέμνοντος επιπέδου (Cross – layer)**

Ένα πρωτόκολλο στοίβας για τους υποθαλάσσιους αισθητήρες πρέπει να συνδυάζει ενεργειακή αψύπνιση και διαχείριση και να προωθεί τη συνεργασία μεταξύ των κόμβων των αισθητήρων.

Θα πρέπει να αποτελείται από τις λειτουργίες των πρωτόκολλων, φυσικού επιπέδου, σύνδεσης δεδομένων, δικτύου, μεταφοράς και εφαρμογής καθώς επίσης να περιλαμβάνει:

- α)** επίπεδο διαχείρισης ενέργειας, υπεύθυνο για την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης
- β)** επίπεδο συντονισμού, για τις λειτουργίες μεταξύ των αισθητήρων
- γ)** επίπεδο εντοπισμού, για παροχή απόλυτων ή σχετικών πληροφοριών εντοπισμού στον κόμβο αισθητήρα όταν απαιτηθεί από τη στοίβα πρωτοκόλλου ή από την εφαρμογή.

Είναι γενικώς αποδεκτό από την κοινότητα της ασύρματης δικτύωσης πως, η βελτίωση της δικτυακής απόδοσης ιδίως σε κρίσιμα περιβάλλοντα, επιτυγχάνεται με την προσέγγιση ενός τέμνοντος επιπέδου, με σκοπό να ξεπεραστούν δυσκολίες που προκύπτουν από την ελλιπή πληροφοριακή κατανομή μεταξύ των στρώσεων των πρωτόκολλων. [2]

### **13. Διάρκεια ζωής της μπαταρίας των αισθητήρων**

Μοντελοποιείται ως εξαρτώμενη από τέσσερις παράγοντες κλειδιά:

- α)** ονομαστική απόσταση μεταξύ των κόμβων
- β)** συχνότητα μετάδοσης
- γ)** συχνότητα αναβάθμισης των δεδομένων
- δ)** αριθμός των κόμβων ανά ομάδα

Μιας και στα ρηχά νερά η απώλεια ακουστικής διάδοσης αυξάνει, με την αύξηση της συχνότητας και της απόστασης, προτείνεται η ανάθεση χαμηλότερων συχνοτήτων στους κόμβους αισθητήρων που βρίσκονται κοντύτερα στο συσσωρευτή, μιας και έχουν να εκπέμψουν δεδομένα εκ μέρους πολλών απόμακρων κόμβων. Με αυτόν τον τρόπο η ενεργειακή κατανάλωση εξισώνεται κατά κάποιο τρόπο και η διάρκεια ζωής του δικτύου επιμηκώνεται. [22]

## 14. Παράγοντες επιρροής μιας υποθαλάσσιας ακουστικής επικοινωνίας (UAC)

Τα UWASNs επηρεάζονται από:

### α) την απώλεια μονοπατιού (path loss).

**α1)** Η εξασθένιση προκαλείται κυρίως από την απορρόφηση λόγω της μετατροπής της ακουστικής ενέργειας σε θερμότητα και αυξάνει με την απόσταση και τη συχνότητα (Εικόνα 13).

**α2)** Γεωμετρική διάχυση. Αφορά τη διάχυση της ενέργειας του ήχου. Αυξάνει με την απόσταση διάδοσης και εξαρτάται από τη συχνότητα. Υπάρχουν δύο τύποι διάχυσης, η σφαιρική που χαρακτηρίζει τις επικοινωνίες σε βαθιά νερά και η κυλινδρική που χαρακτηρίζει τις επικοινωνίες σε ρηγά νερά. [23]

### β) το θόρυβο (noise).

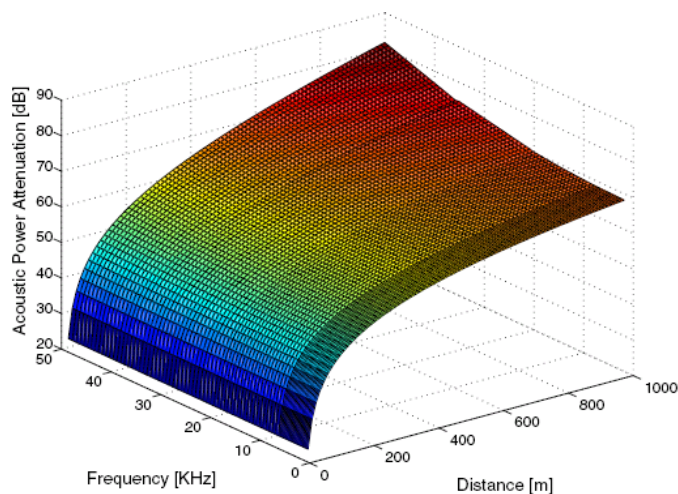
**β1)** Θόρυβος που οφείλεται σε ανθρώπινα αίτια, δηλαδή σε μηχανικούς θορύβους (αντλίες, μειωτήρες, εργοστάσια) και σε ναυτιλιακές δραστηριότητες

**β2)** Θόρυβος περιβάλλοντος. Σχετίζεται με υδροδυναμικά (κίνηση νερού, παλίρροιες, ρεύματα, καταιγίδες, άνεμος και βροχές), σεισμικά και βιολογικά φαινόμενα. [24]

**γ) το πολύ-μονοπάτι (multi-path)**, μπορεί να είναι η αιτία για την αυστηρή υποβάθμιση του ακουστικού σήματος επικοινωνίας, μιας και ενεργοποιεί διασυμβολική παρεμβολή (Inter-symbol interference - ISI). Η γεωμετρία του εξαρτάται από τη διαμόρφωση της σύνδεσης. Τα κατακόρυφα κανάλια χαρακτηρίζονται από μικρού χρόνου διασπορά, ενώ τα οριζόντια έχουν υπερβολικά μεγάλη πολύ-μονοπατική διάδοση. [25]

**δ) την εξάπλωση Doppler (Doppler spread)**. Είναι σημαντική στα UWA κανάλια, προκαλώντας υποβάθμιση της λειτουργίας των ψηφιακών επικοινωνιών. Ενεργοποιεί μετάφραση απλής συχνότητας, εύκολα ανταποκρινόμενη από το δέκτη και διαχέει συνεχώς συχνότητες απαράλλαχτου σήματος, δυσκολότερα ανταποκρινόμενες.

**ε) υψηλές και ποικίλες καθυστερήσεις διάδοσης (high and variable propagation delay)**. Η ταχύτητα διάδοσης υποθαλασσίως είναι πέντε φορές σε μέγεθος μικρότερη απ' αυτή των ραδιοκαναλιών και εμποδίζει από την ακριβή εκτίμηση του (round trip time – RTT), το οποίο αποτελεί παράγοντα κλειδί για πολλά κοινά πρωτόκολλα επικοινωνίας. [2]



**Εικόνα 13.** Απώλεια μονοπατιού μικρής εμβέλειας ακουστικού καναλιού έναντι απόστασης και συχνότητας σε συχνότητα από 1 – 50 kHz

## 15. Προκλήσεις

Αναφορικά με τα υποθαλάσσια δίκτυα μια σειρά από βελτιώσεις πρέπει να εφαρμοστούν για την αύξηση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας τους προκειμένου να γίνει πιο αποτελεσματική η χρήση τους, δηλαδή:

α) ανάπτυξη νέων στρατηγικών ελέγχου ροής για την αποφυγή υψηλών καθυστερήσεων και ποικιλόμορφων καθυστερήσεων των μηνυμάτων ελέγχου που επιστρέφονται από τους παραλήπτες,

β) δημιουργία αποτελεσματικότερων μηχανισμών για τη μείωση της απώλειας πακέτων

γ) πρόταση νέων αξιόπιστων μετρικών ορισμών γεγονότων μεταφοράς (event transport reliability metric definitions), βασισμένων στο μοντέλο γεγονότων και στο μοντέλο UWAC (UnderWater Acoustic Channel)

δ) Ανάγκη βέλτιστων πολιτικών για το ρυθμό αναφοράς των αισθητήρων, για την αποφυγή συγκρούσεων και τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας του δικτύου καθώς επίσης και της αξιοπιστίας της μεταφοράς σε περιορισμένου εύρους ζώνης υποθαλάσσια δίκτυα

ε) Ανάγκη μελέτης επαρκών μηχανισμών για την αντιμετώπιση των επιρροών της εμφάνισης των πολλαπλών γεγονότων στην αξιοπιστία και στη λειτουργία του δικτύου

στ) ανάπτυξη στατιστικού μοντέλου απώλειας συνδεσιμότητας για την ανάπτυξη εφαρμογών ανθεκτικές στις καθυστερήσεις

ζ) διαφορετικές λειτουργίες στη σύνδεση των δεδομένων και του επιπέδου μεταφοράς όπως η πρόσβαση στο κανάλι, αξιοπιστία και έλεγχος ροής, θα πρέπει να σχεδιαστούν και να μελετηθούν από κοινού. Η προσέγγιση του επιπέδου τομής συνίσταται ανεπιφύλακτα για τη βελτιστοποίηση των παραπάνω μηχανισμών και την προσαρμοστικότητά τους στις ποικιλομορφίες των χαρακτηριστικών των υποθαλάσσιων δικτύων.

Στα υπόγεια δίκτυα το κανάλι εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους (αμμώδες ή βραχώδες) ανάλογα με το χώρο τοποθέτησης του δικτύου, ιδίως αν γίνεται εμφάνιση νερού. Οι χαμηλές συχνότητες διαδίδονται με χαμηλότερες απώλειες έναντι των υπέργειων. Παρόλ' αυτά η χρήση χαμηλών συχνοτήτων περιορίζει ανεπανόρθωτα το εύρος ζώνης για τη μετάδοση των δεδομένων. Αυτός ο παράγοντας σε συνδυασμό με τις υψηλές απώλειες των υπόγειων καναλιών και τη σημαντικότητα διατήρησης ενέργειας αποτελούν σημαντικότερη πρόκληση

## 16. Συμπεράσματα

Τα υποθαλάσσια δίκτυα βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης όπου τίθενται πολλά θέματα προκλήσεων όπου καλούνται να ξεπεράσουν προκειμένου να μπορέσουν να γίνουν τόσο εφαρμόσιμα όσο και αποδοτικά.

Η ιδέα των υπόγειων δικτύων αφορά δίκτυα εξ' ολοκλήρου θαμμένα κάτω από τη γη. Οι υπάρχουσες εφαρμογές τέτοιων δικτύων αξιοποιούνται για την ανίχνευση – παρακολούθηση του εδάφους στη γεωργία. Τα πλεονεκτήματά τους έναντι των υπέργειων δικτύων αφορούν: α) απόλυτη δικτυακή απόκρυψη, β) ευκολία εγκατάστασης, γ) βελτιωμένες χρονογραμμές των δεδομένων.

Τα πλεονεκτήματα αυτά ωθούν στην ανάπτυξη νέων υπόγειων εφαρμογών ξεκινώντας από την παρακολούθηση ενός αθλητικού γηπέδου και ενός κήπου ή αγρού όπου οι επιφανειακοί αισθητήρες θα μπορούσαν να εμποδίζουν την υπέργεια δραστηριότητα έως στρατιωτικές εφαρμογές όπως συνοριοφύλαξη όπου απαιτείται οι αισθητήρες να είναι μη ανιχνεύσιμοι για την αποφυγή της απενεργοποίησής τους.



## Βιβλιογραφία

- [1] Akyildiz, I. & Stuntebeck, E. 2006, 'Wireless underground sensor networks: Research challenges', *Ad Hoc Networks*, vol.4, no.6, pp. 669-686
- [2] Akyildiz, I., Pompili, D. & Melodia, T. 2005, 'Underwater acoustic sensor networks: research challenges', *Ad Hoc Networks*, vol.3, no.3, pp. 257-279
- [3] R. Cardell-Oliver, K. Smettem, M. Kranz, K. Mayer. 2005 'A reactive soil moisture sensor network: design and field evaluation, *International Journal of Distributed Sensor Networks* 1 (2), pp. 149–162.
- [4] A. Sheth, K. Tejaswi, P. Mehta, C. Parekh, R. Bansal, S. Merchant, T. Singh, U.B. Desai, C.A. Thekkath, K. Toyama. 2005, 'Senslide: a sensor network based landslide prediction system, in: *SenSys'05: Proceedings of the 3rd international conference on embedded networked sensor systems*', pp. 280–281.
- [5] T. Dubaniewicz, J. Chilton, H. Dobroski. 1991, 'Fiber optics for atmospheric mine monitoring, in: *Industry Applications' Society Annual Meeting, Conference Record of the 1991 IEEE*, pp. 1243–1249
- [6] G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Welsh, O. Marcillo, J. Johnson, M. Ruiz, J. Lees. 2006, 'Deploying a wireless sensor network on an active volcano', *IEEE Internet Computing* 10 (2), pp. 18–25.
- [7] S. Cheekiralla. 2004. 'Development of a wireless sensor unit for tunnel monitoring' Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [8] C. Park, Q. Xie, P. Chou, M. Shinozuka. 2005, 'Duranode: wireless networked sensor for structural health monitoring, in: *IEEE Sensors 2005*', pp. 277–280.
- [9] T. Voigt, H. Ritter, J. Schiller. 2003, 'Utilizing solar power in wireless sensor networks, in: *IEEE Local Computer Networks*', pp. 416–422.
- [10] X. Jiang, J. Polastre, D. Culler. 2005, 'Perpetual environmentally powered sensor networks, in: *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*', pp. 463–468.
- [11] J. Burrell, T. Brooke, R. Beckwith. 2004, 'Vineyard computing: sensor networks in agricultural production', *IEEE Pervasive Computing* 3 (1), pp. 38–45.
- [12] T.A. Milligan. 2005, 'Modern Antenna Design', second ed., IEEE Press.
- [13] N. Peplinski, F. Ulaby, M. Dobson. 1995, 'Dielectric properties of soils in the 0.3–1.3-GHz range', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33 (3), pp. 803–807.



- [14] E. Neuenschwander, D. Metcalf. 1942, 'A study of electrical earth noise, *Geophysics* 7 (1)',pp. 69–77.
- [15] T.W. Miller, B. Borchers, J.M. Hendrickx, S. Hong, L.W. Dekker, C.J. Ritsema. 2002, 'Effects of soil physical properties on GPR for landmine detection, in: Fifth International Symposium on Technology and the Mine Problem'.
- [16] J. Sojdehei, P. Wrathall, D. Dinn. 2001, 'Magneto-inductive (MI) communications, in: OCEANS, 2001'. MTS/IEEE Conference and Exhibition, vol. 1, pp. 513–519.
- [17] K. Ikrath, W. Schneider. 1968, 'Communications via seismic waves employing 80-Hz resonant seismic transducers', *IEEE Transactions on Communications* 16 (3),pp. 439–444.
- [18] X. Yang, K.G. Ong, W.R. Dreschel, K. Zeng, C.S. Mungle, C.A. Grimes. 2002, 'Design of a wireless sensor network for long-term, in-situ monitoring of an aqueous environment', *Sensors* 2,pp. 455–472.
- [19] E.M. Sozer, M. Stojanovic, J.G. Proakis. 2000, 'Underwater acoustic networks', *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25 (1),pp. 72–83.
- [20] V. Ravelomanana. 2004, 'Extremal properties of three-dimensional sensor networks with applications', *IEEE Transactions on Mobile Computing* 3 (3),pp. 246–257.
- [21] Second field test for the AOSN program, Monterey Bay August 2003, Available from <<http://www.mbari.org/aosn/MontereyBay2003/MontereyBay2003Default.htm>>.
- [22] R. Jurdak, C.V. Lopes, P. Baldi. 2004, 'Battery lifetime estimation and optimization for underwater sensor networks, in: Sensor Network Operations', IEEE Press, New York.
- [23] R.J. Urick.1983, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill.
- [24] S.A.L. Glegg, R. Pirie, A. LaVigne. 2000, 'A study of ambient noise in shallow water', Florida Atlantic University Technical Report.
- [25] M. Stojanovic. 2003, 'Acoustic (underwater) communications', in: J.G. Proakis (Ed.), *Encyclopedia of Telecommunications*, Wiley, New York.