



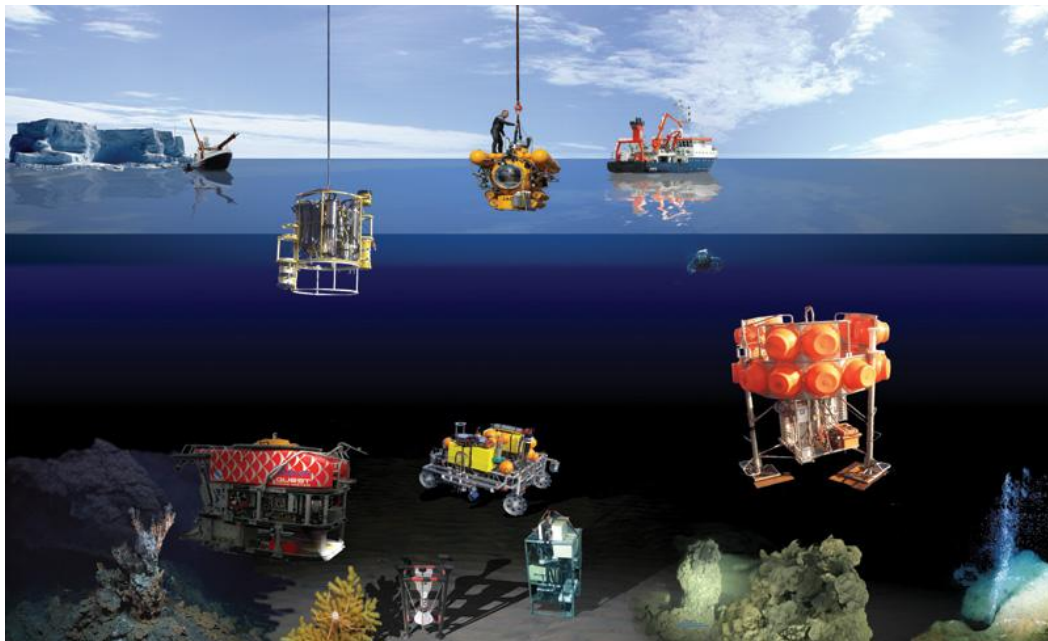
ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**Αξιολόγηση της απόδοσης των αλγορίθμων σχεδιασμού πορείας σε αυτόνομα
υποβρύχια οχήματα.**

Ελένη Πολίτη



Αθήνα, 2017



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

**Γεώργιος Δημητρακόπουλος
(Επιβλέπων)**

**Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής,
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

**Χρήστος Μιχαλακέλης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής,
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

**Μάρα Νικολαΐδου
Καθηγήτρια, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής,
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

Η Ελένη Πολίτη

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1)** Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2)** Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

The deep sea is the largest museum on earth, it contains more history than all the museums on land combined, and yet we're only now penetrating it.

Robert Ballard, Ocean explorer

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Πληροφορικής και Τηλεματικής» του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεματικής του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, επίκουρο καθηγητή του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεματικής του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, κ Γεώργιο Δημητρακόπουλο για την πολύτιμη καθοδήγηση και τις εύστοχες παρατηρήσεις του καθ'όλη τη διάρκεια υλοποίησης της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επίκουρο καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Τσερπέ για τις προτάσεις του σχετικά με την ανάπτυξη αλγορίθμων πορείας. Τις ευχαριστίες μου εκφράζω τέλος στον επίκουρο καθηγητή, κ Χρήστο Μιχαλακέλη και την καθηγήτρια και πρύτανη του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, κ. Μάρα Νικολαΐδου που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμερούς επιτροπής.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	8
Abstract	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
Κίνητρο.....	13
Σκοπός της εργασίας	13
Επισκόπηση δομής	14
ΚΕΦ.1: ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ (THE INTERNET OF THINGS).....	15
1.1 Ορισμός.....	15
1.2 Βασική αρχιτεκτονική.....	16
1.2.1 Επίπεδο αντικειμένων	17
1.2.2. Επίπεδο διασύνδεσης	18
1.2.3. Επίπεδο ενδιάμεσου λογισμικού (middleware)	18
1.2.4. Επίπεδο εφαρμογών (application layer)	19
1.3 Εφαρμογή και ανάπτυξη	19
ΕΙΚ. 3. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΙΟΤ (IERC)	20
1.3.1 Έξυπνες πόλεις.	20
ΕΙΚ. 4. ΈΞΥΠΝΗ ΠΟΛΗ ΚΑΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ	21
1.3.Έξυπνα σπίτια, κτίρια και υποδομές	21
1.3.4 Έξυπνη ενέργεια	22
1.3.2 Έξυπνες μεταφορές και κινητικότητα (smart transport and mobility)	23

1.3.4. Έξυπνη υγεία, ευεξία και ευγηρία (smart health, wellness and well ageing)	24
1.3.6 Έξυπνη βιομηχανία.....	25
ΚΕΦ.2: INTERNET OF UNDERWATER THINGS	27
2.1. Εισαγωγή	27
2.2 Αρχιτεκτονική και τεχνολογίες δικτύωσης.....	28
ΕΙΚ.6. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΙΟΥΤ.....	29
2.2.1 Φυσικό επίπεδο	29
2.2.1.1 ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	29
ΕΙΚ.7. ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΒΑΘΗ ΤΟΥ ΩΚΕΑΝΟΥ	30
2.2.2 Επίπεδο δικτύου	32
ΕΙΚ.8. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΟΜΒΩΝ DBR	33
ΕΙΚ.9. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ VBF	34
2.2.3 Επίπεδο εφαρμογών	35
2.3 Υποβρύχια αυτόνομα οχήματα AUVs	36
ΕΙΚ.10. ΗΛΙΑΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟ ΑΥΝ	37
2.3.1 Σχεδιασμός υποβρυχίου	37
2.3.2. Βασικές αρχές πρόωσης υποβρυχίων.....	38
2.3.3 Η τεχνολογία των AUVs.	38
ΚΕΦ.3: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΟΡΕΙΑΣ	40
3.1. Εισαγωγή	40
3.2 Το πρόβλημα του χώρου	41
3.2.1. Διατύπωση του προβλήματος.....	43
3.2.2. Κριτήρια απόδοσης αλγορίθμου	43
3.3 Αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής.....	45
3.3.1 Αλγόριθμοι αναζήτησης γράφου	46
3.3.2 Μέθοδος δυναμικού πεδίου (potential field).....	46
ΚΕΦ.4: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB.....	48

4.1 Εισαγωγή	48
4.2. Αναπαράσταση του χώρου	48
4.2.1. Συνθήκες προσομοίωσης	49
4.2.2. Αναπαράσταση εμποδίου	49
4.3 Υλοποίηση με Αλγόριθμο A*	51
4.3.1 Περιγραφή A*	51
4.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης	53
4.3.3 Συμπεράσματα	54
4.4 Υλοποίηση με Αλγόριθμο RRT	54
4.4.1 Περιγραφή RRT.....	54
4.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης RRT	55
4.4.3 Συμπεράσματα	56
4.5 Υλοποίηση με Αλγόριθμο Τεχνητού Δυναμικού Πεδίου	57
4.5.1 Περιγραφή αλγορίθμου Τεχνητού Δυναμικού Πεδίου	57
4.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης αλγορίθμου APF	57
4.5.3 Συμπεράσματα	58
ΚΕΦ.5: ΕΠΙΛΟΓΟΣ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	59
Βιβλιογραφία	

Περίληψη

Το IoT συνδέει ενσωματωμένες συσκευές, αισθητήρες και ενεργοποιητές με τον παγκόσμιο ιστό. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, μέχρι το 2020 περίπου 50 δισεκατομμύρια συσκευών θα είναι συνδεδεμένες με το internet. Οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις στο τομέα του Internet of Things συνεχίζουν να προσελκύουν την αμέριστη προσοχή της ερευνητικής κοινότητας ενώ προβλέπεται και η περαιτέρω άνθιση των οικοσυστημάτων του IoT, με εφαρμογές που εκτείνονται από τα ευφυή συστήματα στην οδήγηση, στις έξυπνες πόλεις, την έξυπνη υγεία και πολλά άλλα που στοχεύουν στην βελτίωση της καθημερινότητας των χρηστών.

Σε αυτό το πλαίσιο, ένα ακόμη πεδίο όπου το IoT βρίσκει πρόσφορο έδαφος είναι ο υποβρύχιος κόσμος. Συγκεκριμένα το Internet of Underwater Things (IoUT) ορίζεται ως ένα παγκόσμιο δίκτυο ευφών διασυνδεδεμένων υποβρύχιων αντικειμένων τα οποία έχουν ως στόχο τη παρακολούθηση των τεράστιων και ανεξερεύνητων όγκων των ωκεανών. Τα ασύρματα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων (Underwater- Acoustic Sensor Networks) αποτελούν το ιδανικό όχημα για το έλεγχο των ωκεανών που σήμερα αποτελούν το 70% της επιφάνειας της γης. Τα δίκτυα αυτά περιλαμβάνουν ένα πλήθος ευφών αντικειμένων, ανάμεσα τους τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUVs) δηλαδή υποβρύχια ρομπότ τα οποία μπορούν να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις χωρίς να απαιτείται η συνδρομή ενός χειριστή. Η μεγάλη κατηγορία των οχημάτων αυτών συνιστά σε μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα (AUVs), σε μη αυτόνομα τηλεχειριζόμενα ROVs ενώ σε στρατιωτικές εφαρμογές τα οχήματα αυτά χαρακτηρίζονται απλώς αυτόνομα υποβρύχια (UUVs). Οι δυσκολίες που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα οχήματα αυτά είναι πολυάριθμες και οφείλονται κυρίως στην έντονα δυναμική φύση των υποβρύχιων συνθηκών. Το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης τροχιάς μέσα σε ένα δυναμικό θαλάσσιο περιβάλλον βρίσκεται στο επίκεντρο της έρευνας σχετικά με τα AUVs. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος αλγορίθμων που επιλύουν το πρόβλημα αναζήτησης του βέλτιστου μονοπατιού που θα επιτρέπει αποστολές μεγαλύτερης διάρκειας και αυτονομίας.

Στην εργασία αυτή θα παρουσιάσουμε τη σύγκριση μεταξύ τριών αλγορίθμων βέλτιστης διαδρομής, των A*, RRT και APF (Artificial potential field) που προτείνονται για υποβρύχια περιβάλλοντα. Υιοθετήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια εμποδίων για την εκτίμηση του χρόνου αποστολής και του μήκους τροχιάς για υποβρύχιο όχημα AUV. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αξιολογούν την απόδοση των προαναφερθέντων αλγορίθμων ενώ παράλληλα θέτουν τις βάσεις για περαιτέρω έρευνα στον τομέα αυτόν.

Λέξεις κλειδιά: Διαδίκτυο των πραγμάτων, υποβρύχιας επικοινωνίας, αυτόνομα υποβρύχια οχήματα, αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής.

Abstract

The Internet of Things (IoT) connects embedded devices, sensors and actuators to the Internet. Estimations show that around 50 billion devices will be connected to the Internet in 2020. Latest advances in the Internet of Things (IoT) domain continue to attract immense research effort fostering their take up further enabling the emergence of IoT ecosystems with applications ranging from autonomous driving, over smart cities, to health care, that improve the quality of users life.

An area where IoT finds prosperous ground is the underwater area. In particular, the Internet of Underwater Things (IoUT) is defined as a world-wide network of smart interconnected underwater objects that enables to monitor vast unexplored water areas. Underwater Acoustic sensor Networks share a significant role in monitoring the ocean basins that today cover more than 705 of the earth surface. In such a context, an autonomous underwater vehicle (AUV) is a robot which travels underwater without requiring input from an operator. AUVs constitute part of a larger group of undersea systems known as unmanned underwater vehicles, a classification that includes non-autonomous remotely operated underwater vehicles (ROVs). In military applications AUVs are more often referred to simply as unmanned undersea vehicles (UUVs). Such vehicles often need to operate under dynamic ocean currents and environments characterized by several physical constraints. The problem of uncovering the right trajectory in the dynamic underwater environments has been on the cutting edge of research technologies on AUVs. In the past decades there has been a number of algorithms introduced for solving the path planning problem with respect to the duration of missions and the level of autonomy.

In this paper we present a comparison of three path planning algorithms, A*, RRT and Artificial Potential Field. 3 different scenarios are implemented in order to evaluate time and length of trajectory for an AUV. Simulation results compare the performance of the aforementioned algorithms and set the scene for future research activities in the field.

Keywords: Internet of things, autonomous underwater vehicles, path planning algorithms

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικ.1. Αριθμός διασυνδεδεμένων συσκευών ανά χρήστη	σ.16
Εικ.2. Αρχιτεκτονική του IoT	σ.17
Εικ. 3. Στρατηγικές ερευνητικές Προτάσεις του IoT.....	σ.20
Εικ. 4. Έξυπνη πόλη και συνιστώσες της.....	σ.21
Εικ.5. Μοντέλο αναφοράς του έξυπνου δικτύου.....	σ.24
Εικ.6. Αρχιτεκτονική του IoUT	σ.30
Εικ.7. Διάδοση του ηχητικού κύματος σε διάφορα βάθη.....	σ.31
Εικ.8. Αρχιτεκτονική πολλαπλών κόμβων DBR.....	σ.34
Εικ.9. Πρωτόκολλο VBF.....	σ.35
Εικ.10. Ηλιακά τροφοδοτούμενο AUV.....	σ.38
Εικ.11.Τεχνολογίες βελτίωσης των AUVs.....	σ.40
Εικ.12. Απεικόνιση διαδρομής οχήματος.....	σ.44
Εικ.13. Τα δυναμικά πεδία.....	σ.49
Εικ.14. Τετραγωνικό πλέγμα.....	σ.51
Εικ.15. Σχεδιασμός διαδρομής με A^* με κοίλο εμπόδιο.....	σ.54
Εικ.16. Προσανατολισμός κινήσεων του ρομπότ.....	σ.55
Εικ.17. Εξάπλωση του RRT.....	σ.58

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίν. 1 Αλγόριθμοι σχεδίαση διαδρομής AUV	σ.43
Πίν.2: Αποτελέσματα με A^*	σ.56
Πίν.3: Αποτελέσματα με RRT.....	σ.59
Πίν.4: Αποτελέσματα με APF.....	σ.61

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ.1: Στάδια για την ανάπτυξη αλγορίθμου	σ.47
Σχ.2: Διάταξη εμποδίων.....	σ.52

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κίνητρο

Η βαθύτερη κατανόηση και εξερεύνηση των ωκεανών αποτέλεσε από αρχαιοτάτων χρόνων πόλο έλξης για την ανθρωπότητα. Ο παγκόσμιος ωκεανός αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για το καθορισμό του κλίματος, αφού παράγει το 85% του συνολικού οξυγόνου της ατμόσφαιρας ενώ δεσμεύει ταυτόχρονα πάνω από τη μισή ποσότητα όλων των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Επιπλέον οι θάλασσες και οι ωκεανοί αποτελούν ζωτική κινητήρια δύναμη της παγκόσμιας οικονομίας συνεισφέροντας σε τομείς όπως η ναυτιλία και η αλιεία. Ο υδάτινος κόσμος καλύπτει περισσότερο από το 70% της γης ωστόσο γνωρίζουμε ελάχιστα για τη μορφολογία του βυθού και την βιοποικιλότητα των θαλάσσιων οικοσυστημάτων που τον συνθέτουν.

Το οικοσύστημα του Internet of Underwater Things (IoUT) αποτελεί ελπιδοφόρο λύση για την εξερεύνηση των υδάτινων κόσμων που παραμένουν ανεξερεύνητοι μέχρι σήμερα. Ανήκοντας στη μεγαλύτερη έννοια του Internet of Things, το IoUT περιγράφεται ως ένα δίκτυο έξυπνων αντικειμένων που συλλέγουν και αναμεταδίδουν πληροφορίες μέσα στον ωκεανό. Οι συσκευές αυτές είναι ικανές να συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον τους, να τα ερμηνεύουν και να τα διαχειρίζονται με τη βοήθεια του παγκόσμιου ιστού και με το συνδυασμό ισχυρών τεχνολογιών εντοπισμού και ενσωματωμένων αισθητήρων.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Στο υπόβαθρο του IoUT, ένα δυναμικό ασύρματο δίκτυο υποβρύχιων αισθητήρων (Underwater Wireless Sensor Network) απαρτίζεται από ετερογενείς συσκευές ικανές να αλληλεπιδρούν και να μεταδίδουν τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται κάτω από πολυάριθμους φυσικούς περιορισμούς που χαρακτηρίζουν τα υποβρύχια κανάλια. Φαινόμενα όπως υψηλή απώλεια διαδρομής, αυξημένος θόρυβος μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης και διεύρυνση Doppler (Doppler spread) αναστέλλουν την επικοινωνία απαιτώντας χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης για την επίτευξη αξιόπιστης επικοινωνίας. Αναπόσπαστο κομμάτι του οικοσυστήματος του IoUT αποτελούν τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUVs) τα οποία μπορούν να διανύουν μεγάλες αποστάσεις υποβρυχίως χωρίς να απαιτούν τον ανθρώπινο χειρισμό. Τέτοιου είδους οχήματα τελεσφορούν σε στρατιωτικές, εμπορικές ή ακόμα και βιομηχανικές εφαρμογές. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος

αλγορίθμων για την εύρεση της κατάλληλης διαδρομής (path planning) του υποβρύχιου οχήματος κατά τη πλοήγηση τους στις θαλάσσιες περιοχές. Το πρόβλημα του προγραμματισμού πορείας για ένα υποβρύχιο όχημα AUV είναι στην ουσία η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής ανάμεσα σε ένα σύνολο διαδρομών ώστε το όχημα να πραγματοποιήσει τη συντομότερη διαδρομή μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον και να φτάσει στον προορισμό του στον ελάχιστο χρόνο.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε μία προσομοίωση με σκοπό να αξιολογήσει την απόδοση τριών αλγορίθμων που προτείνονται, για το πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής οχήματος AUV κατά την πλοήγηση του σε θαλάσσια ύδατα. Επιλέχθηκαν οι αλγόριθμοι: A*, RRT και Artificial Potential Field με σκοπό την πραγματοποίησης της εύρεσης του βέλτιστου μονοπατιού σε μία περιοχή τετραγωνικών διαστάσεων. Η διαδικασία εκτελέστηκε για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εμποδίων ενώ για τον περιορισμό των υπολογιστικών απαιτήσεων του συστήματος εξετάσαμε το πρόβλημα σε δύο διαστάσεις και όχι στο χώρο. Η ανωτέρω προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab 2013a.

1.3 Επισκόπηση δομής

Η παρούσα εργασία δομείται ως εξής. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφουμε εκτενώς όλα τα στοιχεία που απαρτίζουν το Διαδίκτυο των Πραγμάτων καθώς και τις εφαρμογές με τις οποίες συνδέεται. Ακολούθως, στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσουμε την έννοια του Internet of Underwater things και πώς αυτή εκτείνεται σε ασύρματα δίκτυα υποβρύχιων αισθητήρων και αυτόνομα υποβρύχια οχήματα AUVs, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά τους. Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται το πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου μονοπατιού για τα υποβρύχια οχήματα και ορίζονται όλες εκείνες οι φυσικές παράμετροι που το συνοδεύουν, ενώ ταυτόχρονα γίνεται μία επισκόπηση των αλγορίθμων που έχουν προταθεί. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η υλοποίηση τριών αλγορίθμων για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανωτέρω προσομοίωσης. Τέλος, ακολουθεί η παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά την πραγματοποίηση της προσομοίωσης καθώς και τα κύρια σημεία που πρέπει ένας αναγνώστης να συγκρατήσει από αυτήν.

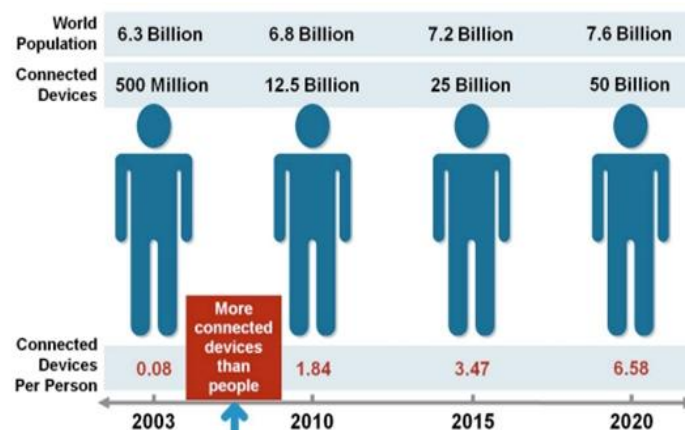
ΚΕΦ.1: Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (The Internet of Things)

1.1 Ορισμός

Από την αρχική του εμφάνιση ως ένα παγκόσμιο δίκτυο επικοινωνίας για την ανταλλαγή πληροφοριών μέχρι και σήμερα, το Διαδίκτυο αποτέλεσε μια τεράστια τεχνολογική επανάσταση κατάφεροντας να κατακλύσει τον κόσμο της επικοινωνίας και της πληροφορίας. Η ανάπτυξη της δεύτερης γενιάς υπηρεσιών Διαδικτύου, των τεχνολογιών web2.0 στις αρχές του αιώνα, έδωσε την δυνατότητα στους χρήστες να αλληλεπιδρούν να παρεμβαίνουν και να διαμορφώνουν το περιεχόμενο των ιστοσελίδων. Παράλληλα έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες πλατφόρμες, οι οποίες έχουν ως επίκεντρο τον ίδιο τον χρήστη, δίνοντας του την δυνατότητα να συμμετέχει ο ίδιος στην ανάπτυξη του περιεχομένου και στη σχεδίαση των διαδικτυακών εφαρμογών. Μια νέα διάσταση στον κόσμο της πληροφορίας και των τηλεπικοινωνιών φιλοδοξεί να φέρει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things). Σύμφωνα την διεθνή ένωση τηλεπικοινωνιών ITU, ορίζεται ως:

“μια παγκόσμια υποδομή για την κοινωνία της πληροφορίας, η οποία προσφέρει προηγμένες υπηρεσίες, διασυνδέοντας φυσικά και ψηφιακά αντικείμενα με βάση ήδη υπάρχουσες αλλά και εξελισσόμενες τεχνολογίες της πληροφορίας και της επικοινωνίας” [1].

Πρόκειται στην ουσία για ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων συσκευών και αντικειμένων με μοναδική ψηφιακή ταυτότητα και ενσωματωμένες τεχνολογίες επικοινωνίας, τα οποία συνδέονται τόσο μεταξύ τους, όσο και με βάσεις δεδομένων. Τα αντικείμενα, εφοδιάζονται με κατάλληλους αισθητήρες και εξοπλισμό διασύνδεσης και μέσα από τη χρήση κατάλληλων και διαλειτουργικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, αποτυπώνουν φυσικά φαινόμενα σχετικά με το περιβάλλον τους και τα μετατρέπουν σε ροές δεδομένων με απώτερο στόχο την εξυπηρέτηση καθημερινών αναγκών.



Εικ.1. Αριθμός διασυνδεδεμένων συσκευών ανά χρήστη, Cisco 2011

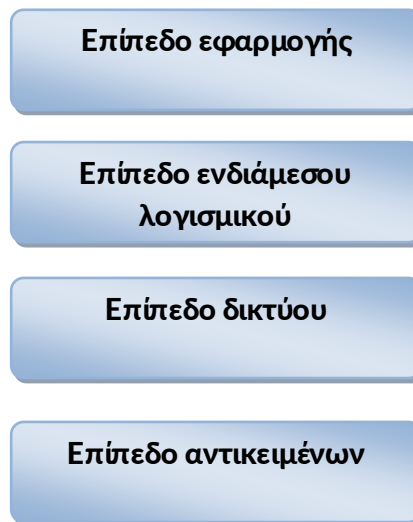
Βασική ιδέα του είναι ότι τα αντικείμενα μπορούν να παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην καθημερινότητα των ανθρώπων και με τη χρήση ενσωματωμένης τεχνολογίας να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και να λαμβάνουν σύνθετες αποφάσεις για τους χρήστες. Η ανάπτυξη τεχνολογιών όπως η νανοηλεκτρονική, το cloud computing, η ευρεία χρήση του πρωτοκόλλου IP στις τηλεπικοινωνίες αλλά και η αποδοτικότερη διαχείριση των ενεργειακών πόρων και η ανάπτυξη των ευρυζωνικών επικοινωνιών, συνέβαλλαν στην ραγδαία εξάπλωση του Internet of Things σε ποικίλους τομείς της καθημερινότητας όπως φαίνεται στους παρακάτω αριθμούς. Σύμφωνα με πρόβλεψη της κορυφαίας εταιρείας ερευνών Gartner, περίπου 6.4 δισεκατομμύρια διασυνδεδεμένα αντικείμενα θα βρίσκονται σε χρήση για το 2016, αριθμός που αντιστοιχεί σε 5.5 εκατομμύρια νέες συνδέσεις τη μέρα περίπου [2]. Ο αριθμός αυτός πολλαπλασιάζεται για το 2020, φτάνοντας τα 20.8 δισεκατομμύρια διασυνδεδεμένων αντικειμένων η Cisco προβλέπει ότι για το 2020 οι διασυνδεδεμένες με το διαδίκτυο συσκευές θα φτάσουν τα 50 δισεκατομμύρια [3].

Το σύνθετο περιβάλλον του Internet of things περιλαμβάνει πολλά περισσότερα από κινητά τηλέφωνα και ηλεκτρονικούς υπολογιστές με πρόσβαση στον παγκόσμιο ιστό. Στην πραγματικότητα πρόκειται για ένα δίκτυο συσκευών και υπηρεσιών, όπου τα κτίρια, οι οικιακές συσκευές, τα ρούχα, τα οχήματα, οι δρόμοι των πόλεων και πολλά άλλα, ενσωματώνονται μέσα σε μια εννιαία υποδομή, αυτό που ονομάζουμε Διαδίκτυο των Πραγμάτων ή Διαδίκτυο των Πάντων (Internet of Everything) [4]. Κύριος σκοπός του δικτύου αυτού είναι η επίτευξη της σύγκλισης του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου σε ένα “έξυπνο” περιβάλλον όπου όλα τα πράγματα (things) μπορούν να αισθάνονται, να αναλύουν δεδομένα και να υιοθετούν λειτουργίες με κύριο στόχο τη βελτίωση της ζωής των χρηστών, παρέχοντας ασφαλή περιβάλλοντα και φιλικότερες προς το χρήστη υπηρεσίες.

1.2 Βασική αρχιτεκτονική

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων είναι στην ουσία ένα πολυπλοκό σύστημα δικτύων παγκόσμιας εμβέλειας με δυνατότητες αυτο διαμόρφωσης κατα δυναμικό τρόπο, που βασίζει τις λειτουργίες του σε διαλειτουργικά πρότυπα και πρωτόκολλα επικοινωνίας. Το βασικό του χαρακτηριστικό, η ετερογένεια των αντικειμένων που το συνθέτουν, αποτελεί στην ουσία την πρόκληση για την επίτευξη της διασύνδεσης των διαφορετικών μονάδων που το απαρτίζουν αλλά και πληροφοριών που αυτές διαχειρίζονται. Για να κατανοήσουμε την έκταση και τις εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων, είναι σκόπιμο να αναφερθούμε στην αρχιτεκτονική του. Στο

παρακάτω σχήμα φαίνονται τα τέσσερα επίπεδα που συνθέτουν τη βασική αρχιτεκτονική του IoT, το επίπεδο αντικειμένων, το επίπεδο διασύνδεσης, το επίπεδο πλατφόρμας υπηρεσιών και το επίπεδο εφαρμογών ενώ παρακάτω θα κάνουμε μία σύντομη αναφορά για καθένα από αυτά [5].



Εικ. 2. Η αρχιτεκτονική του IoT

1.2.1 Επίπεδο αντικειμένων

Στο στρώμα αυτό περιλαμβάνονται όλα τα έξυπνα αντικείμενα που συνθέτουν το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και συνδέονται σε αυτό. Πρωταρχικό ρόλο στη συλλογή, μετάδοση και επεξεργασία πληροφοριών παίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks). Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από πολυάριθμους κόμβους με καθένα απο αυτούς να συνδέεται σε έναν ή περισσότερους αισθητήρες. Οι αισθητήρες αυτοί πραγματοποιούν μετρήσεις φυσικών παραμέτρων που σχετίζονται με το περιβάλλον τους, όπως για παράδειγμα θερμοκρασία, υγρασία, βαρομετρική πίεση, συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, κα. Επιπλέον, λειτουργικό κλειδί για την καταγραφή των αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο στο IoT αποτελεί η τεχνολογία της ασύρματης αναγνώρισης ραδιοκυμάτων, RFID. Τα συστήματα ραδιοσυχνικής αναγνώρισης αποτελούνται αφενός από ετικέτες (Tags) που συνδέονται με τα αντικείμενα προσδίδοντας τους ένα μοναδικό αναγνωριστικό και αφετέρου από αναγνώστες (Readers) που ανιχνεύουν τα κατάλληλα σήματα και πυροδοτούν την μετάδοση της πληροφορίας από τις ετικέτες [6]. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες RFID

προσφέρουν μια ολοκληρωμένη λύση για τον εντοπισμό των αντικειμένων στο στρώμα αυτό και για την ανίχνευση της κατάστασης και των πληροφοριών που φέρουν. Ο σχεδιασμός των λύσεων αυτών βέβαια, απαιτεί τα συστήματα να είναι αξιόπιστα και ευέλικτα αλλά και ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικά. Γι' αυτό και οι αισθητήρες λειτουργούν ως επί το πλείστον σε χαμηλή ισχύ και με χαμηλό ρυθμό δεδομένων. Οι τεχνολογίες που υποστηρίζονται στο στρώμα αυτό είναι μεταξύ άλλων: Zigbee, ZWave, ANT S Wi-Fi, κ.α.

1.2.2. Επίπεδο διασύνδεσης

Περιλαμβάνει όλους εκείνους τους τρόπους με τους οποίους γίνεται η διασύνδεση των δεδομένων που συλλέγουν οι αισθητήρες και οι έξυπνες συσκευές με τις πύλες του δικτύου αλλά και τον απαραίτητο έλεγχο της δικτύωσης. Οι ετερογενείς συσκευές που συνθέτουν το IoT στηρίζουν τη λειτουργία τους σε διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Γι' αυτό το λόγο και τα πρότυπα των δικτύων σχεδιάζονται ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν τις διαφορετικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη μετάδοση, όπως απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, πιθανότητα σφάλματος και καθυστέρηση μεταφοράς, με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών. Επιπλέον, η διαχείριση του τεράστιου όγκου δεδομένων του IoT απαιτεί τα δίκτυα να εξασφαλίζουν αξιοπιστία κατά τη μετάδοση παρέχοντας ταυτόχρονα και ενεργειακά αποδοτικές λύσεις.

1.2.3. Επίπεδο ενδιάμεσου λογισμικού (middleware)

Εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στη σύγκλιση του επιπέδου των τεχνολογιών με το επίπεδο των εφαρμογών στο οικοσύστημα του IoT αναλαμβάνει το επίπεδο ενδιάμεσου λογισμικού. Ο όρος αναφέρεται σε ένα στρώμα λογισμικού που παρεμβάλεται ανάμεσα στο επίπεδο των συσκευών και στο επίπεδο των εφαρμογών που έχει στόχο να αποκρύψει την πολυπλοκότητα και την ετερογένεια των δικτύων και των συσκευών που συνθέτουν το IoT. Οι βασικές λειτουργίες που πραγματοποιούνται εδώ είναι η αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων, η ανάκτηση πληροφοριών, η εξόρυξη και προστασία δεδομένων καθώς και η προστασία της ιδιωτικότητας. Τα τελευταία χρόνια οι αρχιτεκτονικές που προτείνονται σε αυτό το επίπεδο ακολουθούν την προσέγγιση της αρχιτεκτονικής προσανατολισμένης στις υπηρεσίες (Service Oriented Architectures). Ο όρος περιγράφει ένα προγραμματιστικό μοντέλο στο οποίο η λογική του συστήματος υλοποιείται σε πολλά μικρά ανεξάρτητα κομμάτια που ονομάζονται υπηρεσίες (services). Αυτά τα κομμάτια μπορούν να κληθούν με συγκεκριμένες παραμέτρους και με συγκεκριμένη σειρά ώστε όλα μαζί να υλοποιήσουν μια εφαρμογή. Ωστόσο το καθένα από αυτά μπορεί να εκτελείται σε διαφορετικό φυσικό ή εικονικό χώρο διευθύνσεων, δηλαδή η λογική

τους δε διαχωρίζεται απλά, αλλά κατανέμεται. Η κυριότερη συνεισφορά της αρχιτεκτονικής αυτής είναι ότι επιτρέπει στις υπηρεσίες και στις συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους, είτε μεταδίδοντας δεδομένα είτε συντονίζοντας από κοινού δραστηριότητες, επιτυγχάνοντας έτσι έναν από τους μεγαλύτερους στόχους του IoT που είναι η αυτο-οργάνωση των αντικειμένων. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι ότι αποσυνδέει εντελώς τις προδιαγραφές μιας υπηρεσίας από την υλοποίησή της. Έτσι οι επιχειρησιακές λειτουργίες πραγματοποιούνται ταχύτερα, εξοικονομώντας παράλληλα χρήσιμους για το σύστημα πόρους [7].

1.2.4. Επίπεδο εφαρμογών (application layer)

Στην κορυφή της διαστρωμάτωσης του IoT βρίσκεται το επίπεδο εφαρμογών. Το επίπεδο αυτό διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα αλλά στην πραγματικότητα είναι στενά εξαρτημένο από τις λειτουργίες του επιπέδου ενδιαμέσου λογισμικού. Εδώ πραγματοποιείται η υλοποίηση των εφαρμογών και συνεπώς η διασύνδεση του χρήστη με το δίκτυο διανομής και με τα δεδομένα των αντικειμένων του IoT. Οι πολυάριθμες εφαρμογές στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων ταξινομούνται ανάλογα με το επιχειρηματικό μοντέλο, τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης του δικτύου ακόμα και αν πραγματοποιούνται ασύγχρονα ή σε πραγματικό χρόνο.

1.3 Εφαρμογή και ανάπτυξη

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία ανάπτυξη των αγορών μαζί με την τεχνολογική εξέλιξη έχουν αλλάξει δραματικά τον παγκόσμιο χάρτη των αναγκών των ανθρώπων και της κοινωνίας. Η κύρια δύναμη πίσω από το όραμα του IoT είναι ο υψηλός αντίκτυπος που θα έχει σε διάφορες πτυχές της καθημερινότητας και της συμπεριφοράς των εν δυνάμει χρηστών του. Η κεντρική του ιδέα, η ανάπτυξη δηλαδή ενός παγκόσμιου δικτύου έξυπνων αντικειμένων και μοναδικά ανιχνεύσιμων, δημιουργεί ευφυείς και καινοτόμες λύσεις σε πολλά ζητήματα της καθημερινότητας σε ατομικό, επιχειρησιακό αλλά και σε κοινωνικό επίπεδο.

Οι τομείς στους οποίους το IoT βρίσκει εφαρμογή είναι πολυάριθμοι και ετερογενείς, δίνοντας τη δυνατότητα σε ολοένα και περισσότερες συσκευές στο μέλλον να συνδεθούν σε αυτό. Σε συνδυασμό με αναπτυσσόμενες τεχνολογίες όπως η νεφοϋπολογιστική (Cloud computing) και η ανάλυση δεδομένων μεγάλου όγκου (Big data analytics) το IoT φιλοδοξεί να αλλάξει τον παγκόσμιο επιχειρηματικό χάρτη, φέρνοντας ρηξικέλευθες αλλαγές στο τρόπο με τον οποίον χρησιμοποιούμε τα αγαθά, υπηρεσίες αλλά και τα υπάρχοντα επιχειρηματικά μοντέλα. Από τις

πολύαριθμες εφαρμογές του IoT παρακάτω θα περιγράψουμε τις πιο καινοτόμες από αυτές και σημαντικότερες ως προς το πεδίο της έρευνας.



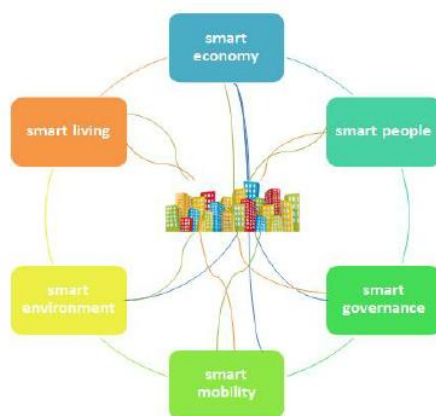
Εικ. 3. Στρατηγικές ερευνητικές προτάσεις του IoT (IERC)

1.3.1 Έξυπνες πόλεις.

Οι έξυπνες πόλεις αποτελούν τμήμα του ευρύτερου οικοσυστήματος του IoT. Περιγράφουν περιβάλλοντα τα οποία με τη συμβολή των ψηφιακών τεχνολογιών δίνουν πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη καινοτόμων υπηρεσιών και πρόσβαση σε ένα πλήθος δεδομένων σε πραγματικό χρόνο βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής των κατοίκων. Σύμφωνα με προβλέψεις, περίπου το 70% του πληθυσμού της γης (περίπου 6 εκατομμύρια άνθρωποι) αναμένεται να ζει σε μεγάλα αστικά κέντρα μέχρι το 2050 [8]. Η ραγδαία επέκταση των πόλεων και αύξηση του πληθυσμού τους, θα επιφέρει νέες προκλήσεις για την καθημερινότητα και την κινητικότητα των κατοίκων. Το γεγονός αυτό επιτάσσει την ανάπτυξη λύσεων για την βιωσιμότητα των μεγάλων αστικών κέντρων.

Η έξυπνη πόλη αναλαμβάνει να επιλύσει σύνθετα προβλήματα που σχετίζονται με τις υποδομές, την ανθρώπινη συμπεριφορά, την τεχνολογία, την οικονομία και τις κοινωνικές και πολιτικές δομές μέσα από τη διασύνδεση εκατομμυρίων συσκευών με τον παγκόσμιο ιστό κάνοντας πραγματικότητα το όραμα του Internet of things. Σε αυτό το πλαίσιο, όλες οι κύριες υποδομές, οι δρόμοι, τα λιμάνια, τα αεροδρόμια, οι τηλεπικοινωνίες, η ενέργεια, το νερό ενσωματώνονται σε ένα ενιαίο δίκτυο διαχείρισης και υπόκεινται σε συνεχή παρακολούθηση. Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναλαμβάνουν το ρόλο της συλλογής δεδομένων και στη

συνέχεια μέσα από κατάλληλες τηλεπικοινωνιακές υποδομές και τεχνολογίες ασύρματων δικτύων (3G, WiFi, LTE) [9] τα δεδομένα αυτά υπόκεινται σε επεξεργασία. Σκοπός είναι η αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων, ο σωστότερος σχεδιασμός συντήρησης των υποδομών, η εξασφάλιση της ασφάλειας των κατοίκων. Στην αρχιτεκτονική μιας έξυπνης πόλης ενσωματώνονται πολλές εφαρμογές όπως η έξυπνη υγεία, έξυπνη διακυβέρνηση, έξυπνο περιβάλλον κ.α., αποδεικνύοντας πως οι τεχνολογίες του IoT δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους αλλά αποτελούν μία ενιαία οντότητα (Εικόνα 4). Οι έξυπνες πόλεις είναι σύγχρονες αστικές περιοχές που δημιουργούν βιώσιμα περιβάλλοντα και προσφέρουν υψηλής ποιότητας υπηρεσίες προς τους πολίτες αναβαθμίζοντας την καθημερινότητα τους.



Εικ. 4. Έξυπνη πόλη και συνιστώσες της

1.3. Έξυπνα σπίτια, κτίρια και υποδομές

Τα έξυπνα σπίτια είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με το περιβάλλον της έξυπνης πόλης, ένα όραμα σύγκλισης του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου, όπου καθημερινές συσκευές και υποδομές επικοινωνούν μεταξύ τους προσφέροντας υπηρεσίες στον άνθρωπο. Οι σύγχρονες αυτές υποδομές αξιοποιούν τα οικιακά συστήματα αυτοματισμού (Building Automation Systems) για τον έλεγχο λειτουργιών μέσα στον οικιακό χώρο πραγματοποιώντας αυτόματα βασικές διεργασίες όπως για παράδειγμα η ρύθμιση της θερμοκρασίας και του φωτισμού στο εσωτερικό του σπιτιού [10]. Έτσι, δημιουργούν ένα οικιακό περιβάλλον το οποίο έχει ομαδοποιήσει, οργανώσει και αυτοματοποιήσει τις λειτουργίες του στο μέγιστο δυνατό βαθμό απαιτώντας από τον κάτοικο του τη λιγότερη δυνατή προσπάθεια για τη διαχείριση του.

Η λειτουργία του έξυπνου σπιτιού βασίζεται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN). Οι αισθητήρες μπορούν να ενσωματωθούν σχεδόν σε όλες τις ηλεκτρικές συσκευές, όπως για παράδειγμα τηλεοράσεις, κινητά τηλέφωνα, θερμοστάτες, μετρητές ενέργειας, συστήματα ελέγχου φωτισμού, συστήματα άρδρευσης και συντήρησης πισίνων. Επιπλέον μπορούν να

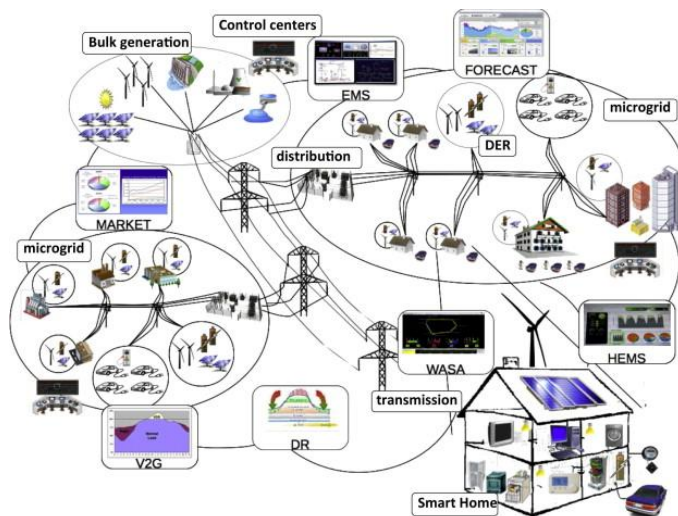
τοποθετηθούν σε στρατηγικές θέσεις του σπιτιού όπως τοίχοι, παράθυρα, πόρτες, οικιακές συσκευές κ.ά. ώστε να παρακολουθούν και να καταγράφουν δεδομένα. Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων παρακολουθεί τις καθημερινές συνήθειες των χρηστών ή ελέγχει βασικές λειτουργίες που συμβαίνουν στο σπίτι, όπως για παράδειγμα τα συστήματα κλιματισμού, φωτισμού και ασφαλείας, ενώ μέσα από κατάλληλες εφαρμογές και πρωτόκολλα IP δίνει στη δυνατότητα στον χρήστη να αλληλεπιδρά με τα δεδομένα διαμορφώνοντας κάθε λεπτό τις βασικές διεργασίες που πραγματοποιούνται στο σπίτι. Ο ιδιοκτήτης μπορεί να έχει πρόσβαση στα δεδομένα κάθε στιγμή, μέσω διαδικτύου, του κινητού, ή του προσωπικού ψηφιακού βοηθού (PDA). Τα έξυπνα σπίτι και τα ευφυή συστήματα που ενσωματώνουν, προσφέρουν στους χρήστες μια πληθώρα δυνατοτήτων με απώτερο στόχο την βελτίωση της καθημερινότητας και την εξοικονόμηση ενέργειας.

1.3.4 Έξυπνη ενέργεια

Η προστασία του περιβάλλοντος και η ενεργειακή βιωσιμότητα είναι ζητήματα που απασχολούν τον πλανήτη τις τελευταίες δεκαετίες. Με την τεχνολογία να εξελίσσεται ραγδαία και τις ενεργειακές απαιτήσεις της κοινωνίας να αυξάνονται, φαίνεται επιτακτική η ανάγκη για αποδέσμευση από τις ορυκτές πηγές ενέργειας όπως οι γαιάνθρακες, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Εκτός από την καλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη λύση στα ενεργειακά προβλήματα του πλανήτη φαίνεται πως θα δώσει και η σωστότερη διαχείριση του δικτύου ενέργειας. Το ενεργειακό δίκτυο του μέλλοντος εκτός από τον παραδοσιακό του ρόλο, αυτόν την μεταφοράς ενέργειας, ενσωματώνει στη λειτουργία του τις τεχνολογίες πληροφορίας και επικοινωνίας (ICTs), αποκτώντας ευφυή χαρακτηριστικά.

Το "έξυπνο δίκτυο" (Smart Grid) είναι ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο κυρίαρχο ρόλο παίζουν τα ευφυή αντικείμενα (αισθητήρες, ενεργοποιητές, έξυπνοι μετρητές ενσωματωμένοι υπολογιστές κ.ά.). Με τις ικανότητες που διαθέτουν, συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και πληροφορίες σχετικές με τα πρότυπα ενεργειακής χρήσης ενώ παράλληλα ελέγχουν την κατάσταση των διανεμημένων πόρων ενέργειας και των άλλων τμημάτων που απαρτίζουν το ηλεκτρικό δίκτυο ενέργειας. Η περεταίρω ανάλυση των ετερογενών αυτών δεδομένων οδηγεί στη λήψη αποφάσεων για τη βέλτιστη λειτουργία και βιωσιμότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [11]. Βασικό ρόλο σε αυτές τις ενέργειες παίζει και το σύστημα μετάδοσης των πληροφοριών που περιλαμβάνει τους τρόπους δικτύωσης, επικοινωνίας και τα διαλειτουργικά πρωτόκολλα, το οποίο αφενός υποστηρίζει τη

διασυνδεσιμότητα μεταξύ συσκευών και υποσυστημάτων του δικτύου και αφετέρου επιτρέπει τη διανομή των πληροφοριών μέσα στο ηλεκτρικό σύστημα.



Εικ.5. Μοντέλο αναφοράς του έξυπνου δικτύου

1.3.2 Έξυπνες μεταφορές και κινητικότητα (smart transport and mobility)

Η διασύνδεση των οχημάτων με τον παγκόσμιο ιστό δίνει νέες προοπτικές στο κλάδο των μεταφορών με κύρια κατεύθυνση τη βελτίωση των μετακινήσεων. Τα ευφυή συστήματα μεταφορών (Intelligent Transportation Systems) αποτελούν δυναμικό τομέα στο οικοσύστημα του IoT, που αξιοποιεί τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις της πληροφορίας και των επικοινωνιών για να παρέχει υψηλή προστιθέμενη αξία για τους χρήστες των μεταφορικών μέσων, καθιστώντας τις μεταφορές στο σύνολό τους πιο ασφαλείς, αποτελεσματικές και φιλικές προς το περιβάλλον. Ο υπερπληθυσμός των μεγάλων αστικών κέντρων συμβάλλει στην κυκλοφοριακή συμφόρηση των οδικών δικτύων αυξάνοντας την κατανάλωση καυσίμων, την εκπομπή ρύπων προς το περιβάλλον και την πιθανότητα ατυχημάτων στους δρόμους [12]. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, η ενσωμάτωση ευφύων συστημάτων στις μεταφορές φαντάζει μονόδρομος για τη βελτίωση των συνθηκών στου οδικούς άξονες των πόλεων και την ελαχιστοποίηση ατυχημάτων.

Οι εφαρμογές των ITS επεκτείνονται πέρα από τις οδικές, σε εναέριες και θαλάσσιες μεταφορές προσφέροντας υπηρεσίες σε επιβάτες αλλά και στον τομέα των μεταφορών εμπορευμάτων. Ηλεκτρονικές συσκευές, υπολογιστές, δορυφόροι άλλα και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μαζί με την ενσωμάτωση τεχνολογιών της πληροφορίας επιτρέπουν τη συλλογή και επεξεργασία πληροφοριών ανάμεσα στους φορείς παροχής υπηρεσιών κυκλοφορίας και στους χρήστες των οδικών υποδομών με κυρίαρχα μοντέλα επικοινωνίας την επικοινωνία vehicle to vehicle (V2V)

που αφορά στη διασύνδεση του οχήματος με άλλα οχήματα στο δρόμο και την επικοινωνία vehicle to infrastructure (V2I) που αφορά στη διασύνδεση του οχήματος με τη υποδομή (φανάρια, δρόμοι, κ.α.). Κάποιες από τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται είναι οι εξής:

- ο Εποπτεία των οδικών δικτύων (συνθήκες ασφαλείας, καιρικές συνθήκες, εποπτεία τεχνικού χαρακτήρα)
- ο Εντοπισμός μεμονωμένων οχημάτων (αποφυγή συγκρούσεων, αναγνώριση εμποδίων, ειδοποίηση του οδηγού)
- ο Εποπτεία και διαχείριση των διαδικασιών μεταφοράς (ειδοποίηση του οδηγού, ρύθμιση της ροής κυκλοφορίας, αλλαγή των παραμέτρων οδήγησης)

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα ευφυή συστήματα μεταφορών σε παγκόσμιο επίπεδο είναι πολλά, μεταξύ άλλων η ρύθμιση της κυκλοφορίας στα οδικά δίκτυα, η μείωση της συμφόρησης, η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων προς το περιβάλλον. Αποτελούν σύμφωνα με τον οργανισμό IoT European cluster (IERC) μία αναπτυσσόμενη τεχνολογική τάση που αναμένεται να βελτιώσει σημαντικά την καθημερινότητα των ανθρώπων και να δημιουργήσει ένα σύνθετο σύστημα υπηρεσιών γύρω από το χώρο των μεταφορών και της κινητικότητας [13].

1.3.4. Έξυπνη υγεία, ευεξία και ευγηρία (smart health, wellness and well ageing)

Οι τεχνολογίες της πληροφορίας και της τεχνολογίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ποικίλους τρόπους στην υγεία, όπως για την επικοινωνία των ασθενών με τους επαγγελματίες υγείας, την παροχή ιατρικής φροντίδας εξ αποστάσεως, την τηλεϊευστήριξη ηλεκτρονικών ιατρικών διαγνωστικών αρχείων ή τη συνταγογράφηση φαρμάκων. Τα ευφυή συστήματα παρακολούθησης της υγείας σημειώνουν ταχύτερη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Οι εφαρμογές τους επικεντρώνονται κατα κυριο λόγο στη νοσοκομειακή περίθαλψη, με επίκεντρο τις περιπτώσεις ασθενών που χρήζουν στενής ιατρικής παρακολούθησης. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες [14].

- ο Συστήματα παρακολούθησης υγείας εξ αποστάσεως (Remote health monitoring systems), τα οποία αναφέρονται σε πληροφοριακά συστήματα που ανταλλάσσουν ιατρικά δεδομένα. Τα συστήματα έχουν αναπτυχθεί για να προσφέρουν αρωγή στους ασθενείς και να βελτιώσουν την παροχή υγειονομικής περίθαλψης όταν τους χωρίζει μεγάλη απόσταση από τους επαγγελματίες υγείας. Τα ζωτικής σημασίας ιατρικά δεδομένα καταγράφονται με τη χρήσης τεχνολογιών της πληροφορίας και μεταδίδονται, συνήθως σε πραγματικό χρόνο από μία απομακρυσμένη περιοχή στους γιατρούς μιας κλινικής επιτρέποντας την παρακολούθηση της υγείας του ασθενή.

- Κινητά συστήματα παρακολούθησης υγείας (Mobile health monitoring systems) που αναφέρονται σε κινητά τηλέφωνα, Personal digital assistants (PDAs), υπολογιστές και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές που επιτρέπουν στους ασθενείς να έρχονται σε επικοινωνία με επαγγελματίες υγείας και να λαμβάνουν υγειονομική περίθαλψη. Η χρήση τους προϋποθέτει ελάχιστες απαιτήσεις σε λογισμικό ενώ παράλληλα προσφέρει άμεση και γρήγορη μετάδοση δεδομένων, γεγονός που καθιστά τα συστήματα αυτά ιδανικά για περιπτώσεις που χαρακτηρίζονται επείγουσες. Παρ' όλα αυτά, τα προβλήματα κατά τη διάδοση που χαρακτηρίζουν τις ασύρματες επικοινωνίες καθώς και η αδυναμία των κινητών συσκευών να παραμείνουν σε επικοινωνία για αρκετή ώρα, μπορεί να προκαλέσουν δυσκολίες κατά την μετάδοση των δεδομένων.
- Φορετά συστήματα παρακολούθησης υγείας (Wearable health monitoring systems). Ο όρος αναφέρεται σε μια σειρά ευφών συσκευών που μπορούν να φορεθούν στο σώμα και να ενσωματωθούν σε ρούχα, υφάσματα, ρολόγια, επιθέματα, περιβραχιόνια κ.α. Οι συσκευές αυτές εξοπλίζονται με ειδικούς αισθητήρες και επιτρέπουν την παρακολούθηση ζωτικών λειτουργιών που σχετίζονται με την υγεία του φορέα τους ενώ παράλληλα δίνουν τη δυνατότητα συγκέντρωσης εξαιρετικά σημαντικών πληροφοριών ως προς τις συνήθειες των χρηστών.

Η εφαρμογή έξυπνων λύσεων στην υγεία στα πλαίσια του IoT επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην παραδοσιακή σχέση γιατρού-ασθενούς. Τα οφέλη που προσκομίζονται είναι μεταξύ άλλων η βελτίωση της ποιότητας ιατρικής περίθαλψης, η αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος υγείας, η μείωση του φόρτου εργασίας στα νοσοκομεία και κατά συνέπεια μείωση των δαπανών για την υγεία [15].

1.3.6 Έξυπνη βιομηχανία

Το IoT σημειώνει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια με τις τεχνολογίες του να έχουν παρεισφρήσει και στον τομέα της βιομηχανίας και της παραγωγής. Ο όρος *βιομηχανικό internet of things* (Industrial IoT) αφορά στην έξυπνη διασύνδεση του μηχανολογικού εξοπλισμού των εργοστασίων με τη χρήση των τεχνολογιών της πληροφορίας και της επικοινωνίας. Οι έξυπνες βιομηχανίες υλοποιούν τις τεχνολογικές καινοτομίες του IoT διαμορφώνοντας συνεργίες συσκευών που συνδέονται σε αυτό ενώ παράλληλα επικεντρώνουν σε νέες και ευφυείς μεθόδους παραγωγής και σε μια αγορά όπου τα δεδομένα ανάμεσα σε προϊόντα και μηχανολογικές υπηρεσίες ανταλλάσσονται σε πραγματικό χρόνο [16]. Ευφυή χαρακτηριστικά προσαρτώνται σε ένα πλήθος φυσικών αντικειμένων όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές ενσωματωμένοι επεξεργαστές, με την ταυτόχρονη ανάπτυξη λογισμικού για τη

διαχείριση των ροών δεδομένων [17]. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται ο βαθμός αυτοματοποίησης βασικών λειτουργιών της παραγωγικής διαδικασίας όπως ο μηχανισμός πρόβλεψης λαθών, η πυροδότηση διαδικασιών συντήρησης και η παροχή αναλυτικών μεθόδων για την μεγιστοποίηση της παραγωγής. Το IoT στον βιομηχανικό τομέα προσφέρει πολυάριθμες ευκαιρίες ανάπτυξης στον τομέα της παραγωγής με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας σε ένα παγκόσμιο περιβάλλον καινοτομίας.

ΚΕΦ.2: Internet of Underwater Things

2.1. Εισαγωγή

Το Internet of Underwater Things (IoUT) δικαίως αναγνωρίζεται ως μία επανάσταση στο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών. Αποτελείται από ένα δίκτυο έξυπνων διασυνδεδεμένων αντικειμένων που είναι τοποθετημένα μέσα στον ωκεανό που έχουν σαν κύριο σκοπό την ψηφιακή παρακολούθηση και την καταγραφή ωκεανογραφικών και άλλων παραμέτρων. Οι συσκευές αυτές είναι ικανές να συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον τους, να τα ερμηνεύουν και να τα διαχειρίζονται με τη βοήθεια του παγκόσμιου ιστού και με το συνδυασμό ισχυρών τεχνολογιών εντοπισμού και ενσωματωμένων αισθητήρων. Κάθε υποβρύχια φυσική οντότητα συνοδεύεται από ένα εικονικό αντικείμενο και μια πλούσια και παγκόσμια προσβάσιμη συλλογή δεδομένων ικανά να περιγράψουν τις φυσικές ιδιότητες την προέλευση του αντικειμένου καθώς και ένα πλήθος παραμέτρων. Τα δεδομένα αυτά, διαθέσιμα σε πραγματικό χρόνο υλοποιούν την Human to Thing (H2T) και Thing to Thing (T2T) επικοινωνία φέρνοντας την επανάσταση στην διαχείριση των υδάτινων και υποβρύχιων πόρων.

Ο παγκόσμιος ωκεανός καταλαμβάνει περίπου το 71% της επιφάνειας της γης ενώ οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία των επιφανειακών στρωμάτων του παίζουν καθοριστικό ρόλο για τη διαμόρφωση του κλίματος. Το γεγονός αυτό καθιστά σημαντική την παρακολούθηση του καθώς κατά ένα μεγάλο ποσοστό παραμένει άγνωστος και ανεξερευνήτος. Πρόσφατα, έχει υπάρξει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τον έλεγχο των υδάτινων περιβαλλόντων (συμπεριλαμβανομένων των ωκεανών, ποταμών, λιμνών και δεξαμενών, κ.λπ.) για επιστημονική εξερεύνηση, εμπορική εκμετάλλευση και προστασία από κάθε είδους επίθεση που δέχεται στην εποχή που ζούμε. Το ιδανικό όχημα για αυτόν τον τύπο εκτενούς ελέγχου είναι ένα δικτυωμένο υποβρύχιο ασύρματο διανεμημένο σύστημα αισθητήρων, το υποβρύχιο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (Underwater- Acoustic Sensor Network) [18]. Ένα εξελικτικό UW-ASN παρέχει μια ελπιδοφόρο λύση για να ερευνήσει αποτελεσματικά και να παρατηρήσει τα υδάτινα περιβάλλοντα που λειτουργούν κάτω από πολυάριθμους φυσικούς περιορισμούς. Κατ' αρχήν, τα υποβρύχια κανάλια παρουσιάζουν υψηλή απώλεια διαδρομής, αυξημένο θόρυβο, φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών, μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης και διεύρυνση Doppler (Doppler spread) φαινόμενα που αναστέλλουν την επικοινωνία ώστε να απαιτούνται χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης για την επίτευξη αξιόπιστης επικοινωνίας. Επιπλέον, οι απαιτήσεις διάδοσης στο υποβρύχιο περιβάλλον συντελούν σε χωρικές και χρονικές μεταβολές του σήματος απαιτώντας το

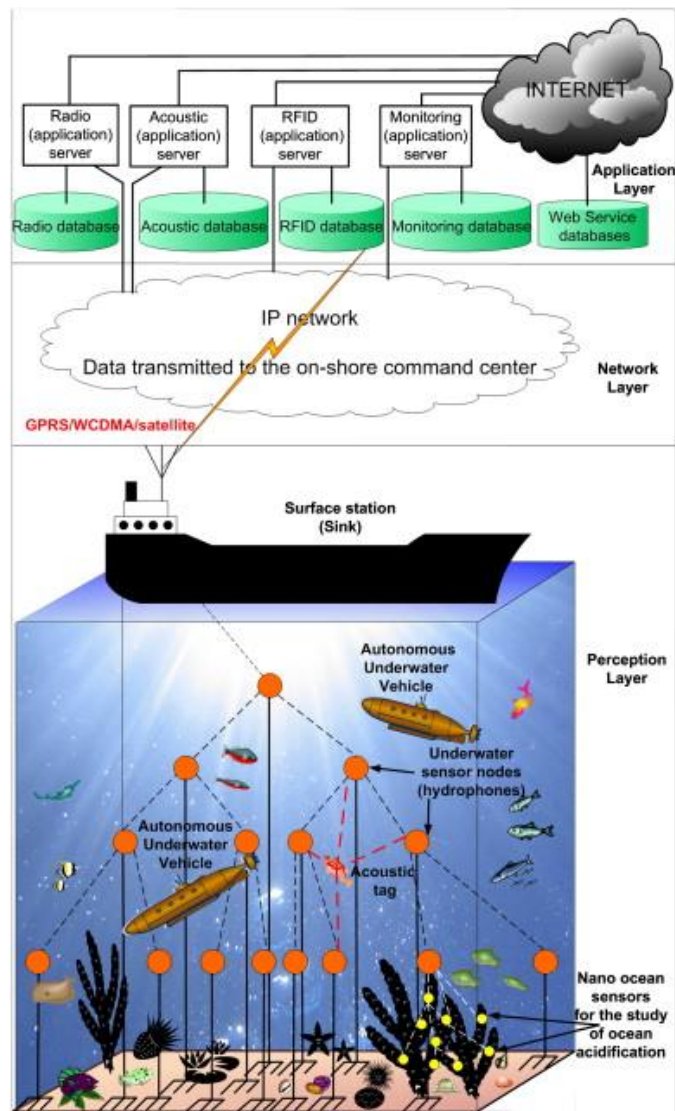
σχεδιασμό των κατάλληλων πρωτοκόλλων για την αποτελεσματική μετάδοση των πληροφοριών [19].

2.2 Αρχιτεκτονική και τεχνολογίες δικτύωσης.

Η δόμή του IoUT βασίζεται στην ανάπτυξη υποβρύχιων δικτύων αισθητήρων (underwater wireless sensor networks). Η αρχιτεκτονική του συνίσταται σε τρία βασικά στρώματα [20] τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

- *Φυσικό στρώμα* (physical /perception layer): Στο στρώμα αυτό ανήκουν όλα τα ευφύη αντικείμενα του οικοσυστήματος του IoUT, αυτόνομα οχήματα, κόμβοι αισθητήρων, ετικέτες ραδιοσυχνικής αναγνώρισης. Εδώ γίνεται η ταυτοποίηση των αντικειμένων καθώς και η μετάδοση και συλλογή δεδομένων.
- *Στρώμα δικτύου* (network layer): Το στρώμα δικτύου απαρτίζεται από ένα σύνολο τεχνολογιών όπως ενσύρματα/ασύρματα δίκτυων, ο παγκόσμιος ιστός, συστήματα διοίκησης δικτύων, πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους κ.α. Βασική λειτουργία του στρώματος είναι η επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων που συλλέγονται στο φυσικό στρώμα.
- *Στρώμα εφαρμογών* (application layer): Περιλαμβάνει το σύνολο των ευφιών λύσεων στις οποίες βρίσκει εφαρμογή η τεχνολογία του IoUT με πρωταρχικό στόχο την εξυπηρέτηση των αναγκών του χρήστη.

Παρακάτω γίνεται μια εκτενής περιγραφή όλων εκείνων των στοιχείων που απαρτίζουν την γενικότερη έννοια του Internet of Underwater Things με άξονα την αρχιτεκτονική του αναλύοντας παράλληλα τις τεχνικές πτυχές που προκύπτουν. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το οικοσύστημα του IoUT καθώς και οι οντότητες που το απαρτίζουν.



Εικ.6. Αρχιτεκτονική του IoUT

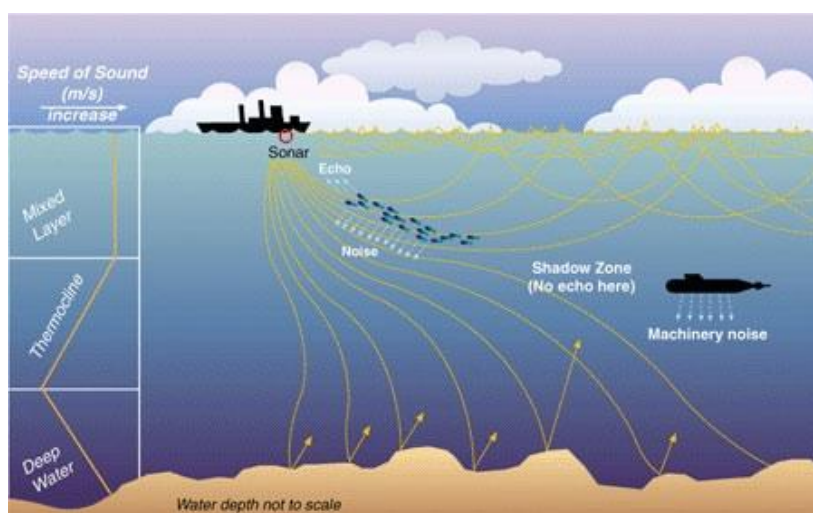
2.2.1 Φυσικό επίπεδο

2.2.1.1 Υποβρύχια ακουστικά κανάλια και διάδοση του ηχητικού κύματος

Ένα κινητό και εξελικτικό δίκτυο υποβρύχιων αισθητήρων (UWSN) είναι σημαντικά διαφορετικό από οποιοδήποτε επίγειο δίκτυο αισθητήρων. Η φύση των υποβρύχιων ακουστικών καναλιών προσδίδει χαρακτηριστικά στις υποβρύχιες επικοινωνίες τα οποία είναι δύσκολα προσπελάσιμα. Τα ηχητικά κύματα είναι ο πλέον κατάλληλος τρόπος μετάδοσης πληροφοριών στα υποβρύχια δίκτυα, έχοντας επικρατήσει έναντι άλλων τρόπων επικοινωνίας [21]. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να καλύψουν μόνο μικρές αποστάσεις (μικρότερες των 100 m) καθώς λόγω της αγωγιμότητας του θαλασσινού νερού διαδίδονται σε χαμηλές συχνότητες (30-300 Hz) οι οποίες απαιτούν μεγάλες κεραίες υψηλής ισχύος μετάδοσης. Στην περίπτωση των οπτικών συνδέσεων έχουμε ικανοποιητική μετάδοση σε επικοινωνίες point to point και σε

κοντινές αποστάσεις αλλά λόγω της ευαισθησίας του οπτικού σήματος σε φαινόμενα σκέδασης είναι ακατάλληλο για χρήση σε υδάτινα περιβάλλοντα. Τα ακουστικά κανάλια παρέχουν αξιόπιστη μετάδοση σήματος σε περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων και σε συνθήκες έντονων σκεδάσεων που χαρακτηρίζουν τα *ad hoc* και υψηλής πυκνότητας υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων. Παρά την υπεροχή και την αποδοχή τους από την ευρύτερη ακαδημαϊκή κοινότητα, παρουσιάζουν πολλά μειονεκτήματα κυρίως λόγω της φύσης των μέσων διάδοσης τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

Αρχικά είναι σκόπιμο να αναφερθούμε στην φυσική διάσταση του ηχητικού κύματος ως αποτέλεσμα ταλάντωσης των μορίων ενός μέσου. Ως ηχητικό κύμα ορίζουμε μια περιοδική διαταραχή που οφείλεται σε μεταβολές πίεσης ενός συμπιεστού μέσου και διαδίδεται με την ταχύτητα ήχου. Τα ηχητικά κύματα μεταφέρουν μηχανική ενέργεια προς μία κατεύθυνση ενώ η ταχύτητά τους διαμορφώνεται περίπου από 1450 ως 1540 m/s ανάλογα με τις διακυμάνσεις στη θερμοκρασία, στην πίεση και στην αλατότητα που σημειώνονται στα διαφορετικά βάθη των θαλάσσιων υδάτων. Στην πραγματικότητα η διεύθυνση διάδοσης του ηχητικού κύματος θα διαθλάται με κατεύθυνση προς τα πάνω ή προς τα κάτω ανάλογα με το βάθος στο οποίο βρίσκεται. [22]



Εικ.7. Διάδοση του ηχητικού κύματος σε διάφορα βάθη του ωκεανού

Τα υποβρύχια ακουστικά κανάλια χαρακτηρίζονται από μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης, περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης και υψηλή πιθανότητα λάθους. Επιπλέον επηρεάζονται από την στροβίλωση που προκαλούν τα παλιρροιακά κύματα, τα αιωρούμενα ιζήματα αλλά και τους μικροοργανισμούς στο βυθό της θάλασσας και τον θαλάσσιο θόρυβο. Μία έκφραση για την μέτρηση την εξασθένιση του ηχητικού κύματος κατά τη διάδοση εξηγείται παρακάτω. Ονομάζουμε απώλεια διάδοσης του ήχου την μείωση της έντασης κατά μήκος της διαδρομής που

ακολουθεί το κύμα από τον πομπό ως το δέκτη η οποία υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση [23] :

$$\alpha = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} \left[\frac{db}{km} \right]$$

όπου

$$SS = 10 \log r$$

$$TL = SS + a \cdot 10^{-3}$$

όπου f είναι η συχνότητα σε kHz, r είναι η απόσταση σε m, SS είναι ο παράγοντας σφαιρικής εξάπλωσης και a είναι ο παράγοντας εξασθένησης του κύματος.

Παρακάτω θα αναφερθούμε στα κυριότερα μειονεκτήματα της διάδοσης των ηχητικών κυμάτων στα υδάτινα περιβάλλοντα τα οποία συνοψίζονται ως εξής:

- Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό είναι περίπου 1500 m/s δηλαδή 5 τάξεις μεγέθους μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός. Συνεπώς η ζεύξη πομπού με δέκτη θα χαρακτηρίζεται από μεγάλη καθυστέρηση και διακυμάνσεις του σήματος κατά τη διάδοση αλλά και από σχετικά μεγάλη επίδραση του φαινομένου Doppler λόγω σχετικής κίνησης.
- Διακυμάνσεις στη φάση και στην τάξη μεγέθους οδηγούν σε υψηλότερη πιθανότητα λάθους συγκριτικά με τη διάδοση των ραδιοκυμάτων, γεγονός που επιβάλλει τη χρήση Προωθημένων Κωδίκων διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction Codes)
- Με την αύξηση της συχνότητας, παρατηρείται αύξηση της εξασθένησης του ηχητικού σήματος, φαινόμενο που περιορίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης.
- Φαινόμενα πολλαπλών σκεδάσεων του σήματος και παρεμβολών στα υποβρύχια ακουστικά κανάλια που οφείλονται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στη δραστηριότητα πλοίων ή τη μετάδοση ηχητικών κυμάτων έξω από την επιφάνεια της θάλασσας δυσχεράνουν τη μετάδοση των πληροφοριών.

Τα αντικείμενα που απαρτίζουν το IoUT διαθέτουν ευφυή χαρακτηριστικά και σε συνδυασμό με σύγχρονες τεχνολογίες δικτύωσης έχουν την ικανότητα να αλληλεπιδρούν και να μεταδίδουν τα δεδομένα που συλλέγουν. Πρόκειται για τα παρακάτω αντικείμενα:

- *Υποβρύχια οχήματα (AUVs)* τα οποία είναι αυτόνομα, μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα που μπορούν να πλέουν στην επιφάνεια, στο μέσο ή στο πυθμένα των ωκεανών ερευνώντας το υδάτινο περιβάλλον. Η μεγαλύτερη πρόκληση στα οχήματα αυτού του είδους είναι μέσα από αυτόνομα συστήματα πλοήγησης, ο προσδιορισμός της ακριβούς τοποθεσίας τους και η αποφυγή συγκρούσεων με άλλα υποβρύχια οχήματα.

- *Υποβρύχιοι αισθητήρες (Underwater sensors)* οι οποίοι ανάλογα με το μέγεθος τους διακρίνονται σε μικρής κλίμακας (microsensors) και ακόμα μικρότερης κλίμακας (nanosensors). Αισθητήρες και υποβρύχια οχήματα λειτουργούν συνεργατικά για την παρακολούθηση και καταγραφή ωκεανογραφικών διαδικασιών συντελώντας με αυτο το τρόπο στην εξερεύνηση του υδάτινου οικοσυστήματος. Τα δεδομένα που συλλέγονται, αποστέλλονται σε πλωτήρες που βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας και από εκεί μέσω ραδιοκυμάτων σε σταθμούς στη ξηρά για περαιτέρω ανάλυση.
- *Ετικέτες ηχητικές/ραδιοσυχνοτήτων (acoustic /radio tags)* είναι συσκευές μικρού μεγέθους που επιτρέπουν την μετάδοση σήματος είτε μέσω ηχητικών κυμάτων () είτε μέσω ραδιοκυμάτων (tags). Οι συσκευές αυτές εμφυτεύονται σε διάφορα είδη ψαριών ή θαλάσσιων οργανισμών επιτρέποντας την καταγραφή των μεταναστευτικών τους συνθηκών αλλά και την παρακολούθηση ωκεανογραφικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία και η αλατότητα των υδάτων.

Για την ανάπτυξη των υποβρύχιων δικτύων αισθητήρων λαμβάνονται υπόψιν δύο παράμετροι: πυκνότητα και κινητικότητα. Με βάση τα παραπάνω μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός τους σε :

- α) *στατικά δίκτυα*: αποτελούνται από μεμονωμένους κόμβους που συνδέονται με αποβάθρες,αγκυροβολημένους πλωτήρες η με τον πυθμένα της θάλασσας.
- β) *ημιστατικά δίκτυα*: δηλαδή δίκτυα πλωτήρων που χρησιμοποιούνται για κάποιο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια αδρανοποιούνται για ώρες και μέρες.
- γ) *κινητά δίκτυα*: περιλαμβάνουν αισθητήρες ενσωματωμένους σε οχήματα AUVs ή μη τροφοδοτούμενες ανεμότρατες.

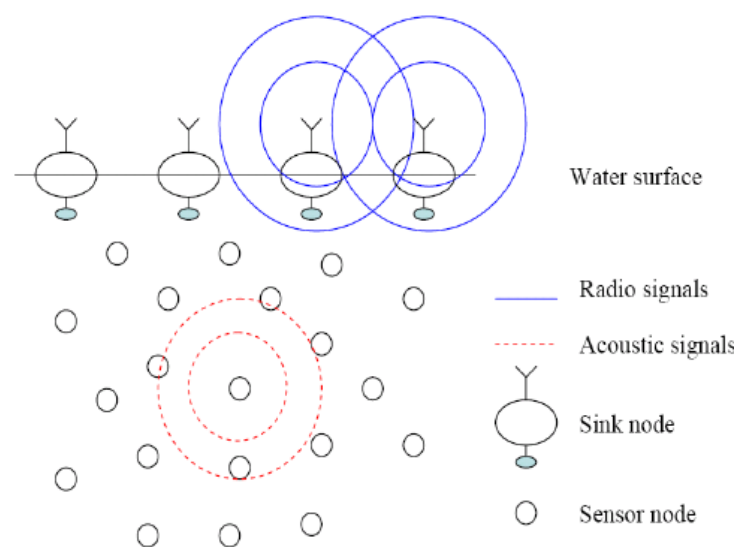
2.2.2 Επίπεδο δικτύου

Στο στρώμα αυτό γίνεται η συλλογή όλων των δεδομένων που καταγράφονται από τους κόμβους και η μετάδοση τους σε ένα σταθμό στην επιφάνεια της γης. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι προβληματική καθώς τις περισσότερες φορές οι κόμβοι δεν επικοινωνούν απευθείας ενώ κατά τη μετάδοση παρουσιάζονται και αρκετές παρεμβολές. Γι' αυτό το λόγο κάθε ζεύγος κόμβων επικοινωνεί με τη λειτουργία πολλαπλών βημάτων (multi-hop) στην οποία συμμετέχουν ενδιάμεσοι κόμβοι για την προώθηση της πληροφορίας στον τελικό προορισμό. Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα δρομολόγησης (routing protocols) για την επιλογή της κατάλληλης διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσουν τα πακέτα πληροφορίας μέσα από μια συγκεκριμένη τοπολογία. Επίσης τα πρωτόκολλα αυτά πρέπει να λειτουργούν με γνώμονα την αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των ετερογενών αντικειμένων του υποβρύχιου δικτύου (κόμβοι,

μη επανδρωμένα οχήματα, πλωτήρες) αλλά και παράλληλα λαμβάνοντας υπόψιν την αυτό-οργάνωση του συστήματος. Η πλειοψηφία των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών- πρωτοκόλλων δρομολόγησης βασίζεται στις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα επίγειων αισθητήρων. Εντούτοις μερικά από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν σχεδιαστεί κατ' εξοχήν για υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων (Underwater Wireless Sensor Networks) περιγράφονται παρακάτω:

Depth Based Routing (DBR)

Το πρωτόκολλο DBR υλοποιεί τη γενική αρχιτεκτονική των UWSN με τους σταθμούς δεδομένων να βρίσκονται στην επιφάνεια του νερού. Με βάση τον καθορισμό βάθους του κόμβου η λειτουργία του πρωτοκόλλου DBR βασίζεται στην προώθηση των πακέτων πληροφορίας στους επιφανειακούς σταθμούς δεδομένων χρησιμοποιώντας έναν άπληστο αλγόριθμο (greedy algorithm). Ο κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο πληροφορίας το προωθεί σε έναν άλλο με κατεύθυνση πάντα προς την επιφάνεια της θάλασσας. Η πληροφορία για το βάθος του κάθε κόμβου βρίσκεται ενσωματωμένη στο πακέτο πληροφορίας το οποίο λαμβάνει και αποστέλλει [24].



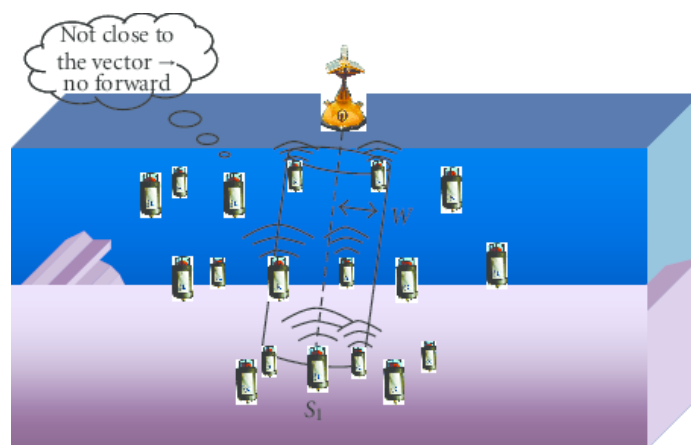
Εικ.8. Αρχιτεκτονική πολλαπλών κόμβων DBR

Η διαδικασία γίνεται ως εξής: ο κόμβος μόλις λάβει ένα πακέτο πληροφορίας αρχικά εξάγει την πληροφορία σχετικά με το βάθος του προηγούμενου κόμβου d_p και τη συγκρίνει με την πληροφορία για το δικό βάθος d_c . Αν ο κόμβος βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια, δηλαδή $d_c < d_p$ τότε προωθεί το πακέτο πληροφορίας κατά τον ίδιο τρόπο. Διαφορετικά διαγράφει το πακέτο καθώς προέρχεται από κάποιον κόμβο πιο κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα λαμβάνεται πάντοτε υπόψιν κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Στην περίπτωση του DBR χρησιμοποιείται η τεχνική της απόκρυψης περιττών πακέτων (Redundant Packet Suppression) για την εξοικονόμηση ενέργειας και την αποφυγή συγκρούσεων των πακέτων κατά τη διαδρομή προς τους επιφανειακούς σταθμούς. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, αφενός υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές για την προώθηση κάθε πακέτου και αφετέρου κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να στείλει ένα πακέτο παραπάνω από μια φορές.

Vector Based Forwarding (VBF)

Το πρωτόκολλο VBF λειτουργεί με βάση έναν αλγόριθμο που επιτρέπει σε κάθε κόμβο να εκτιμά το όφελος κατά την προώθηση του πακέτου σε ένα συγκεκριμένο κόμβο απορρίπτοντας τα πακέτα με μικρό όφελος. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: κάθε πακέτο φέρει πληροφορίες σχετικά με τις θέσεις του αποστολέα, του στόχου και του προωθητή κόμβου. Αφού λάβει το πακέτο, ο κόμβος υπολογίζει τη σχετική θέση του επόμενου κόμβου μετρώντας τη διανυσματική απόσταση και τη γωνία άφιξης του σήματος. Με αυτό το τρόπο επιλέγει τη προώθηση μόνο στον κόμβο που βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση.



Εικ.9. Πρωτόκολλο VBF

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τη διαδρομή που ακολουθούν τα πακέτα πληροφορίας καθώς μεταδίδονται κατά μήκος μιας ευθείας διαδρομής (κόμβοι w) με πρωταρχικό στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου αλγορίθμου δρομολόγησης είναι το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψιν το μέγεθος του δικτύου και εξελίσσεται κατά δυναμικό τρόπο [25].

Focus Beam Routing (FBR)

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης FBR βασίζει τη λειτουργία του σε δύο προϋποθέσεις. Πρώτον ότι όλοι οι κόμβοι γνωρίζουν ακριβώς τη θέση στην οποία βρίσκονται και δεύτερον ότι κάθε

κόμβος αποστολέας γνωρίζει τον επιθυμητό προορισμό του πακέτου πληροφορίας που δύναται να μεταδώσει. Αρχικά για την μετάδοση ενός πακέτου πληροφορίας από ένα κόμβο A σε ένα κόμβο B, αποστέλλεται ένα πολλαπλό μήνυμα από τον A προς όλους του κόμβους στη χαμηλότερη διαθέσιμη ισχύ. Στην περίπτωση που κρίνεται απαραίτητο ο κόμβος A αυξάνει σταδιακά την ισχύ μετάδοσης έως ότου φτάσει το πακέτο στον επιθυμητό προορισμό. Κάθε στάθμη ισχύος ανταποκρίνεται σε μία ακτίνα μετάδοσης όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Κάτα αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η χαμηλότερη δυνατή ισχύς μετάδοσης γεγονός που κρίνεται απαραίτητο σε υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων [26].

2.2.3 Επίπεδο εφαρμογών

Στο επίπεδο εφαρμογών ανήκουν όλα τα ετερογενή αντικείμενα που συνθέτουν το Internet of Underwater Things, τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων, τα δεδομένα τα οποία διαχειρίζονται καθώς η τεχνολογία που συνοδεύει το καθένα από αυτά. Όλα τα παραπάνω συγκλίνουν σε ένα στόχο, την παροχή ενός συνόλου ευφυών λύσεων με κύριο στόχο την εξυπηρέτηση του χρήστη. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στο στρώμα βασίζεται στις υπηρεσίες ιστού (web services) και σε πρωτόκολλα HTTP για τη μετάδοση μηνυμάτων ώστε να επιτρέπει στις εφαρμογές να επικοινωνούν μεταξύ τους ανεξαρτήτως πλατφόρμας και γλώσσας προγραμματισμού. Το παραπάνω σύστημα υλοποιείται με αρχιτεκτονική REST την οποία αποτελούν πελάτες (clients) και εξυπηρετητές (servers). Ο πελάτης αποστέλλει αιτήματα στον εξυπηρετητή ζητώντας δεδομένα, ο οποίος με τη σειρά του επεξεργάζεται αυτά τα αιτήματα και στη συνέχεια τα ικανοποιεί επιστρέφοντας δεδομένα. Με τη χρήση των συγκεκριμένων τεχνολογιών το IoUT ανάγεται σε ένα σύστημα που χαρακτηρίζεται από δυναμική και αυτοδιαχείριση (ad-hoc network). Κάποιες από τις πολυάριθμες εφαρμογές των υποβρυχίων δικτύων αισθητήρων στα πλαίσια του IoUT αναφέρονται παρακάτω:

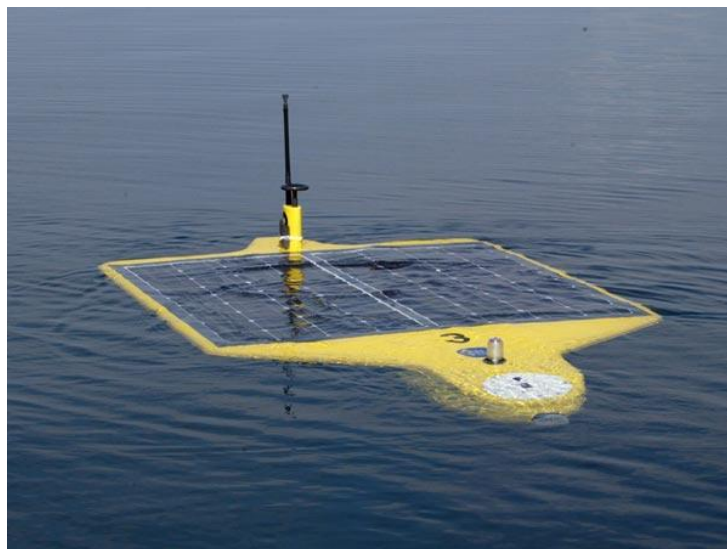
- Περιβαλλοντικός έλεγχος. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες η φυσική ποιότητα των υδατικών πόρων μεταβλήθηκε σημαντικά εξ' αιτίας των διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων και χρήσεων του νερού. Η παρακολούθηση των υδάτινων οικοσυστημάτων σε συνδυασμό με τη σωστή διαχείριση των υδάτινων πόρων κρίνεται απαραίτητη για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.
- Πρόληψη φυσικών καταστροφών. Αισθητήρες που μετρούν την σεισμική δραστηριότητα με τη δυνατότητα να ειδοποιούν σε περιπτώσεις έντονης υποθαλάσσιας σεισμικής δραστηριότητας ή τσουνάμι.

- Πλοήγηση υποβρύχιων οχημάτων. Η χρήση αισθητήρων μπορεί να υποβοηθήσει την επιλογή κατάλληλης διαδρομής ενός οχήματος ενώ επιπλέον ενισχύει την αποφυγή φυσικών εμποδίων όπως βράχοι ή ύφαλοι.
- Προστασία υδάτινων συνόρων. Υποβρύχιοι αισθητήρες σε συνδυασμό με υποβρύχια οχήματα και επίγειες τεχνολογίες μπορούν να συνδράμουν στην προστασία λιμανιών και άλλων θαλάσσιων περιοχών.

2.3 Υποβρύχια αυτόνομα οχήματα AUVs

Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUVs) κατέχουν νευραλγική θέση στο οικοσύστημα του IoUT. Πρόκειται για μη επανδρωμένα και αυτοκινούμενα οχήματα που μπορούν να εκτελέσουν επιθυμητές αποστολές χωρίς συνεχή ανθρώπινη καθοδήγηση. Όλη η ενέργεια που χρησιμοποιούν, παρέχεται από ενσωματωμένα συστήματα ενέργειας, όπως μπαταρίες ή κυψέλες καυσίμου γεγονός που αποτελεί το μεγαλύτερο περιορισμό για την λειτουργία τους, ενώ διαθέτουν δική τους υπολογιστική μονάδα για την επίτευξη προκαθορισμένων εργασιών. Τα AUVs απαλλαγμένα από καλώδιο σύνδεσης, τοποθετούνται ως επί τω πλείστον σε επιφανειακούς πλωτήρες και μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα από αυτούς για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Έτσι αποκτούν μεγαλύτερο επιχειρησιακό εύρος λειτουργίας και αποτελούν μία χαμηλού κόστους λύση για την θαλάσσια έρευνα.

Τα AUVs αναπτύχθηκαν αρχικά από στρατιωτικούς οργανισμούς τη δεκαετία του 1980 για αντίστοιχες εφαρμογές αλλά σύντομα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας εξελίχθηκαν σε ένα σημαντικό εργαλείο για ένα μεγάλο πλήθος υποθαλάσσιων εφαρμογών. Πλέον αποτελούν πολύ δημοφιλή όργανα ωκεανογραφικής παρακολούθησης εξαιτίας της πληθώρας σχηματισμών που μπορούν να λάβουν και καθώς και των διαφόρων λειτουργιών που μπορούν να επιτελέσουν. Τα σύγχρονα συστήματα AUVs μπορούν να είναι πολύ μικρά και φορητά με βάρος μικρότερο από 50 κιλά ή ανεμοπλάνο με μεγάλη διάρκεια πτήσης. Κάποια από αυτά ενώ έχουν τη δυνατότητα να πλοηγηθούν στην επιφάνεια της θάλασσας, άλλα σχεδιάζονται για να λειτουργούν σε μεγαλύτερα βάθη (περίπου 11.000 μέτρα) ή σε διπαλιρροιακά νερά (μεταξύ των ορίων της υψηλής και χαμηλής παλίρροιας). Τα περισσότερα AUVs χρησιμοποιούν ειδικά κατασκευασμένες και επαναφορτιζόμενες μπαταρίες για να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες ενώ άλλα εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια διαθέτοντας ηλιακούς συλλέκτες. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα υποβρύχιο όχημα που τροφοδοτείται με ηλιακά πάνελ και είναι σχεδιασμένο να πραγματοποιεί λειτουργίες στην επιφάνεια της θάλασσας [27].



Εικ.10. Ηλιακά τροφοδοτούμενο AUV

Τα τελευταία χρόνια η ευρεία αποδοχή των υποβρύχιων οχημάτων AUVs ως όργανα παρακολούθησης και καταγραφής των ωκεανών και ο εξοπλισμός τους με μια πληθώρα ετερογενών αισθητήρων και ενεργοποιητών έχει δημιουργήσει νέες δυνατότητες εφαρμογής τους σε ολοένα και περισσότερους τομείς.

- *Στρατιωτικές εφαρμογές.* Οι στρατιωτικές εφαρμογές τους περιλαμβάνουν την παρακολούθηση και αναγνώριση των υδάτινων συνόρων, την προστασία λιμανιών, τη χρήση τους σε περιπτώσεις ανθυποβρυχιακού πολέμου ή για την εξουδετέρωση ναρκών και εκρηκτικών [26].
- *Επιστημονικές εφαρμογές.* Στην επιστημονική έρευνα χρησιμοποιούνται για την μελέτη και παρακολούθηση των ωκεανών μέσα από τη χαρτογράφηση τους, την εξερεύνηση των υποβρύχιων ηφαιστιογενών περιοχών ή των θερμών πηγών και την γεωχημική και ωκεανογραφική καταγραφή των υδάτινων στηλών. Επιπλέον αποτελούν σημαντικό εργαλείο της σύγχρονης αρχαιολογίας στα πλαίσια υποβρύχιων ανασκαφών μεγάλου βάθους.
- *Εμπορικές εφαρμογές.* Τα σύγχρονα AUVs συναντώνται σε ποικίλες εμπορικές εφαρμογές, όπως στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου όπου χρησιμοποιούνται για τη πραγματοποίηση των απαραίτητων γεωφυσικών ερευνών που προηγούνται της εγκατάστασης ενός αγωγού αλλά και για την μετέπειτα επιθεώρηση αυτών.

2.3.1 Σχεδιασμός υποβρυχίου

Όλα τα υποβρύχια έρχονται αντιμέτωπα με δύο βασικά προβλήματα, την ικανότητα της βύθισης και την ικανότητα της πλοήγησης μέσα στον ωκεανό. Κατά το σχεδιασμό ενός υποβρυχίου

οχήματος τα ζητήματα αυτά λαμβάνοντα υπόψιν, ώστε με την εφαρμογή των κατάλληλων δυνάμεων ώθησης αφενός τα οχήματα να έχουν τη δυνατότητα παραμονής κάτω από το νερό κατά τη διάρκεια της κίνησής τους και αφετέρου να ελίσσονται και να καταδύονται σε διαφορετικά βάθη του ωκεανού.

2.3.2. Βασικές αρχές πρόωσης υποβρυχίων

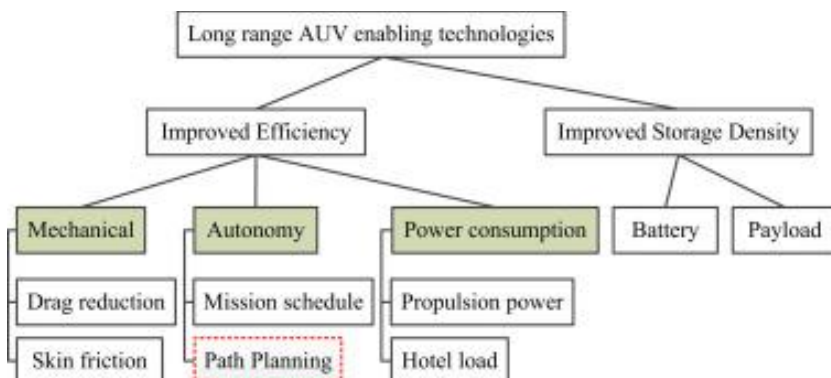
Η ικανότητα πρόωσης των υποβρυχίων οφείλεται στον έλικα και στην ώθηση λόγω των δυνάμεων που ασκούνται στα φτερά του. Ο έλικας δημιουργεί εμπρόσθια πρόωση, επιταχύνοντας νερό προς τα πίσω. Η ποσότητα νερού που κινείται εξαναγκασμένα προς τα πίσω εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του έλικα καθώς και από την γωνία περιστροφής του έλικα. Η όσο το δυνατόν ακριβέστερη πλοήγηση του υποβρύχιου απαιτεί την πρόβλεψη της υδροδυναμικής του συμπεριφοράς. Μεγάλης σημασίας είναι ο σχεδιασμός του σχήματος του υδροπτέρου, έτσι ώστε τα υδροδυναμικά του χαρακτηριστικά να συμβάλουν στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια των αποστολών. Επιπλέον, για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός των υδροδυναμικών του παραμέτρων και των δυνάμεων που δρουν πάνω σε αυτό.

2.3.3 Η τεχνολογία των AUVs.

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία των υποβρύχιων ρομποτικών οχημάτων αναπτύσσεται ταχύτατα. Στα χέρια των ερευνητών προσφέρουν πολυάριθμες δυνατότητες καθώς αντικαθιστούν την ανθρώπινη δραστηριότητα σε περιοχές δύσβατες, εκεί που τα παραδοσιακά θαλάσσια οχήματα δεν μπορούν να φτάσουν εύκολα, όπως μεγάλα βάθη των ωκεανών ή θαλάσσιες περιοχές κάτω από στρώματα πάγου [28]. Τα σύγχρονα συστήματα AUVs είναι μικρά και ευέλικτα, παρέχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα αυτονομίας και ταυτόχρονα εξοπλίζονται με μια πληθώρα αισθητήρων που ποικίλουν ανάλογα με το είδος της εξερεύνησης με σκοπό τη συγκεντρωση και διαχείριση δεδομένων.

Οι ωκεανογραφικές αποστολές των AUVs συνήθως διαρκούν μερικές ώρες ή ακόμα και μέρες, καλύπτοντας εκατοντάδες ή σε κάποιες περιπτώσεις και χιλιάδες τετραγωνικών χιλιομέτρων στην επιφάνεια της θάλασσας αλλά και σε μεγαλύτερα βάθη. Επιπλέον τα υποβρύχια οχήματα έρχονται συχνά αντιμέτωπα με τις συνθήκες μεγάλων διακυμάνσεων που χαρακτηρίζουν τους ωκεανούς και οφείλονται κατά κύριο λόγο στα θαλάσσια ρεύματα. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων τα οχήματα αποπλέουν από πλωτήρες στην επιφάνεια της θάλασσας από όπου τους προσφέρεται η κατάλληλη πλοήγηση αλλά και ανεφοδιασμός [29]. Η έρευνα ωστόσο των τελευταίων χρόνων επικεντρώνεται στην ανάπτυξη υποβρύχιων συστημάτων τα οποία μπορούν

να λειτουργούν με μεγαλύτερη αυτονομία στο βυθό της θάλασσας, πραγματοποιώντας αποστολές για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα χωρίς ανθρώπινη καθοδήγηση ώστε αφενός να διευρύνονται οι εφαρμογές τους και αφετέρου να εξοικονομούνται πολύτιμοι πόροι [30]. Για τη βελτίωση των συνθηκών πλεύσης-λειτουργίας των AUVs υιοθετούνται δύο κυρίαρχες τάσεις (Εικ. 11).



Εικ.11. Τεχνολογίες βελτίωσης των AUVs

Η πρώτη αναφέρεται στην αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας του οχήματος ανά μονάδα όγκου (improved storage density). Οι τεχνικές που εξετάζονται εδώ αφορούν στη βελτίωση της τεχνολογίας της μπαταρίας που χρησιμοποιεί το όχημα, μέσα από τη χρήση πυκνωτών (super capacitors) και τη χρήση νανοτεχνολογίας για τη μείωση του ωφέλιμου φορτίου κατά τη μετάδοση [31]. Η δεύτερη τάση αναφέρεται στη βελτίωση της αποδοτικότητας του υποβρύχιου οχήματος (improved efficiency) που επιτυγχάνεται μέσα από τρεις μεθόδους [32]:

- i) Μέθοδοι για τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας με τεχνικές επαναπροσδιορισμού της ισχύος πρόωσης του κινητήρα και εξοικονόμηση ενέργειας στους αισθητήρες .
- ii) Βελτίωση του σχεδιασμού του οχήματος με έμφαση στις αρχές της υδροδυναμικής (ταχύτητα, πίεση, αντίσταση νερού). Έλικας και μηχανή του υποβρυχίου σχεδιάζονται ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αντιστάσεις μέσα στο νερό και να μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα του συστήματος. Για παράδειγμα, η χρήση έλικας που γυρίζει μέσα σε αγωγό (ducted propeller) δημιουργεί διαφορά πιέσεων βελτιώνοντας το σύστημα πρόωσης του οχήματος [33].
- iii) Ο προγραμματισμός και ο σχεδιασμός διαδρομής (path planning) αξιοποιούνται στις αποστολές μεγάλης κλίμακας επιτρέποντας την μεγαλύτερη αυτονομία του οχήματος από τον σταθμό της ξηράς. Με το σωστό σχεδιασμό τα μπορούν να επιλέγουν την υποθαλάσσια πορεία τους ανάλογα με τα θαλάσσια ρεύματα εκμεταλλευόμενα την ενέργεια των ωκεανών και εκτελώντας με αυτόν τον τρόπο αποστολές με μεγαλύτερο χρόνο αυτονομίας και μικρότερες δαπάνες .

ΚΕΦ.3: Σχεδιασμός πορείας

3.1. Εισαγωγή

Η βελτίωση των συνθηκών λειτουργίας των AUVs βρίσκεται στην πρώτη γραμμή του πεδίου έρευνας των υποθαλάσσιων συνθηκών με έμφασή στην ανάπτυξη τεχνικών που θα επιτρέπουν την μεγαλύτερη διάρκεια αυτονομίας των οχημάτων και την μείωση του κόστους λειτουργίας τους. Σημαντικό ρόλο για τον σχεδιασμό ενός υποβρυχίου οχήματος διαδραματίζει ο σχεδιασμός της βέλτιστης διαδρομής (*path planning optimization*), δηλαδή η αναζήτηση της κατάλληλης πορείας μεταξύ μιας αρχικής θέσης και του επιθυμητού στόχου κάτω από τον περιορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων. Με τη χρήση των κατάλληλων αλγορίθμων προγραμματίζεται μια αλληλουχία κατάλληλων πορειών που συνάδουν με τις συνθήκες βελτιστοποίησης του οχήματος και επιτρέπουν σε αυτό να φέρει σε πέρας την αποστολή του φτάνοντας στο τελικό και επιθυμητο προορισμό ακολουθώντας τη συντομότερη διαδρομή και ταυτόχρονα αποφεύγοντας την σύγκρουση με εμπόδια. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση της διαδρομής έχουν δυο βασικές ιδιότητες [34]. Αυτές είναι:

- πληρότητα (*completeness*) δηλαδή η δυνατότητα εύρεσης λύσης.
- βελτιστοποίηση (*optimality*) η εύρεση της καλύτερης πιθανής λύσης.

Δύο μορφές πληρότητας είναι η πιθανολογική πληρότητα (*probabilistic completeness*) και η αναλυτική πληρότητα (*resolution completeness*). Ένας αλγόριθμος καλείται αναλυτικά πλήρης αν εγγυάται την εύρεση πραγματικής λύσης στο πρόβλημα του σχεδιασμού πορείας σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα με την προϋπόθεση ότι η ανάλυση του πλέγματος είναι αρκετά λεπτή. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι αυτού του είδους όπως *Dijkstra's*, *A**, *D** είναι μέθοδοι αναζήτησης γραφικών παραστάσεων. Τα γραφήματα προβάλλουν τις περιοχές ελεύθερου χώρου σε αντιπαράθεση με τις περιοχές στις οποίες υπάρχουν εμπόδια, έτσι ώστε να αποτελούν σημείο αναφοράς για τον σχεδιασμό της διαδρομής του οχήματος. Αντίθετα, ένας αλγόριθμος καλείται πιθανολογικά πλήρης εάν η πιθανότητα εύρεσης μιας διαδρομής φτάνει το 100%. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει ο *RRT* όπως και άλλοι εξελικτικοί αλγόριθμοι. Η απόδοση ενός πιθανολογικού σχεδιασμού διαδρομής αξιολογείται με βάση το ρυθμό σύγκλισης. Ο αλγόριθμος υπολογίζει την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού διαδρομής με βάση κάποιο κριτήριο, όπως

κατανάλωση ενέργειας, χρονική διάρκεια διαδρομής. Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνουμε τις τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για την σχεδίαση διαδρομής ενός AUV.

Τεχνική Βελτιστοποίησης		Είδος πληρότητας	Χαρακτηριστικά
Μέθοδοι αναζήτησης γραφήματος	Dijkstra	Αναλυτική πληρότητα	Σχεδιασμός με βάση το πλέγμα, διακριτές μεταβάσεις καταστάσεων
	A*		Υπολογιστικά δαπανηρός σε προβλήματα πολλών διαστάσεων
	Field D*		
FM & LSM		Αναλυτική πληρότητα	Επιτρέπουν μόνο γραμμική συνάρτηση κόστους για τη διατήρηση της υπολογιστικής αποδοτικότητας
APF		Πιθανολογική πληρότητα	Γρήγορος αλλά ευαίσθητος στα τοπικά ελάχιστα
RRT		Πιθανολογική πληρότητα	Γρήγορος και αποδοτικός σε διαστήματα υψηλών διαστάσεων αλλά οι λύσεις είναι συχνά υποβέλτιστες απαιτώντας περαιτέρω καθορισμό
Εξελικτικές προσεγγίσεις	GA	Πιθανολογική πληρότητα	Πρακτικοί σε προβλήματα υψηλών διαστάσεων αλλά μπορούν να συγκλίνουν σε μία υποβέλτιστη λύση σε πεπερασμένο χρόνο.
	PSO		
	QPSO		

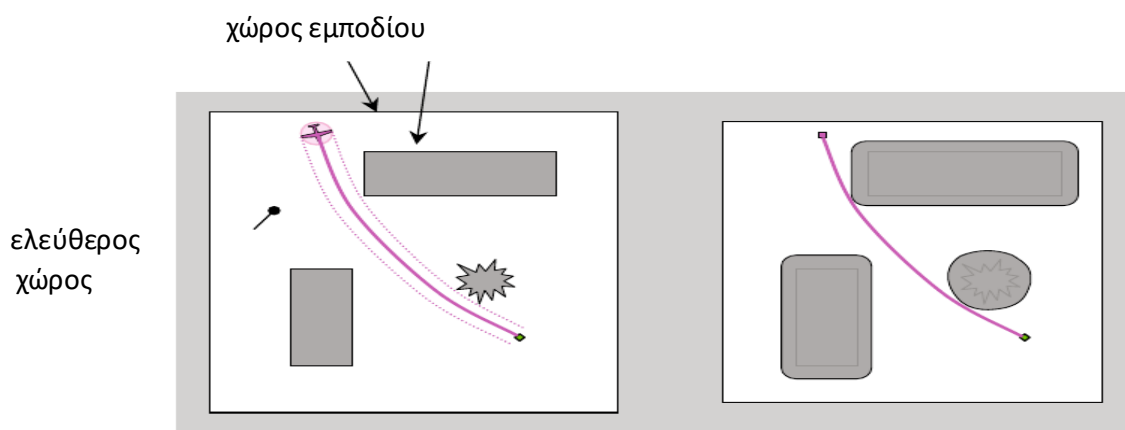
Πιν.2. Αλγόριθμοι σχεδίασης διαδρομής AUV

3.2 Το πρόβλημα του χώρου

Ένα όχημα (*vehicle*), δηλαδή ένα αντικείμενο που μπορεί να τεθεί σε κίνηση αναπαριστάται από ένα γεωμετρικό σχήμα και δύο διάνυσματα σε ένα πεπερασμένο χώρο καταστάσεων. Ένα διάνυσμα θέσης σε δισδιάστατο χώρο και ένα διάνυσμα κατεύθυνσης. Σχηματισμός (*configuration*) ονομάζεται το διάνυσμα που ορίζει το μέγεθος του οχήματος. Ο χώρος όλων των πιθανών σχηματισμών ονομάζεται χώρος σχηματισμών (*configuration space*). Η βασική ιδέα

είναι ότι κάθε διαφορετικό στιγμιότυπο του κόσμου στον οποίο βρίσκεται το αυτόνομο όχημα ορίζεται ως μια κατάσταση (*state*) και το σύνολο όλων των πιθανών καταστάσεων ονομάζεται χώρος κατάστασης (*state space*). Για την περίπτωση μας ο χώρος κατάστασης είναι πεπερασμένος, ή το πολύ άπειρος αριθμήσιμος. Για παράδειγμα, η κατάσταση ενός οχήματος μπορεί να περιγράφεται από 3 συντεταγμένες θέσης και 3 συντεταγμένες κατεύθυνσης δηλαδή 6 βαθμούς ελευθερίας.

Γενικά η διάσταση του χώρου καταστάσεων του οχήματος ισοδυναμεί με το σύνολο των βαθμών ελευθερίας. Όταν μοντελοποιούμε τον χώρο κατάστασης πρέπει να ορίζουμε την κατάσταση έτσι ώστε να μην περιέχει αχρείαστη πληροφορία. Απο την άλλη, ο χώρος κατάστασης μας πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος και να περιέχει την απαραίτητη πληροφορία ώστε να γίνει εφικτή η λύση του προβλήματος. Επίσης ο χώρος κατάστασης συνίσταται σε δύο ξένους υπόχωρους, τον ελεύθερο χώρο (*free space*) και το χώρο εμποδίου (*obstacle space*). Ελεύθερος χώρος είναι το υποσύνολο των σημείων του χώρου στο οποίο το όχημα μπορεί να κινηθεί ελεύθερα ενώ χώρος εμποδίων είναι το υποσύνολο των σημείων του χώρου το οποίο αναπαριστά τη σύγκρουση με ένα εμπόδιο. Μονοπάτι (*path*) ονομάζουμε την καμπύλη που ακολουθεί το όχημα μέσα στο χώρο καταστάσεων ενώ τροχιά (*trajectory*) ονομάζεται το μονοπάτι που συμπεριλαμβάνει και τον παράγοντα του χρόνου. Η τροχιά συνδέεται με την εξίσωση κίνησης του οχήματος που περιγράφεται από μια διαφορική εξίσωση που συνδέει τις χωρικές και χρονικές καταστάσεις του οχήματος. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την απεικόνιση δύο δισδιάστατων περιπτώσεων κίνησης υποβρύχιου οχήματος. Παρατηρούμε την αρχική θέση του οχήματος καθώς και τον επιθυμητό στόχο ενώ ευδιάκριτος είναι και ο χώρος εμποδίου [35].



Εικ.12. Απεικόνιση διαδρομής οχήματος

3.2.1. Διατύπωση του προβλήματος

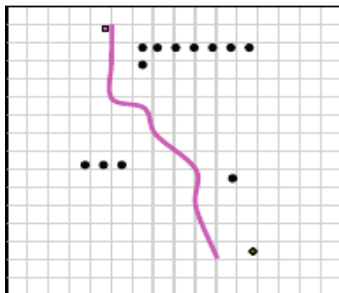
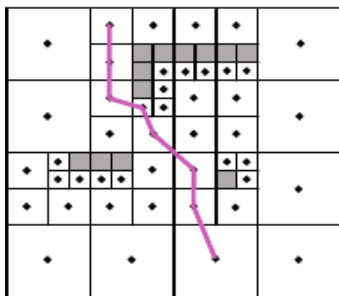
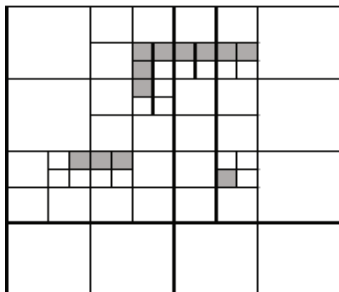
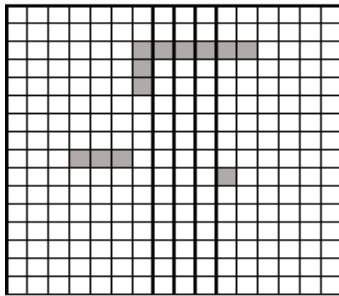
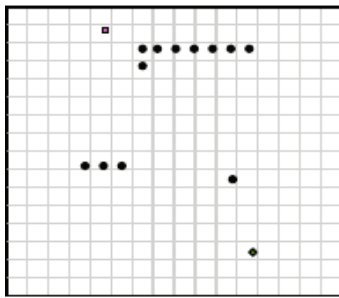
Ο στόχος του προγραμματισμού πορείας για ένα υποβρύχιο όχημα AUV είναι στην ουσία η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής ανάμεσα σε ένα σύνολο διαδρομών ώστε το όχημα να πραγματοποιήσει την επιθυμητή διαδρομή μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον και να φτάσει στον προορισμό του στον ελάχιστο χρόνο. Ένα πρόβλημα ονομάζεται στατικό (static) αν συνοδεύεται από πλήρη γνώση του εξωγενούς περιβάλλοντος και δυναμικό (dynamic) αν κατά τη διάρκεια της αποστολής τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος μεταβάλλονται. Επίσης όταν τα εμπόδια είναι καθορισμένα στο διάστημα το πρόβλημα ονομάζεται χρονικά αμετάβλητο (time-variant) ενώ όταν τα εμπόδια κινούνται το πρόβλημα ονομάζεται χρονικά μεταβαλλόμενο (time-invariant). διαφορικά εξαναγκασμένο (differentially constrained) σημαίνει ότι οι εξισώσεις κίνησης του οχήματος δρουν περιοριστικά στο πρόβλημα της διαδρομής, δηλαδή το όχημα μπορεί να κινείται με 6 και πλέον βαθμούς ελευθερίας.

Σε πραγματικές συνθήκες, ένα υποβρύχιο όχημα AUV καλείται συχνά να πραγματοποιήσει ένα πλήθος μακροσκελών αποστολών που μπορεί να διαρκέσουν αρκετές μέρες ενώ χρειάζεται να διανύσει εκατοντάδες χιλιόμετρα στις δυσχερείς συνθήκες που επικρατούν στα υδάτινα περιβάλλοντα. Σε έναν αλγόριθμο εύρεσης διαδρομής, ο τρόπος της απεικόνισης του χώρου επιδρά καθοριστικά στην αποδοτικότητα και την ποιότητα του τελικού μονοπατιού. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι path planning αναπαριστούν τον φυσικό χώρο κίνησης του οχήματος σε ένα επίπεδο δύο διαστάσεων (2D) κυρίως με σκοπό την επιτάχυνση της διαδικασίας αναζήτησης και τη μείωση των απαιτήσεων του συστήματος σε λειτουργικούς πόρους καθώς οι υπολογιστικές απαιτήσεις για έναν αλγόριθμο αυξάνονται εκθετικά με την διάσταση του πεδίου κίνησης.

3.2.2. Κριτήρια απόδοσης αλγορίθμου

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για τον σχεδιασμό της βέλτιστης διαδρομής αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη λειτουργία του υποβρύχιου οχήματος και είναι συνυφασμένη με την έννοια της απόδοσης του. Τα κριτήρια που επιλέγονται για την επιτυχή υλοποίηση του αλγορίθμου αφορούν σε παράγοντες που καλύπτουν επιχειρησιακές και υπολογιστικές πτυχές. Για παράδειγμα η δυνατότητα αποφυγής εμποδίων, η επιλογή της συντομότερης διαδρομής και η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι κάποια από επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός αλγορίθμου. Επιπλέον οι αξιόπιστες και σε πραγματικό χρόνο υπολογιστικές διαδικασίες χωρίς απροσδόκητες καθυστερήσεις είναι μείζονος σημασίας καθώς μπορεί να αποτελέσουν τροχοπέδη για την ομαλότητα των λειτουργικών απαιτήσεων του συστήματος. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και η δυνατότητα λήψης αποφάσεων

γρήγορα, αποτελούν στόχο για την υλοποίηση ενός αλγορίθμου βέλτιστης διαδρομής. Το γεγονός ότι κάθε υποβρύχιο όχημα έρχεται αντιμέτωπο με τις δυσχερείς συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος θέτει μία ακόμη πλευρά σχεδίασης των αλγορίθμων, την ικανότητα προσαρμογής σε κάθε είδους αβεβαιότητες και σφάλματα. Η εύρεση της διαδρομής που θα μεγιστοποιήσει ή θα καλύψει όσο το δυνατόν περισσότερα από τα παραπάνω κριτήρια για ένα υποβρύχιο όχημα είναι συχνά μία πολυεπίπεδη διαδικασία στην οποία συνδυάζεται η επεξεργασία δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες και ο σχεδιασμός διαδρομής. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι διαφορετικές προσεγγίσεις που επικρατούν για την επιλογή της κατάλληλης διαδρομής. Στην πραγματικότητα ένας αλγόριθμος μπορεί να συνδυάζει δύο ή τρία ακόμη και περισσότερα στάδια εύρεσης του κατάλληλου μονοπατιού όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Μοντέλο Αισθητήρων (sensor model)

Αναπαράσταση Δεδομένων από αισθητήρες:

- Οι κουκίδες αναπαριστούν τα σημεία με εμπόδια
- Η αρχική θέση συμβολίζεται με ένα τετράγωνο, η τελική με ένα διαμάντι.
- Το πλέγμα δεν είναι στην πραγματικότητα τμήμα της αναπαράστασης

Αντιπροσώπευση εκτάσεων (terrain representation)

Αναπαράσταση Δεδομένων από αισθητήρες:

- Σε αυτό το παράδειγμα οι γκρι κελιά αναπαριστούν τα σημεία με εμπόδια τα λευκά

Διαδρομή (roadmap)

Πολλοί τύποι διαδρομών μπορεί να υπάρχουν. Σε αυτό το παράδειγμα φιανεται ένας χωρικός χάρτης αποσύνθεσης quadtree.

Αναζήτηση γραφήματος (graph search)

Σε συνέχεια του βήματος διαδρομής παράγεται ένας γράφος και ο κατάλληλος αλγόριθμος αναζητά τη ακολουθία σημείων.

Τροχιά (trajectory)

Η ακολουθία σημείων εξομαλύνεται σε μία τροχιά.

Σχ.1. Στάδια για την ανάπτυξη αλγορίθμου

3.3 Αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής

Τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί ένα πλήθος από αλγόριθμους που διαχειρίζονται το πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου μονοπατιού για τα υποβρύχια οχήματα AUVs. Ανάμεσα τους οι Dijkstra's, αλγόριθμος A*, Field D, RRT, αλγόριθμος Fast Marching (FM) αποτελούν εξαιρετικά δημοφιλείς λύσεις για το πρόβλημα σχεδιασμού διαδρομής. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε μια επισκόπηση των κυριότερων κατηγοριών των αλγορίθμων path planning.

3.3.1 Αλγόριθμοι αναζήτησης γράφου

Οι μέθοδοι αναζήτησης γράφου ανήκουν στην κατηγορία μεθόδων διακριτού σχεδιασμού (discrete planning) [36]. Αυτοί οι αλγόριθμοι αναζήτησης θα ψάχνουν τον χώρο κατάστασης, ο οποίος όπως μπορεί να αναπαρασταθεί σε μορφή γράφου, για κάποια κατάσταση που να ανήκει στο σύνολο των τελικών καταστάσεων. Μία απαίτηση που έχουμε από κάθε αλγόριθμο αναζήτησης σε γράφο είναι να είναι συστηματικός (systematic), δηλαδή να επισκέφτεται κάθε κόμβο του γράφου. Αν ο γράφος είναι πεπερασμένος αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος θα μπορέσει σε πεπερασμένο χρόνο να επισκεφθεί κάθε προσβάσιμο κόμβο και να διαπιστώσει αν υπάρχει λύση. Μια προϋπόθεση ώστε ο αλγόριθμος να είναι συστηματικός είναι να αποθηκεύει τις καταστάσεις τις οποίες έχει επισκεφτεί, αλλιώς ενδέχεται να κάνει συνεχώς κύκλους και να μην βρεί ποτέ την λύση. Ο αλγόριθμος Dijkstra είναι ο πρώτος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής, ο οποίος λειτουργεί υπολογίζοντας κάθε πιθανό μονοπάτι ξεκινώντας από ένα αρχικό σημείο. Ο αλγόριθμος Greedy Best First Search είναι παρόμοιος με αυτόν του Dijkstra, όμως διαθέτει επιπλέον τη δυνατότητα υπολογισμού της απόστασης του κάθε κόμβου από τον στόχο. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι επιλέγει την κορυφή ή την επιφάνεια που βρίσκεται πλησιέστερα προς το στόχο αντί αυτής που βρίσκεται πλησιέστερα προς την αφετηρία. Αυτή η επιπλέον παράμετρος που υπεισέρχεται στον καθορισμό της διαδρομής ονομάζεται ευρετική (heuristic). Ο αλγόριθμος A* που αποτελεί μία παραλλαγή του αλγορίθμου Dijkstra's είναι ο δημοφιλέστερος αλγόριθμος αναζήτησης διαδρομών σε θαλάσσιες συνθήκες. Με την εφαρμογή της ευρετικής συνάρτησης ο αλγόριθμος παρακολουθεί το κόστος διαδρομής που οδηγεί σε ένα συγκεκριμένο κόμβο ώστε να καθορίζει ποιος κόμβος αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή για το επόμενο βήμα.

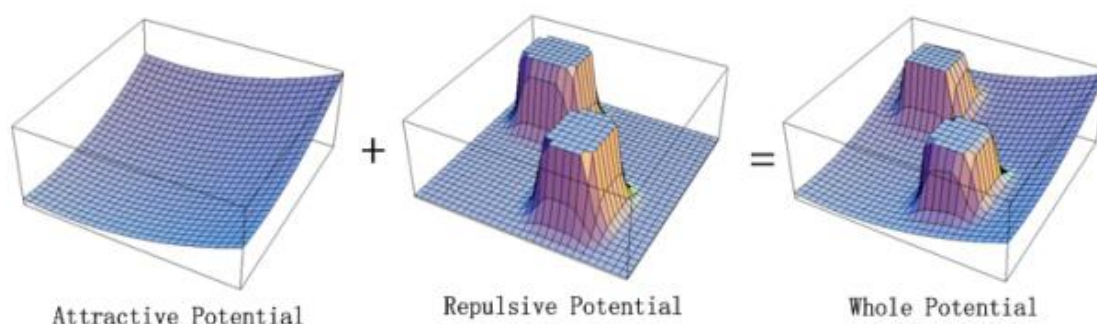
3.3.2 Μέθοδος δυναμικού πεδίου (potential field)

Μια επιτυχημένη προσέγγιση στον προγραμματισμό κίνησης είναι η μέθοδος του δυναμικού πεδίου κατά την οποία ο ελεύθερος χώρος προσομοιώνεται με μία συνάρτηση δυναμικού $U(x,y)$.

Η βασική ιδέα εδώ είναι ότι το όχημα αναπαρίσταται ως ένα σωματίδιο το οποίο κινείται υπό την επίδραση κεντρικών δυνάμεων οι οποίες προέρχονται από δυναμικά. Σύμφωνα με την παρακάτω σχέση η δύναμη θα είναι ανάλογη του ανάδελτα του δυναμικού όπου $q=(x,y)$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στο καρτεσιανό επίπεδο [37]:

$$\vec{F}(q) = -\nabla U(q)$$

Υποθέτουμε δηλαδή ότι ο στόχος είναι το σημείο του χώρου με τη μικρότερη τιμή δυναμικού ενώ το αρνητικό πρόσημο εκφράζει την ελκτική σχέση (attractive potential) ανάμεσα σε αυτόν και στη δύναμη που αναπτύσσεται στο όχημα. Επιπλέον ένα πεδίο αντίθετης, δηλαδή απωστικής φύσης (repulsive potential) αναπτύσσεται ανάμεσα στο όχημα και τα εμπόδια. Η αναπαράσταση των δυναμικών πεδίων φαίνεται παρακάτω.



Εικ.13. Τα δυναμικά πεδία

Η δημοφιλέστερη μέθοδος path planning στη κατηγορία αυτή είναι ο αλγόριθμος Artificial Potential Field (APF). Οι αλγόριθμοι δυναμικού πεδίου έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον για το σχεδιασμό διαδρομής υποβρύχιων οχημάτων με μια συνάρτηση κόστους που υπολογίζει τη συνολική έλξη που ασκείται στο όχημα, οποιαδήποτε εμπόδια βρίσκονται στο πεδίο του αλλά και το συνολικό χρόνο ταξιδιού. Ένα πλεονέκτημα των μεθόδων δυναμικού πεδίου είναι ότι αποτελούν ανέξοδες λύσεις που επιτρέπουν εύκολους και σε πραγματικό χρόνο υπολογισμούς για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής. Ωστόσο η ιδιότητα να παράγουν μόνο τοπικές βέλτιστες λύσεις δρα ως ανασταλτικός παράγοντας της εφαρμογή τους σε μεγάλης κλίμακας ωκεάνια περιβάλλοντα μεγάλων διακυμάνσεων.

ΚΕΦ.4: Υλοποίηση σε περιβάλλον Matlab

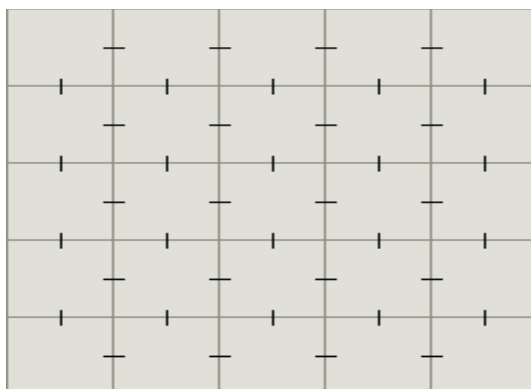
4.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός πορείας για ένα αυτόνομο όχημα περιγράφει το πρόβλημα εύρεσης της κατάλληλης διαδρομής ανάμεσα σε ένα κόμβο που ορίζεται ως αρχικός και ένα κόμβο προορισμού σε ένα χώρο που συνυπάρχουν εμπόδια. Όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, η πλοήγηση στα υδάτινα περιβάλλοντα είναι στην πραγματικότητα εξαιρετικά περίπλοκη καθώς το όχημα καλείται να αντιμετωπίσει πολυάριθμες δυσκολίες, όπως τη τυρβώδη φύση των ωκεανών. Οι διακυμάνσεις των φυσικών παραμέτρων, οι μεγάλες καθυστερήσεις του σήματος, τα θαλάσσια ρεύματα που προκαλούν τεράστιες χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις είναι μόνο κάποιες από τις δυσκολίες που έχει να αντιμετωπίσει ένα αυτόνομο υποβρύχιο όχημα. Για την μελέτη του προβλήματος διαδρομής έχουν προταθεί μία πληθώρα αλγορίθμων και μοντέλων, κάποιους από τους οποίους θα μελετήσουμε παρακάτω.

4.2. Αναπαράσταση του χώρου

Μία βασική αρχική προϋπόθεση για την υλοποίηση των αλγορίθμων path planning είναι ο καθορισμός της διάστασης του χώρου του οχήματος. Οι αλγόριθμοι αυτοί αναπαριστούν τον χώρο ως ένα πλέγμα κόμβων και προσδιορίζουν το μονοπάτι που πρόκειται να ακολουθηθεί μέσα σε αυτό. Υπάρχουν πολλοί τρόποι αναπαράστασης των κόμβων του πλέγματος, όπως για παράδειγμα με τετράγωνα, εξάγωνα, τρίγωνα ή ασύμμετρα πολύγωνα. Στη παρούσα εργασία το πλέγμα κόμβων αναπαρίσταται με τη μορφή τετράγωνων, τρόπος που εφαρμόζεται στη πλειονότητα των προβλημάτων λόγω της ευκολίας στη χρήση του. Το τετραγωνικό πλέγμα συνίσταται σε κορυφές και ακμές οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους και έτσι το πρόβλημα ανάγεται σε ένα απλό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Κατά τη κίνηση του οχήματος στο χώρο του τετραγωνικού πλέγματος, η κατάσταση κάθε κόμβου μπορεί να χαρακτηριστεί ως προσπελάσιμη ή μη- προσπελάσιμη, ανάλογα με το αν υπάρχει εμπόδιο σε αυτή τη θέση που πρόκειται να κινηθεί ή όχι ενώ κάθε ακμή συνοδεύεται από έναν αριθμό γειτονικών ακμών τις οποίες μπορεί να επιλέξει για να κινηθεί το όχημα. Με αυτό τον τρόπο, η περιοχή διερεύνησης ανάγεται σε έναν απλό δισδιάστατο πίνακα με κάθε στοιχείο του πίνακα να αποτελεί έναν κόμβο του πλέγματος και να αντιστοιχεί σε μια θέση στο φυσικό χώρο.



Εικ.14. Τετραγωνικό πλέγμα

4.2.1. Συνθήκες προσομοίωσης

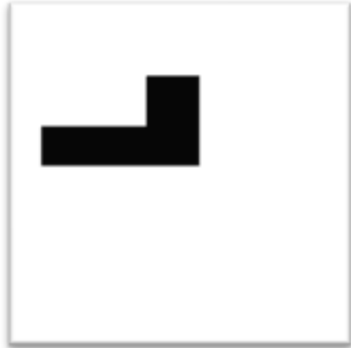
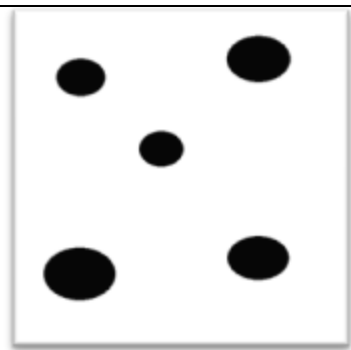
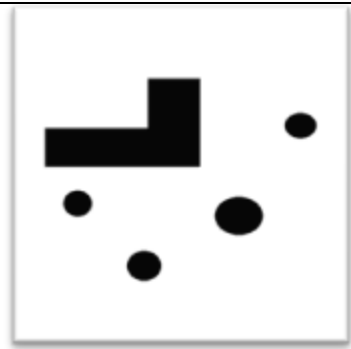
Σε πραγματικές συνθήκες η κίνηση ενός στερεού σώματος στο χώρο με ταυτόχρονη περιστροφή του, περιγράφεται από 6 βαθμούς ελευθερίας. Γνωρίζοντας ότι οι κάθετες συνιστώσες κινήσεις του οχήματος έχουν αμελητέα προσφορά στον καθορισμό διαδρομής [38], στη παρούσα μελέτη θεωρούμε ότι το υποβρύχιο όχημα κινείται σε ένα πεδίο δύο διαστάσεων δηλαδή σε ένα σύστημα καρτσιανών συντεταγμένων (x,y) . Επιπλέον, για την απλούστευση του προβλήματος θεωρούμε ότι οι διαστάσεις του οχήματος έχουν αμελητέο μέγεθος σε σχέση με τις διαστάσεις του χώρου στον οποίο κινείται δηλαδή απεικονίζουμε το υποβρύχιο όχημα ως σημειακό αντικείμενο ενώ η εικόνα της αναπαράστασης του χώρου λαμβάνεται από πάνω (κάτοψη).

Η αναπαράσταση του χώρου γίνεται με τετραγωνικό πλέγμα όπου κάθε κόμβος αναπαρίσταται από μία ακμή και η κάθε ακμή του τετραγώνου αναπαριστά τη πιθανή διαδρομή από ένα κόμβο σε ένα άλλο. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια ταύτισης των κόμβων με τις θέσεις στις οποίες θα κινηθεί η μονάδα, τόσο υψηλότερη η ποιότητα του μονοπατιού. Ταυτόχρονα όμως υψηλή ανάλυση της εικόνας του γεωγραφικού χώρου συνεπάγεται και μεγαλύτερες καθυστερήσεις στο χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Στην παρακάτω προσομοίωση υποθέσαμε περιοχή τετραγωνικού σχήματος με ανάλυση [100,100].

4.2.2. Αναπαράσταση εμποδίου

Για την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε δυαδική εικόνα (binary image) που αναπαριστά το περιβάλλον κίνησης του υποβρυχίου οχήματος ενώ εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις στατικών εμποδίων: α) μεγάλο εμπόδιο β) μικρά κατανεμημένα εμπόδια και γ) συνδυασμός των δύο. Σε κάθε δυαδική εικόνα η μαύρες περιοχές αναπαριστούν τις περιοχές

εμποδίων, όπου το όχημα δεν μπορεί να κινείται. Οι διαφορετικές περιοχές κίνησης φαίνονται παρακάτω:

Φυσικά χαρακτηριστικά εμποδίου	Εικόνα
Μεγάλο εμπόδιο	
Μικρά κατανεμημένα εμπόδια	
Συνδυασμός και των δύο	

Σχ.2. Διάταξη εμποδίων

Στη παρούσα εργασία γίνεται μια σύγκριση διαφορετικών αλγορίθμων που προτείνονται για τον σχεδιασμό διαδρομής υποβρύχιου οχήματος. Με τις αρχικές συνθήκες που έχουν αναλυθεί παραπάνω, υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον MATLAB οι εξής αλγόριθμοι [40]:

- Αλγόριθμος A*
- Αλγόριθμος Rapidly-exploring Random Tree (RRT)
- Αλγόριθμος Artificial Potential Field

Κριτήρια για τον καθορισμό του βέλτιστου μονοπατιού ορίστηκαν ο χρόνος εκτέλεσης και το μήκος μονοπατιού ενώ τα συμπεράσματα που εξήχθησαν αναλύονται παρακάτω.

4.3 Υλοποίηση με Αλγόριθμο A*

4.3.1 Περιγραφή A*

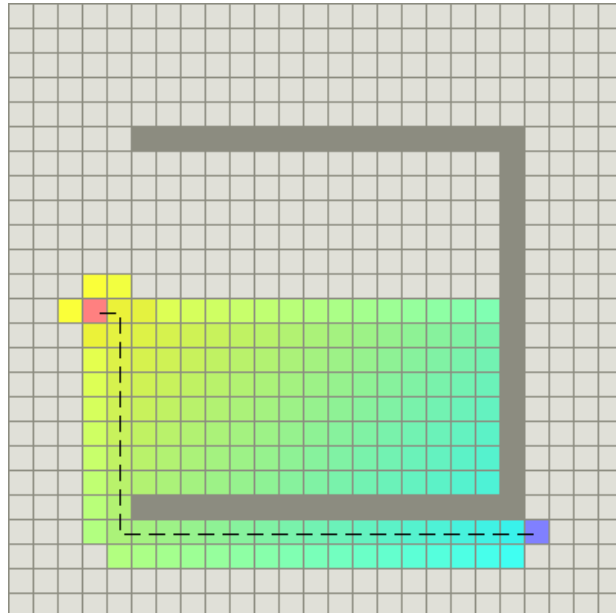
Ένας εξαιρετικά δημοφιλής αλγόριθμος για τον σχεδιασμό πορείας που ανήκει στην κατηγορία των αλγορίθμων αναζήτησης γράφου είναι ο A*. Προκειται για έναν υπολογιστικό αλγόριθμο που χρησιμοποιείται σε προβλήματα εύρεσης μονοπατιού (path finding) μεταξύ δύο σημείων. Ο αλγόριθμος A* ορίζεται ως μια μέθοδος αναζήτησης 'best first' και βρίσκει την διαδρομή με το μικρότερο κόστος από ένα δεδομένο αρχικό σημείο σε ένα τελικό ενώ χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό μεθόδων ευρετικής αναζήτησης και αναζήτησης του συντομότερου μονοπατιού [39]. Ο όρος ευριστική χρησιμοποιείται για αλγόριθμους που είναι προσεγγιστικοί, και συνήθως δίνουν λύση κοντά στη βέλτιστη, εύκολα και γρήγορα. Έτσι, στο πρόβλημα εύρεσης διαδρομής, η ευριστική αναζήτηση υποδεικνύει τον περισσότερο "υποσχόμενο" κόμβο, ποιοί κόμβοι θα επιλεγούν στη συνέχεια αλλά και ποιά κλαδιά αναζήτησης θα περικοπούν ώστε η αναζήτηση να γίνει πιο αποδοτική.

Οι ευρετικοί αλγόριθμοι είναι προσεγγιστικοί, και συνήθως δίνουν λύση κοντά στη βέλτιστη, εύκολα και γρήγορα. Η βασική λειτουργία του αλγόριθμου A* είναι η εύρεση μία βέλτιστης διαδρομής σε ένα διακριτό χώρο. Αρχικά ο αλγόριθμος υπολογίζει τις πιθανές διαδρομές από τη σημείο αφετηρίας προεξοφλώντας και το ανάλογο κόστος. Αφού καταχωρήσει τα πιθανά ενδεχόμενα διαδρομής, επιλέγει τη αυτή που συνοδεύεται από μικρότερο κόστος. Η συνάρτηση κόστους, f περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

Η συνάρτηση g αντιπροσωπεύει το ακριβές κόστος της μετακίνησης από τον αρχικό κόμβο αφετηρία σε οποιαδήποτε κορυφή του τετραγωνικού πλέγματος και η συνάρτηση h αντιπροσωπεύει το ελάχιστο δυνατό κόστος από το παρόν σημείο μέχρι το τελικό. Το κριτήριο για την επιλογή κάθε παρακείμενου κελιού είναι η ελαχιστοποίηση της τιμής της συνάρτησης $f(n)$, συνεπώς όσο πιο κοντά βρίσκεται ένα σημείο n_1 στο τελικό σημείο, τόσο μικρότερη τιμή θα έχει η συνάρτησης κόστους $f(n_1)$. Κυρίαρχο πλεονέκτημα της μεθόδου A* είναι ότι το κριτήριο της απόστασης επιδέχεται κάθε είδους διαφοροποίηση ενώ είναι δυνατόν να οριστούν και άλλοι παράγοντες στη συνάρτηση κόστους, όπως η ενεργειακή απόδοση και ο χρόνος.

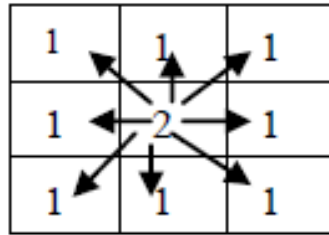
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η υλοποίηση του A* σε ένα πρόβλημα σχεδιασμού διαδρομής με ένα δισδιάστατο εμπόδιο, με δεδομένα τα τετραγωνικά πλέγματα της αφετηρίας (ροζ) και του στόχου (μπλε). Με κίτρινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές που βρίσκονται μακριά από το στόχο, με γαλάζιο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές μακριά από την αφετηρία ενώ φαίνεται με διακεκομμένες γραμμές η διαδρομή που χαράσσει ο αλγόριθμος [41].



Εικ.15.Σχεδιασμός διαδρομής με A* με κοίλο εμπόδιο

Ο αλγόριθμος A* είναι αλγόριθμος γραφικής αναζήτησης με την έννοια ότι προσαρμόζει την περιοχή διερεύνησης σε ένα τετραγωνικό πλέγμα, δηλαδή σε ένα δισδιάστατο πίνακα. Κάθε στοιχείο του πίνακα αναπαριστά ένα από τα τετράγωνα του πλέγματος (κόμβο) του οποίου η κατάσταση χαρακτηρίζεται ως προσπελάσιμη ή μη- προσπελάσιμη. Η συντομότερη διαδρομή από τον αρχικό στο τελικό κόμβο αποκαλύπτεται μέσα από τη διερεύνηση όλων των τετραγώνων.

Ο πίνακας κίνησης του οχήματος όπως υλοποιείται στον αλγόριθμο φαίνεται παρακάτω. Ο αριθμός 2 απεικονίζει τη θέση του ρομπότ ενώ οι αριθμοί 1 δείχνουν όλες τις πιθανές μετακινήσεις που μπορεί αυτό να πραγματοποιήσει στο επίπεδο κίνησης του. Έτσι βλέπουμε πως το υποβρύχιο μπορεί να κινηθεί πάνω, κάτω, αριστερά δεξιά και διαγώνια προς τέσσερις προσανατολισμούς. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η διάταξη αυτή επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία κινήσεων του οχήματος.



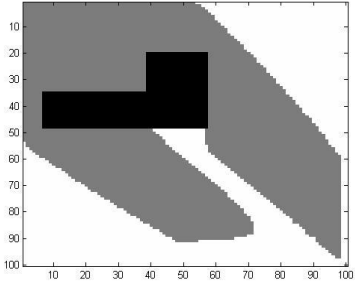
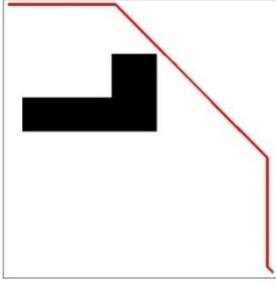
Εικ.16. Προσανατολισμός κινήσεων του ρομπότ

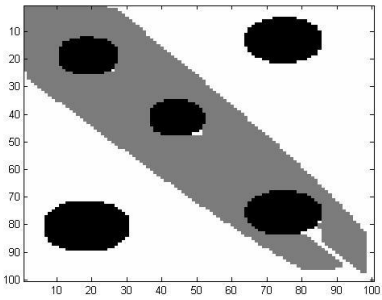
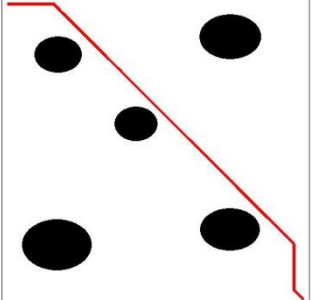
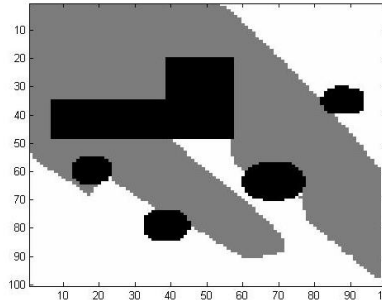
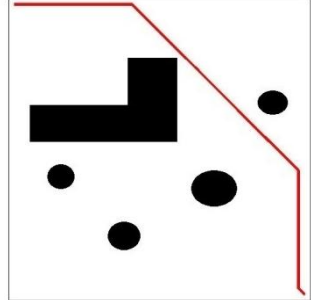
4.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στη παρακάτω προσομοίωση εκτελέσαμε τον αλγόριθμο A* για την αναζήτηση του βέλτιστου μονοπατιού σε έναν επίπεδο χώρο κίνησης δύο διαστάσεων (x,y). Ο αλγόριθμος εισάγει δυαδική εικόνα όπου οι περιοχές εμποδίων απεικονίζονται με μαύρο χρώμα. Για την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων επιλέχθηκε ανάλυση χάρτη (100x100) ώστε να περιοριστεί ο χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης ενώ οι συντεταγμένες της αρχικής και τελικής θέσης του οχήματος παρέμειναν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ως εξής:

- Αρχικός στόχος: (10,10)
- Τελικό στόχος: (490,490)

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε τρεις φορές για διαφορετικά εμπόδια όπως περιγράφεται παραπάνω. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι πρώτες δύο στήλες απεικονίζουν ένα στιγμιότυπο του μονοπατιού που επιλέγει ο αλγόριθμος A* και το τελικό μονοπάτι αντίστοιχα. Ακολουθώς σημειώνεται ο χρόνος υλοποίησης σε δευτερόλεπτα και το μήκος μονοπατιού.

Ανάπτυξη αλγορίθμου	Τελικό Μονοπάτι	Χρόνος Εκτέλεσης (sec)	Μήκος μονοπατιου
		171.38	793

		115.62	723
		145.34	793

Πίν.2. Αποτελέσματα A*

4.3.3 Συμπεράσματα

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι κατά την εφαρμογή του A* για μικρά καταναμημένα εμπόδια έχουμε μικρότερο χρόνο εκτέλεσης και συντομότερο μονοπάτι ενώ ο αλγόριθμος παρουσιάζει μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης στη περίπτωση που συναντά μεγάλο συμπαγές εμπόδιο στο διαθέσιμο χώρο. Επιπλέον το μέγεθος του μονοπατιού για το μεγάλο εμπόδιο είναι ακριβώς ίδιο στη περίπτωση που στο χώρο προστίθενται και μικρά καταναμημένα εμπόδια.

4.4 Υλοποίηση με Αλγόριθμο RRT

4.4.1 Περιγραφή RRT

Ο αλγόριθμος Rapidly-exploring Random Trees (RRT) ή στα ελληνικά Ταχέως-εξερευνητικά Τυχαία Δέντρα αποτελεί μία δημοφιλή μέθοδο αναζήτησης του βέλτιστου μονοπατιού. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υποβρύχια περιβάλλοντα με έντονες διακυμάνσεις και μεγάλη μεταβλητότητα των φυσικών παραμέτρων καθώς χαρακτηρίζεται από απλότητα στην υλοποίηση [42]. Η λογική ανάπτυξης του αλγορίθμου είναι η εξής: Ξεκινώντας από το αρχικό κόμβο αναζήτησης ο αλγόριθμος χαράσσει τη συντομότερη διαδρομή, επιλέγοντας σε κάθε βήμα του

το κοντινότερο γειτονικό κόμβο. Με αυτό το τρόπο αναπτύσσει δέντρα τα οποία εξαπλώνονται κατά τυχαίο τρόπο στο διαθέσιμο χώρο κίνησης του οχήματος. Σε κάθε εφικτή σύνδεση που πραγματοποιείται, ο αλγόριθμος προσθέτει ένα ακόμη κλαδί στη δενδροειδή δομή του, συνεχίζοντας έτσι μέχρι τον τελικό κόμβο. Η δομή ανάπτυξης του RRT φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικ.17. Εξάπλωση του RRT

Μία από τις παραμέτρους που καθορίζουν την ανάπτυξη του αλγορίθμου είναι το μέγεθος του βήματος. Έτσι, μικρός αριθμός βήματος εξάπλωσης συνιστά σε δενδροειδή σχήματα μεγαλύτερης λεπτομέρειας που απαιτούν όμως μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης. Επιπλέον είναι δυνατή η εφαρμογή της ανάπτυξης του αλγορίθμου προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, προσαρμόζοντας κατάλληλα και το αντίστοιχο βάρος πιθανότητας.

4.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης RRT

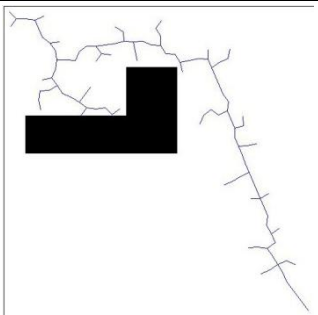
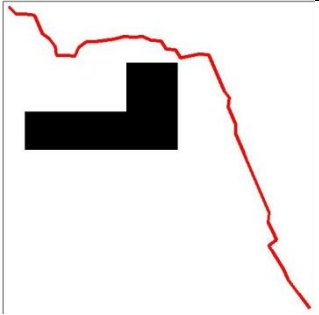
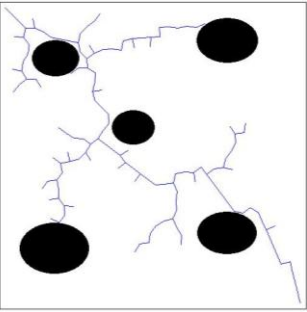
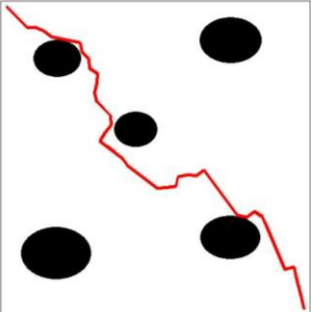
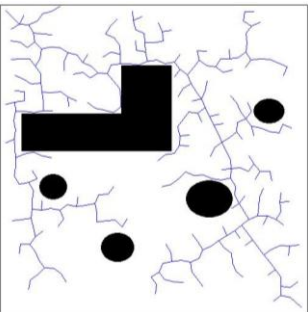
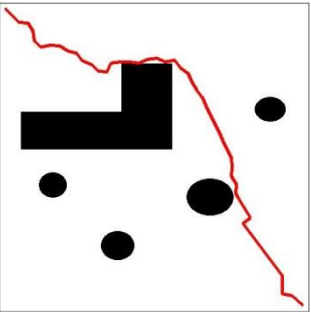
Στη παρακάτω προσομοίωση εκτελέσαμε τον αλγόριθμο RRT για την αναζήτηση του βέλτιστου μονοπατιού σε έναν επίπεδο χώρο κίνησης (x,y). Αρχικά εισάγουμε δυαδική εικόνα απεικονίζοντας τις περιοχές εμποδίων με μαύρο χρώμα.

Ο αλγόριθμος πραγματοποιεί την αναζήτηση του κοντινότερου κόμβου αναπτύσσοντας δενδροειδείς διαδρομές στο πεδίο κίνησης του οχήματος. Σαν αρχική συνθήκη επιλέχθηκε μέγεθος βήματος ίσο με 15 ενώ οι συντεταγμένες της αρχικής και τελικής θέσης του οχήματος παρέμειναν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ως εξής:

- Αρχικός στόχος: (10,10)
- Τελικό στόχος: (490,490)

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε τρεις φορές για διαφορετικά εμπόδια όπως περιγράφεται παραπάνω. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι πρώτες δύο στήλες απεικονίζουν ένα στιγμιότυπο του μονοπατιού που επιλέγει ο αλγόριθμος RRT και

το τελικό μονοπάτι αντίστοιχα. Ακολουθώς σημειώνεται ο χρόνος υλοποίησης σε δευτερόλεπτα και το μήκος μονοπατιού.

Ανάπτυξη αλγορίθμου	Τελικό Μονοπάτι	Χρόνος Εκτέλεσης (sec)	Μήκος μονοπατιού
		11.61	848
		29.98	844
		29.10	867

Πίν.3. Αποτελέσματα RRT

4.4.3 Συμπεράσματα

Από τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνουμε ότι ο αλγόριθμος RRT φτάνει στο συντομότερο μονοπάτι γρηγορότερα όταν το εμπόδιο στο χώρο είναι μεγάλο και συμπαγές. Παρ' όλα αυτά το μήκος του βέλτιστου μονοπατιού φαίνεται ελάχιστα μικρότερο στην περίπτωση που υπάρχουν στο χώρο για μικρά κατανεμημένα εμπόδια.

4.5 Υλοποίηση με Αλγόριθμο Τεχνητού Δυναμικού Πεδίου

4.5.1 Περιγραφή αλγορίθμου Τεχνητού Δυναμικού Πεδίου

Όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, οι μέθοδοι δυναμικών πεδίων (Potential Field) προσανατολίζονται στην ιδέα της χρησιμοποίησης δυναμικών συναρτήσεων για την αποφυγή εμποδίων. Η μέθοδος αυτή θεωρεί το ρομπότ σαν ένα σημείο το οποίο κινείται στο διαθέσιμο πεδίο υπό την επίδραση ενός τεχνητού δυναμικού πεδίου. Η τελική διαμόρφωση του ρομπότ δημιουργεί ένα «ελκτικό δυναμικό» το οποίο έλκει το ρομπότ προς τον στόχο ενώ τα εμπόδια-διαμορφώσεων παράγουν ένα «απωθητικό δυναμικό» το οποίο σπρώχνει το ρομπότ μακριά από αυτά.

Βασικό πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι είναι λιγότερο δαπανηρές σε σύγκριση με τις υπόλοιπες που προτείνονται για την εύρεση του βέλτιστου μονοπατιού σε υποθαλάσσιες συνθήκες. Στα κυριότερα μειονεκτήματα τους συγκαταλέγεται το γεγονός ότι παρουσιάζουν τοπικά ελάχιστα, δηλαδή περιοχές όπου η απωθητική δύναμη γίνεται ίση με την ελκτική δύναμη με αποτέλεσμα να παγιδεύεται το όχημα γεγονός που τις καθιστά αναποτελεσματικές σε περιβάλλοντα που υπάρχουν πολύπλοκα εμπόδια.

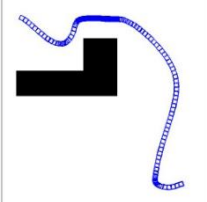
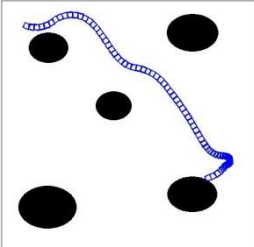
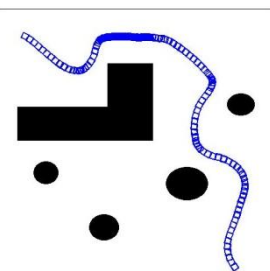
4.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης αλγορίθμου APF

Στη παρακάτω προσομοίωση εκτελέσαμε τον αλγόριθμο τεχνητού Δυναμικού Πεδίου (APF) για την αναζήτηση του βέλτιστου μονοπατιού σε έναν επίπεδο χώρο κίνησης (x,y). Αρχικά εισάγουμε δυαδική εικόνα απεικονίζοντας τις περιοχές εμποδίων με μαύρο χρώμα. Ο αλγόριθμος πραγματοποιεί την αναζήτηση της βέλτιστης διαδρομής αναπτύσσοντας δυναμικά πεδία. Οι συντεταγμένες της αρχικής και τελικής θέσης του οχήματος παρέμειναν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ως εξής:

- Αρχικός στόχος: (10,10)
- Τελικό στόχος: (450,450)

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε τρεις φορές για διαφορετικά εμπόδια όπως περιγράφεται παραπάνω. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η πρώτη δύο στήλη απεικονίζουν το τελικό μονοπάτι ενώ ακολούθως σημειώνεται ο χρόνος υλοποίησης σε δευτερόλεπτα και το μήκος μονοπατιού που επιλέχθηκε.

Τελικό Μονοπάτι	Χρόνος Εκτέλεσης (sec)	Μήκος μονοπατιου

	8.33	831
	-	-
	7.21	838

Πιν.4. Αποτελέσματα APF

4.5.3 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις, ο αλγόριθμος αυτός απαιτεί αρκετά μικρότερους χρόνους εκτέλεσης για περίπου ίδιο μήκος διαδρομής. Όμως παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των μικρών εμποδίων δεν υπάρχει βέλτιστο μονοπάτι και το όχημα φτάνει σε σύγκρουση

ΚΕΦ.5: Επίλογος- Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η σύγκριση 3 αλγορίθμων που συστήνονται για το πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος AUV κατά την πλοήγηση του σε τυρβώδη θαλάσσια ύδατα. Οι συντεταγμένες αρχικής και τελικής θέσης του οχήματος παρέμειναν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης κατά την οποία εξετάστηκε ο χρόνος υλοποίησης της διαδρομής και το μήκος του μονοπατιού. Η διαδικασία εκτελέστηκε για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εμποδίων, α) μεγάλο εμπόδιο, β) μικρά και καταναμεμένα εμπόδια και γ) συνδυασμός των δύο, η θέση των οποίων παρέμεινε επίσης σταθερή κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος. Η παραπάνω μεθοδολογία υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab R2013a. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών ο αλγόριθμος με τον A* εξασφαλίζει το συντομότερο μονοπάτι σε σχέση με τους RRT (Rapidly-exploring Random Trees) και APF (Artificial Potential Field). Εντούτοις ο χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης και για τις τρεις δοκιμές είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σχέση με τους άλλους δύο. Ο αλγόριθμος APF απαιτεί τους μικρότερους υπολογιστικούς χρόνους με σημαντική διαφορά από τους υπόλοιπους. Αποδεικνύεται όμως αναποτελεσματικός στην εύρεση του βέλτιστου μονοπατιού μέσα από μικρά καταναμεμένα εμπόδια καθώς παρατηρούμε ότι το όχημα φτάνει σε σύγκρουση. Ως παράθεση στα παραπάνω συμπεράσματα αξίζει να σημειωθεί ότι οι αρχικές συνθήκες στατικότητας των αρχικών και τελικών θέσεων του οχήματος αλλά και των συνθηκών πλεύσης απέχουν σημαντικά από τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στα υποβρύχια ύδατα. Είναι γνωστό ότι η διάδοση της πληροφορίας στα υποβρύχια κανάλια συνοδεύεται από πολυάριθμες δυσκολίες. Τα ωκεάνια νερά χαρακτηρίζονται από μεγάλες διακυμάνσεις ενώ στο θαλάσσιο περιβάλλον εξελίσσεται ταυτόχρονα ένα πλήθος κυματικών φαινομένων τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Στη περίπτωση που επιχειρούσαμε την εκ βάθους κατανόηση της συμπεριφοράς των υποβρύχιων καναλιών και των επιπτώσεων που επιφέρουν στα φαινόμενα διάδοσης του ήχου θα οδηγούμασταν σε εκθετική αύξηση της περιπλοκότητας των παραμέτρων, γεγονός που θα απαιτούσε και αύξηση υπολογιστικών πόρων. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι αλγόριθμοι γραφικής αναζήτησης που προτείνονται στη παρούσα μελέτη αποδεικνύονται ανεπαρκείς για την εύρεση λύσης στο πρόβλημα του βέλτιστου μονοπατιού. Οι προκλήσεις αυτές γεννούν την ανάγκη για ανάπτυξη λύσεων και μεθόδων με μεγαλύτερες υπολογιστικές ικανότητες που μπορούν να ανταποκριθούν στις δυσχερείς συνθήκες των ωκεάνιων υδάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=y>.
- [2] <http://www.gartner.com/newsroom/id/3165317>
- [3] http://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
- [4] Internet of Things beyond the Hype: Research, Innovation and Deployment.
- [5] S. Bandyopadhyay, P. Balamuralidhar, A. Pal Interoperation among IoT standards. *Journal of ICT Standardization*, 1 (2013), pp. 253–270
- [6] The Internet of Things: A survey Luigi Atzori a , Antonio Iera b , Giacomo Morabito c,*
- [7] Ποιότητα Υπηρεσίας στο Υπολογιστικό Πλέγμα ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ του Δημητρίου Κ. Καμενόπουλου, 2009.
- [8] Jin, Jiong, Jayavardhana Gubbi, Slaven Marusic, and Marimuthu Palaniswami. "An Information Framework for Creating a Smart City Through Internet of Things." *IEEE Internet of Things Journal* 1.2 (2014): 112-21. Web.
- [9] Gaur, Aditya, Bryan Scotney, Gerard Parr, and Sally Mcclean. "Smart City Architecture and Its Applications Based on IoT." *Procedia Computer Science* 52 (2015): 1089-094. Web.
- [10] Domingues, Pedro, Paulo Carreira, Renato Vieira, and Wolfgang Kastner. "Building automation systems: Concepts and technology review." *Computer Standards & Interfaces* 45 (2016): 1-12. Web.
- [11] Ancillotti, Emilio, Raffaele Bruno, and Marco Conti. "The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges." *Computer Communications* 36.17-18 (2013): 1665-697. Web.
- [12] Dimitrakopoulos, G., Nikolaidou, M., Anagnostopoulos, D. and Bravos, G. (2013). Proactive, knowledge-based intelligent transportation system based on vehicular sensor networks. *IET Intelligent Transport Systems*, 7(4), pp.454-463.,
- [13] Zhang, J., Wang, F., Wang, K., Lin, W., Xu, X. and Chen, C. (2011). Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(4), pp.1624-1639.
- [14] Baig, M. and Gholamhosseini, H. (2013). Smart Health Monitoring Systems: An Overview of Design and Modeling. *Journal of Medical Systems*, 37(2).
- [15] Solanas, A., Patsakis, C., Conti, M., Vlachos, I., Ramos, V., Falcone, F., Postolache, O., Perez-martinez, P., Pietro, R., Perrea, D. and Martinez-Balleste, A. (2014). Smart health: A context-aware health paradigm within smart cities. *IEEE Communications Magazine*, 52(8), pp.74-81.
- [16] Kaur, N. and Sood, S. (2015). Cognitive decision making in smart industry. *Computers in Industry*, 74, pp.151-161.

- [17] Segura Velandia, D., Kaur, N., Whittow, W., Conway, P. and West, A. (2016). Towards industrial internet of things: Crankshaft monitoring, traceability and tracking using RFID. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 41, pp.66-77.
- [18] Akyildiz, I., Pompili, D. and Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 3(3), pp.257-279.
- [19] Demirors, E., Sklivanitis, G., Melodia, T., Batalama, S. and Pados, D. (2015). Software-defined underwater acoustic networks: toward a high-rate real-time reconfigurable modem. *IEEE Communications Magazine*, 53(11), pp.64-71.
- [20] Domingo, M. (2012). An overview of the internet of underwater things. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(6), pp.1879-1890.
- [21] Ayaz, M., Baig, I., Abdullah, A. and Faye, I. (2011). A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 34(6), pp.1908-1927.
- [22] <http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/08auvfest/background/auvs/auvs.html>
- [23] Sirvent, Jesus Antonio Llor, and Manuel Perez. "Modelling Underwater Wireless Sensor Networks." *Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design* (2010): n. pag. Web.
- [24] Yan, Hai, Zhijie Jerry Shi, and Jun-Hong Cui. "DBR: Depth-Based Routing for Underwater Sensor Networks." *NETWORKING 2008 Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet Lecture Notes in Computer Science* (n.d.): 72-86. Web.
- [25] Xie P., Cui JH., Lao L. (2006) VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks. In: Boavida F., Plagemann T., Stiller B., Westphal C., Monteiro E. (eds) *NETWORKING 2006. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems*. NETWORKING 2006. Lecture Notes in Computer Science, vol 3976. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [26] Jornet, J.M., Stojanovic, M. (2008). Focused beam routing protocol for underwater acoustic networks. Proceedings of the third ACM international workshop on Underwater Networks, San Francisco, California, USA, September 15.
- [27] Wynn, R., Huvenne, V., Le Bas, T., Murton, B., Connelly, D., Bett, B., Ruhl, H., Morris, K., Peakall, J., Parsons, D., Sumner, E., Darby, S., Dorrell, R. and Hunt, J. (2014). Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Marine Geology*, 352, pp.451-468.
- [28] Graham, A. G. C., P. Dutrieux, D. G. Vaughan, F. O. Nitsche, R. Gyllencreutz, S. L. Greenwood, R. D. Larter, and A. Jenkins (2013), Seabed corrugations beneath an Antarctic ice shelf revealed by autonomous underwater vehicle survey: Origin and implications for the history of Pine Island Glacier, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 118, 1356–1366, doi:10.1002/jgrf.20087.
- [29] Furlong, Maaten E., Dave Paxton, Peter Stevenson, Miles Pebody, Stephen D. Mcphail, and James Perrett. "Autosub Long Range: A long range deep diving AUV for ocean monitoring." *2012 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)* (2012): n. pag. Web.

- [30] Hobson, Brett W., James G. Bellingham, Brian Kieft, Rob Mcewen, Michael Godin, and Yanwu Zhang. "Tethys-class long range AUVs - extending the endurance of propeller-driven cruising AUVs from days to weeks." *2012 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)* (2012): n. pag. Web.
- [31] Joung, Tae-Hwan, Karl Sammut, Fangpo He, and Seung-Keon Lee. "Shape optimization of an autonomous underwater vehicle with a ducted propeller using computational fluid dynamics analysis." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 4.1 (2012): 44-56. Web.
- [32] Aghababa, Mohammad Pourmahmood. "3D Path Planning for Underwater Vehicles Using Five Evolutionary Optimization Algorithms Avoiding Static and Energetic Obstacles." *Applied Ocean Research* 38 (2012): 48-62. Web
- [33] Zeng, Z., Lian, L., Sammut, K., He, F., Tang, Y. and Lammas, A. (2015). A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 110, pp.303-313.
- [34] Zeng, Z., Sammut, K., Lian, L., He, F., Lammas, A. and Tang, Y. (2016). A comparison of optimization techniques for AUV path planning in environments with ocean currents. *Robotics and Autonomous Systems*, 82, pp.61-72.
- [35] Goerzen, C., Z. Kong, and B. Mettler. "A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance." *Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs, Reno, Nevada, U.S.A. June 8–10, 2009* (2009): 65-100. Web.
- [36] LaValle, S. (2014). *Planning algorithms*. 1st ed. New York (NY): Cambridge University Press.
- [37] <http://theory.stanford.edu/~amitp/GameProgramming/AStarComparison.html>
- [38] Garau, B., A. Alvarez, and G. Oliver. "Path Planning of Autonomous Underwater Vehicles in Current Fields with Complex Spatial Variability: an A* Approach." *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (n.d.): n. pag. Web.
- [39] Duchoň, František, Andrej Babinec, Martin Kajan, Peter Beňo, Martin Florek, Tomáš Fico, and Ladislav Jurišica. "Path Planning with Modified a Star Algorithm for a Mobile Robot." *Procedia Engineering* 96 (2014): 59-69. Web.
- [40] Rkala.in. (2017). *Rahul Kala*. [online] Available at: <http://rkala.in/codes.php> [Accessed 24 Feb. 2017].
- [41] <http://web.mit.edu/eranki/www/tutorials/search/>
- [42] Kuffner, J.j., and S.m. Lavalle. "RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning." *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)* (n.d.): n. pag. Web.

