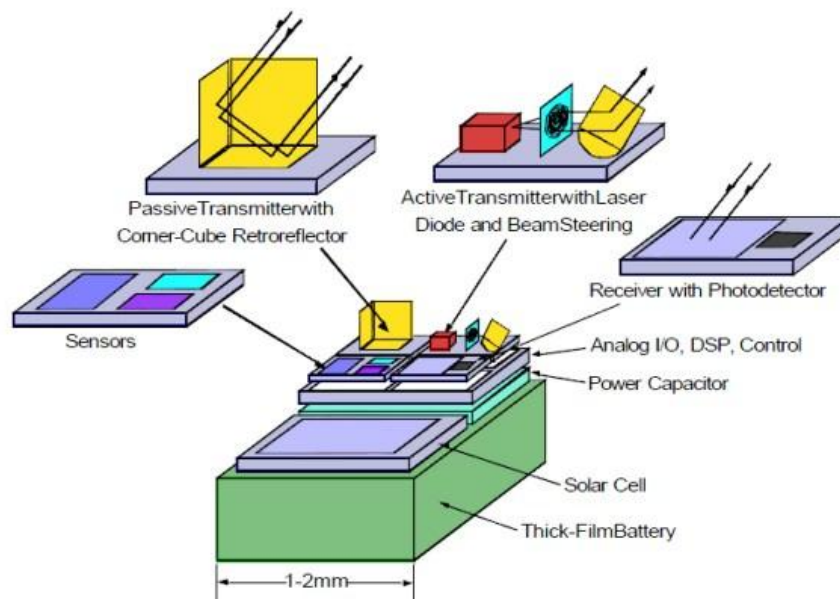




## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

<< Δίκτυα αισθητήρων, μελέτη της τεχνολογίας smart dust >>

## Smart Dust Mote



Του Φοιτητή

Ασλανίδη Νικόλαου

Αρ.Μητρώου: 052841

Επιβλέπων Καθηγητής

Ψαρράς Νικόλαος

## Θεσσαλονίκη 2017

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN) αποτελούν, τα τελευταία χρόνια, ένα πεδίο με μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα δημιουργώντας νέες προκλήσεις και εφαρμογές στον τομέα των ασύρματων και κατανεμημένων δικτύων. Ένα δίκτυο αισθητήρων WSN αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό μικρών και φθηνών συσκευών, γνωστών ως αισθητήρες (sensors) ή αισθητήριοι κόμβοι (sensor nodes). Οι αισθητήριοι κόμβοι ενός δικτύου WSN έχουν περιορισμένους υπολογιστικούς και ενεργειακούς πόρους ενώ παράλληλα διαθέτουν τη δυνατότητα ανίχνευσης και μέτρησης φυσικών μεγεθών αλλά και ελέγχου των πληροφοριών που συλλέγονται. Η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αυτών διέπεται από πολλά πρωτόκολλα επικοινωνίας και δρομολόγησης, τα οποία καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό και την απόδοση των δικτύων WSN.

Η χρήση της τεχνολογίας έξυπνης σκόνης (smart dust) στα δίκτυα WSN δημιουργεί μια κατηγορία κατανεμημένων δικτύων αισθητήρων, τα δίκτυα smart dust (smart dust networks), βασικό χαρακτηριστικό των οποίων αποτελεί η κατανάλωση ενέργειας.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη της τεχνολογίας smart dust στα δίκτυα WSN. Στα πλαίσια της εργασίας, θα γίνει ανάλυση και καταγραφή των διάφορων πρωτοκόλλων επικοινωνίας και δρομολόγησης καθώς και των τεχνολογιών ενδιάμεσου λογισμικού που χρησιμοποιούνται, ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, προκειμένου τα δίκτυα αυτά να λειτουργούν απρόσκοπτα με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Τέλος, η μελέτη θα περιλαμβάνει και μια επισκόπηση και σύγκριση εργαλείων προσομοίωσης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

## ABSTRACT

---

Wireless Sensor Networks (WSN) is an emerging research area that creates new fields of challenges and applications in wireless and distributed networks. A WSN network consists of a huge number of small and inexpensive devices, known as sensors or sensor nodes. Sensor nodes have limited computing and energy resources, but are also able of sensing and measuring physical quantities, and controlling the collected information. Wireless communication between nodes use many communication and routing protocols. Performance of WSN networks depends largely on the same protocols.

The use of smart dust technology in WSN networks creates a category of distributed sensor networks, the so called smart dust networks. Power consumption is one of the key concerns of this type of networks.

The purpose of this thesis is to study the use of smart dust technology in WSN networks. For this purpose, various communication and routing protocols are presented and analyzed along with the middleware technologies used, or can be used, so that these networks could operate seamlessly with the lowest power consumption. Finally, the study also includes an overview and comparison of simulation tools for wireless sensor networks.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

<b>Περίληψη</b> .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Κατανεμημένα Δίκτυα</b> .....	<b>8</b>
1.1 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων .....	9
1.2 Η τεχνολογία smartdust .....	10
1.3 Υπάρχουσες και μελλοντικές εφαρμογές της τεχνολογίας smartdust ...	11
1.4 Άλλοι τύποι ασύρματων δικτύων .....	14
1.4.1 Ad-hoc δίκτυα.....	14
1.4.2 Αυτόνομα δίκτυα αισθητήρων.....	18
<b>2 Δίκτυα Smart Dust</b> .....	<b>23</b>
2.1 Εφαρμογές και προκλήσεις .....	24
2.2 Αρχιτεκτονική δομή των smart dust motes .....	26
2.3 Στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας .....	28
2.4 Τεχνολογίες επικοινωνίας στα δίκτυα smartdust .....	29
2.4.1 Μετάδοση δεδομένων μέσω ραδιοσυχνοτήτων .....	30
2.4.2 Οπτική μετάδοση δεδομένων .....	31
2.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας .....	35
2.6 Πρωτόκολλα δρομολόγησης .....	37
2.6.1 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει καθορισμού διαδρομής.....	39
2.6.2 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει δομής του δικτύου .....	40
2.6.3 Πρωτόκολλα δρομολόγησης με βάση τη λειτουργία τους .....	42
2.6.4 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει του εκκινητή επικοινωνίας .....	45
2.6.5 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει επιλογής του επόμενου άλματος	45
2.7 Τεχνολογίες ενδιάμεσου λογισμικού.....	47
2.7.1 Προσέγγιση βάσης δεδομένων.....	48
2.7.2 Προσέγγιση βάσει συμβάντων.....	49
2.7.3 Προσέγγιση βάσει εφαρμογών .....	51
2.7.4 Προσέγγιση τμηματικού προγραμματισμού .....	53
2.7.5 Προσέγγιση εικονικών μηχανών.....	54
<b>3 Εργαλεία προσομοίωσης δικτύων WSN</b> .....	<b>58</b>
3.1 NS-2 .....	58
3.2 TOSSIM.....	61
3.3 EMSTAR.....	63
3.4 GLoMoSim.....	64
3.5 J-SIM .....	66
3.6 COOJA .....	68
3.7 Castalia.....	69

3.8 <i>Shawn</i> .....	71
3.9 <i>SENSE</i> .....	73
3.10 <i>Prowler</i> .....	74
3.11 <i>Ανάλυση και σύγκριση εργαλείων προσομοίωσης</i> .....	76
<b>Συμπεράσματα</b> .....	<b>80</b>
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>82</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Στις μέρες μας, τα δίκτυα επικοινωνίας εξυπηρετούν όλο και μεγαλύτερο αριθμό ατόμων και σκοπών, γεγονός που αυξάνει ιδιαίτερα τη σημασία τους. Η δημιουργία και η ανάπτυξη νέων τεχνολογικών τάσεων αποτελούν την απάντηση στην αυξανόμενη ζήτηση για προηγμένες δομές δικτύου, όπως είναι τα καταμεμημένα δίκτυα αισθητήρων (distributed sensor networks). Πιο συγκεκριμένα, τα δίκτυα έξυπνης σκόνης (smart dust networks) ως κατηγορία των καταμεμημένων δικτύων αισθητήρων, έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε σαφώς καθορισμένες περιπτώσεις χρήσης.

Οι σύγχρονες τεχνολογίες εστιάζουν στην αυτοματοποίηση και στην σμίκρυνση των χρησιμοποιούμενων συσκευών (Mashalkar & Kazi, 2015). Άλλωστε, η εξέλιξη της ιστορίας των υπολογιστικών συστημάτων γενικότερα έχει να παρουσιάσει μια τάση προς τη μείωση του μεγέθους των υπολογιστικών συσκευών με παράλληλη αύξηση της συνδεσιμότητας και ενίσχυσης της αλληλεπίδρασης με τον φυσικό κόσμο. Πρόσφατα, η δημοτικότητα των μικρών υπολογιστικών συσκευών, όπως οι υπολογιστές χειρός και τα κινητά τηλέφωνα, έχει αυξηθεί κατά πολύ. Η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στη χρήση μειωμένων διαστάσεων και κόστους αισθητήρων που καθιστούν τις συσκευές αυτές ικανές να συνδεθούν σε οποιοδήποτε ασύρματο επικοινωνιακό δίκτυο.

Η τεχνολογία smart dust αναφέρεται σε πολύ μικρές ηλεκτρονικές συσκευές που έχουν σχεδιαστεί για να συλλέγουν απίστευτα μεγάλη ποσότητα πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον τους, ενώ κυριολεκτικά ίπτανται στον αέρα (Warneke και συν., 2001). Σήμερα, αισθητήρες, υπολογιστές και συσκευές ασύρματης επικοινωνίας έχουν συρρικνωθεί τόσο πολύ σε μέγεθος που η συσκευασία τους σε μια ενιαία μικροσκοπική συσκευή, μπορεί να δώσει νέες διαστάσεις στον τομέα των επικοινωνιών. Η ιδέα πίσω από την τεχνολογία της έξυπνης σκόνης είναι η συσκευασία εξελιγμένων αισθητήρων, μικροσκοπικών υπολογιστών και συσκευών ασύρματης επικοινωνίας σε ένα εξάρτημα μεγέθους ενός μόλις κυβικού χιλιοστού, το οποίο θα αποτελεί τη βάση ενός ολοκληρωμένου, καταμεμημένου δικτύου αισθητήρων. Η κατανάλωση των εξαρτημάτων αυτών είναι αρκετά μικρή, γεγονός που τους επιτρέπει να παραμένουν στον αέρα για ώρες και καθώς παρασύρονται από τον άνεμο, μπορούν να παρακολουθούν το περιβάλλον, να μετρούν φυσικά μεγέθη, όπως το φως, τον ήχο, τη θερμοκρασία, κλπ, να συλλέγουν ένα ευρύ φάσμα άλλων πληροφοριών και να αποστέλλουν τα δεδομένα αυτά σε σταθμό βάσης, ο οποίος μπορεί να βρίσκεται χιλιόμετρα μακριά.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη της τεχνολογίας smart dust στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN). Στα πλαίσια της εργασίας, θα γίνει ανάλυση και καταγραφή των διάφορων πρωτοκόλλων επικοινωνίας και δρομολόγησης καθώς και των τεχνολογιών ενδιάμεσου λογισμικού που χρησιμοποιούνται, ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, προκειμένου τα δίκτυα αυτά να λειτουργούν απρόσκοπτα με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Τέλος, η μελέτη θα περιλαμβάνει και μια επισκόπηση και σύγκριση εργαλείων προσομοίωσης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Για το λόγο αυτό η πτυχιακή εργασία είναι διαρθρωμένη σε 3 κεφάλαια.

Το 1ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στα κατανεμημένα δίκτυα, ως ευρύτερο σύνολο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων WSN και των δικτύων smart dust. Ουσιαστικά το κεφάλαιο αυτό αποτελεί εισαγωγή στα δίκτυα smart dust καθώς γίνεται μια σύντομη αναφορά της ιστορικής τους εξέλιξης και παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα υλοποίησης της τεχνολογίας έξυπνης σκόνης.

Το 2ο Κεφάλαιο αποτελεί το μεγαλύτερο κεφάλαιο και την τεχνική βάση της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση και καταγραφή των μεθόδων επικοινωνίας και των διάφορων πρωτοκόλλων δρομολόγησης καθώς και των τεχνολογιών ενδιάμεσου λογισμικού που χρησιμοποιούνται, ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, προκειμένου τα δίκτυα αυτά να λειτουργούν απρόσκοπτα με τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Το 3ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στην επισκόπηση και σύγκριση εργαλείων προσομοίωσης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτες για την υλοποίηση των χαρακτηριστικών ενός δικτύου WSN.

## 1 Κατανεμημένα Δίκτυα

---

### Εισαγωγή

Όταν το 1960 ο Paul Baran εισήγαγε την ιδέα του σχετικά με τα κατανεμημένα δίκτυα, κανείς δεν μπορούσε να πιστέψει τις πολυάριθμες εφαρμογές που θα μπορούσαν να έχουν στο μέλλον (Hafner, 2011). Εφαρμογές, όπως για παράδειγμα οι online αγορές που είναι πλέον μια απόλυτα συνηθισμένη διαδικασία της καθημερινής ζωής όλων, φαίνονταν απίθανες εκείνη την εποχή. Αυτός ήταν άλλωστε και ο λόγος που η εταιρεία AT&T αρνήθηκε να επενδύσει πάνω στις μοναδικές ιδέες του Baran για τα κατανεμημένα δίκτυα. Εννιά χρόνια αργότερα, το 1969, η εισαγωγή του δικτύου Arpanet, ένα δίκτυο που δημιουργήθηκε με βάση την πρόταση του Baran, άλλαξε τη στάση του κοινού.

Ο όρος κατανεμημένο χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αρχιτεκτονική δομή ενός δικτύου, ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του οποίου είναι η κατανομή των πόρων (όπως ο εξοπλισμός μεταγωγής και οι επεξεργαστικές μονάδες) σε διαφορετική γεωγραφική ζώνη από αυτή που βρίσκεται το δίκτυο. Σήμερα, μπορούν να απαντηθούν πολλά είδη κατανεμημένων δικτύων, όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα δορυφορικά δίκτυα, κλπ.

Ωστόσο, είναι ευρέως αποδεκτό ότι το Διαδίκτυο είναι το μεγαλύτερο κατανεμημένο δίκτυο στο είδος του (Leiner και συν., 2009). Το Διαδίκτυο έχει αναπτυχθεί απίστευτα γρήγορα από τη στιγμή που πρωτοεμφανίστηκε ως δίκτυο DARPA, το 1960, και έχει εξελιχθεί σε ένα τεράστιο δίκτυο που συνδέει τον κόσμο. Πλέον, περισσότερο από το ένα τέταρτο του παγκόσμιου πληθυσμού το χρησιμοποιεί τακτικά στην καθημερινή του ζωή.

Τα πάντα στον κόσμο αναδιαμορφώνονται για να ταιριάζουν με εφαρμογές και υπηρεσίες που είναι συμβατές με το Διαδίκτυο, το οποίο εξακολουθεί να επεκτείνεται με γρήγορους ρυθμούς και τείνει προς μια διαφορετική διάσταση στο εγγύς μέλλον. Δεν θα ήταν υπερβολή να χαρακτηριστεί ως ένα μετα-δίκτυο δικτύων, στο οποίο, εκτός από τα προαναφερθέντα δίκτυα, θα προστεθούν μελλοντικά και τα ενσωματωμένα συστήματα ελέγχου, πραγματοποιώντας έτσι το όραμα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things) (Hart, 2015).

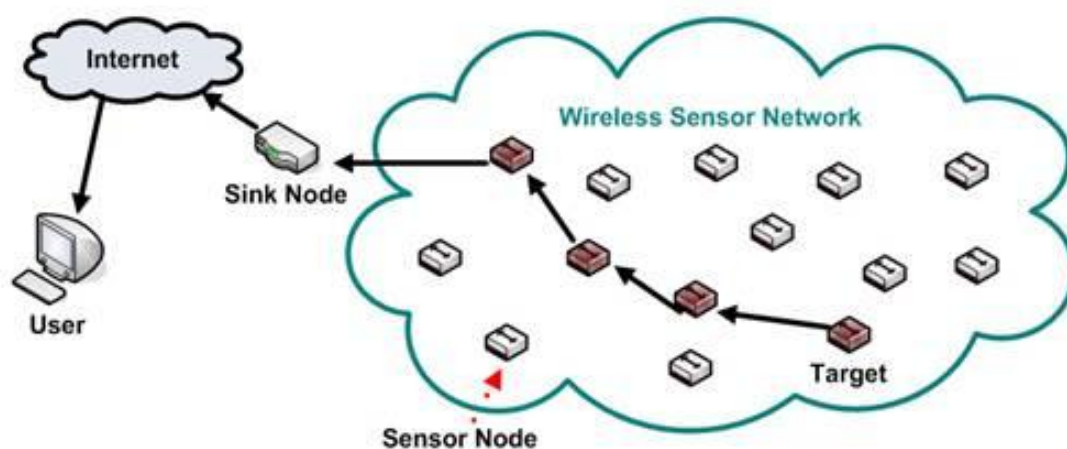
Τα κατανεμημένα δίκτυα αποτελούν τη βάση για πολλά διαφορετικά δίκτυα, καθώς καθένα από αυτά διατηρεί τη βασική δομή ενός κατανεμημένου δικτύου πλαισιώνοντάς τη με κάποια διαφορετικά χαρακτηριστικά και χρήση. Μια πολύ ενδιαφέρουσα περιοχή έρευνας που ανήκει επίσης σε αυτή την κατηγορία των δικτύων είναι τα κατανεμημένα δίκτυα αισθητήρων που παρουσιάζουν μια τεράστια και ενδιαφέρουσα γκάμα εφαρμογών.



Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) ως ένα είδος κατακεντρωμένων δικτύων και στη συνέχεια τα δίκτυα smartdust ως υποκατηγορία των κατακεντρωμένων δικτύων αισθητήρων. Κατόπιν, θα γίνει μια αναφορά των εφαρμογών των δικτύων smartdust καθώς και των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι μελετητές σε αυτό το ερευνητικό πεδίο. Τέλος, θα γίνει μια προσπάθεια μικρής αναφοράς σε άλλους τύπους ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

## 1.1 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN), όπως άλλωστε μπορεί να γίνει κατανοητό από το όνομά τους, αποτελούνται από μια συλλογή αισθητήρων ή συσκευών ανίχνευσης φυσικών μεγεθών που έχουν διασκορπιστεί σε ένα περιβάλλον για σκοπούς παρακολούθησης (Εικ. 1). Στόχος των αισθητήρων αυτών είναι η ανίχνευση, ο εντοπισμός και, ενδεχομένως, η αναφορά διαφόρων φαινομένων του περιβάλλοντος στο οποίο είναι κατακεντρωμένοι. Τέτοια φαινόμενα είναι συνήθως φυσικά, όπως θερμοκρασία, ήχος, υγρασία, ρύπανση, κλπ, ή ακόμα και ένας συνδυασμός τους (Zanjireh&Larijani, 2015).



### ΕΙΚΟΝΑ 1: Γενική άποψη δικτύου WSN

Τα δίκτυα WSN αποτελούν παρακλάδι των δικτύων ad-hoc, στην κατηγορία των κατακεντρωμένων δικτύων. Αποτελούν μια ενδιαφέρουσα περιοχή έρευνας, γεγονός που άλλωστε μαρτυρά και ο μεγάλος αριθμός συνεδρίων που γίνονται πάνω σε αυτόν τον τομέα κάθε χρόνο. Η σημασία των δικτύων WSN αποδείχθηκε και από την δημιουργία του IEEE 802.11 που έχει σχεδιαστεί ειδικά για να καλύψει τα ασύρματα δίκτυα. Το IEEE 802.11 είναι μια οικογένεια προτύπων που καθιστά ειδικούς κανόνες για την εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σύμφωνα με τα πρότυπα της IEEE.

Από το 1997, που υιοθετήθηκε για πρώτη φορά το πρότυπο IEEE 802.11 το οποίο εξετάζει την ασύρματη δικτύωση συσκευών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, πολλές προδιαγραφές προστέθηκαν σε αυτό, για να καταλήξει σήμερα σε μια μεγάλη οικογένεια που περιέχει πρότυπα, όπως (Bartz, 2015):

- **το 802.11.a**, που υποστηρίζει ασύρματη επικοινωνία με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 54Mbps, χρησιμοποιώντας την τεχνική διαμόρφωσης OFDM (OrthogonalFrequencyDivisionMultiplexing) στη μπάντα των 5GHz
- **το 802.11.b**, που υποστηρίζει μεγαλύτερη κάλυψη χώρου με ρυθμούς μετάδοσης έως 11Mbps, χρησιμοποιώντας ως διαμόρφωση τη τεχνική DSSS (Direct-SequenceSpreadSpectrum) στα 2,4GHz, και
- **το 802.11.g**, που χρησιμοποιεί τεχνικές διαμόρφωσης OFDM και DSSS στα 2,4GHz, υποστηρίζοντας διαφορετικές εφαρμογές εσωτερικών και εξωτερικών χώρων με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 54Mbps

Στην πραγματικότητα, οι λειτουργίες της ανίχνευσης, της επεξεργασίας και της επικοινωνίας των αισθητήρων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, δίνουν ένα μεγάλο πλεονέκτημα στα δίκτυα WSN όσον αφορά την εξέλιξη του πεδίου εφαρμογών τους, απαιτώντας όμως παράλληλα την από κοινού εξέταση ζητημάτων όπως η επεξεργασία του κατανεμημένου σήματος και των δεδομένων, ο έλεγχος πρόσβασης μέσου και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Μια επιτυχής εξέταση των ζητημάτων αυτών αλλά και η σύνθεση των υφιστάμενων εφαρμογών WSN ως μέρος του συστήματος υποδομών, δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες ανάπτυξης νέων εφαρμογών που θα μπορούσαν να ανταποκριθούν στις μελλοντικές τεχνολογίες και τάσεις της αγοράς. Για παράδειγμα η εφαρμογή της τεχνολογίας WSN στο έξυπνο δίκτυο, στα συστήματα ευφυίων μεταφορών και στο έξυπνο σπίτι παράγει τεράστιο αριθμό δεδομένων τα οποία μπορούν να εξυπηρετήσουν πολλούς σκοπούς (IEC, 2014).

## **1.2 Η τεχνολογία smartdust**

Η τεχνολογία smartdust δημιουργεί δίκτυα που ανήκουν στην κατηγορία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN). Τα δύο είδη δικτύων παρουσιάζουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά και προκλήσεις αλλά και κάποιες διαφορές.

Η τεχνολογία smartdust ουσιαστικά διαχειρίζεται ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας που περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό υπολογιστικών στοιχείων (αισθητήρες) χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και μικρού μεγέθους (Mashalkar&Kazi, 2015).

Οι αισθητήρες αυτοί, γνωστοί και ως motes, αποτελούν ουσιαστικά μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (Micro-ElectroMechanicalSystems - MEMS). Βασικό τους χαρακτηριστικό είναι η αυτο-οργάνωση με χρήση χαρτών SOM (Self-OrganizingMaps). Το χαρακτηριστικό αυτό τους δίνει τη δυνατότητα να λειτουργούν αυτόνομα εντός δικτύου, γεγονός που σημαίνει ότι μπορούν να οργανώνονται ή, ενδεχομένως, να αναδιοργανώνονται στο δίκτυο χωρίς την απαίτηση ανθρώπινης παρέμβασης και συντήρησης.

Μετά την εγκατάστασή του σε ένα δίκτυο, ένας αισθητήρας πραγματοποιεί μια σειρά από διεργασίες όπως:

- δημιουργεί σύνδεση με άλλους αισθητήρες
- λειτουργεί ως μικρό υπολογιστικό στοιχείο έχοντας ιδιαίτερη συμπεριφορά και συγκεκριμένη εργασία
- λειτουργεί ενεργειακά αυτόνομα συλλέγοντας ενέργεια από το περιβάλλον (π.χ. ηλιακή ενέργεια)
- επικοινωνεί με άλλους αισθητήρες ανταλλάσσοντας μηνύματα μέσω επιλεγμένης τεχνολογίας ασύρματης επικοινωνίας (π.χ. RF)

Η τεχνολογία smartdust έχει ένα τεράστιο και ασυνήθιστο φάσμα εφαρμογών, που μπορεί να περιλαμβάνει από την ανίχνευση πιθανής πυρκαγιάς σε ένα τεράστιο δάσος μέχρι την παροχή ασφάλειας σε ένα κτίριο.

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την τεχνολογία smartdust και το είδος των δικτύων WSN που υποστηρίζουν, θέμα που αποτελεί και το βασικό αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα δοθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

### **1.3 Υπάρχουσες και μελλοντικές εφαρμογές της τεχνολογίας smartdust**

Η τεχνολογία smartdust μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Ο αριθμός αυτός αυξάνεται ολοένα και περισσότερο με την βελτίωση της απόδοσης αλλά και τη μείωση των διαστάσεων και της καταναλωμένης ενέργειας των αισθητήρων. Οι δυνατότητες των motes είναι βαρόμετρο του εύρους των διαστάσεων που μπορούν να φθάσουν οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν την τεχνολογία αυτή. Ο τεράστιος αριθμός εφαρμογών που ήδη κάνει χρήση της τεχνολογίας smartdust περιλαμβάνει χημικές, βιομηχανικές και βιολογικές εφαρμογές, επιχειρηματικές εφαρμογές, ποιοτικό έλεγχο, παρακολούθηση συμβάντων σε πραγματικό χρόνο, επίβλεψη περιοχών μεγάλης κλίμακας (π.χ. εθνικά δάση) και πολλά άλλα.

Μία από τις πρώτες εφαρμογές της τεχνολογίας ήταν ο εντοπισμός οχήματος σε έρημο που βρίσκεται σε απομακρυσμένη από το δίκτυο περιοχή. Το σύστημα αυτό μπορούσε να ανιχνεύσει οποιοδήποτε είδος κίνησης προς κάθε κατεύθυνση.

Μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, για παράδειγμα, για την ανίχνευση των εχθρικών κινήσεων σε πεδίο μάχης ή ακόμα και για την παρατήρηση της συμπεριφοράς ζώων, εντόμων και φυτών για βιολογικές εφαρμογές. Το project αυτό υλοποιήθηκε από τις δυνάμεις πεζοναυτών των ΗΠΑ και εφαρμόστηκε για σκοπούς ανίχνευσης κίνησης στην έρημο PalmSpring της Καλιφόρνια. Στο project αυτό, το δίκτυο που δημιουργήθηκε περιελάμβανε αισθητήρες που χρησιμοποιούσαν τεχνικές αυτο-οργάνωσης και επικοινωνούσαν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Κατά την υλοποίηση, οκτώ αισθητήρες ρίχτηκαν από αεροπλάνο τυχαία πάνω από την περιοχή PalmSpring, άρχισαν να συλλέγουν πληροφορίες για κινήσεις οχημάτων, τις οποίες και έστελναν με επιτυχία στο αεροπλάνο για να ανακτηθούν από έναν υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση (Steel, 2005).

Μια παρόμοια εφαρμογή αλλά σε κλίμακα εργαστηρίου που πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο ΕΤΗ της Ελβετίας και αφορά τα δίκτυα smartdust, ήταν ένα σύστημα για την παρακολούθηση της θέσης φαινομένων του πραγματικού κόσμου. Κατά την εφαρμογή, ως προσομοίωση συμβάντων πραγματικού κόσμου, χρησιμοποιήθηκε ένα αυτοκίνητο (Römer, 2004).

Η ερευνητική ομάδα Sailor στο Πανεπιστήμιο Σαν Ντιέγκο της Καλιφόρνια πραγματοποίησε ένα project για βιολογική εφαρμογή, στο οποίο οι motes μπορούσαν να ανιχνεύσουν τύπους χημικών ενώσεων. Στόχος του project ήταν η δημιουργία δικτύων smartdust για χημικά εποπτικούς σκοπούς, για την ανίχνευση διαφορετικών μορίων ή διαφορετικών χημικών στοιχείων, όπως, για παράδειγμα, την ύπαρξη βλαβερών αερίων σε ένα περιβάλλον. Αυτή η εφαρμογή μπορεί να είναι χρήσιμη σε τρομοκρατικές επιθέσεις, σε ένα πεδίο μάχης ή ακόμη και σε εργοστάσια χημικών. Στο αναφερόμενο εργαστηριακό πείραμα, οι παραγόμενοι αισθητήρες μπόρεσαν να ανιχνεύσουν ατμούς υδρογονανθράκων (Steel, 2005).

Όμως, το μέλλον των εφαρμογών αναμένεται ακόμα ευρύτερο. Για παράδειγμα, η εταιρεία BSAC (BerkeleySensorandActuatorCenter) έχει ήδη κάποια μελλοντικά σχέδια και πιθανές εφαρμογές της τεχνολογίας smartdust που δείχνουν το πόσο μακριά μπορεί να φθάσει αυτού του είδους η τεχνολογία δικτύωσης (Pister, BSAC). Ήδη, έχουν προγραμματιστεί κάποιες στρατιωτικές και εμπορικές εφαρμογές της τεχνολογίας, όπως αυτές που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Μία από τις πιθανές εφαρμογές ονομάζεται «Έλεγχος απογραφής» (Inventorycontrol). Η βασική ιδέα της εφαρμογής αυτής είναι ένας απομακρυσμένος έλεγχος των οικιακών συσκευών, κάτι που θα επιτρέπει στον ιδιοκτήτη να είναι σε θέση να παρακολουθεί και να ελέγχει εξ αποστάσεως την κατάσταση των συσκευών αυτών όποτε και από όπου θέλει.

Μια άλλη εφαρμογή της τεχνολογίας smartdust, η οποία αναμένεται να τεθεί σε εφαρμογή στο εγγύς μέλλον, είναι οι «έξυπνοι εργασιακοί χώροι». Ένα υπαρκτό πρόβλημα, για παράδειγμα, είναι η ρύθμιση ενός κλιματιστικού σε θερμοκρασία που να είναι αποδεκτή από όλους. Το πρόβλημα αυτό γίνεται ακόμα πιο σοβαρό σε περιπτώσεις όπου στον ίδιο χώρο υπάρχουν πολλοί άνθρωποι, όπως ένα γραφείο. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί αν κάποιο είδος δικτύου αισθητήρων είναι ραμμένο στα ρούχα και συνεχώς στέλνει αναφορές για την κατάσταση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος σε έναν ελεγκτή, ο οποίος με τη σειρά του ελέγχει το κλιματιστικό στο γραφείο. Με τον τρόπο αυτό ένα κλιματιστικό μπορεί να λειτουργήσει με τρόπο κατάλληλο τουλάχιστον για την πλειοψηφία των ατόμων που βρίσκονται σε ένα χώρο ή, ενδεχομένως, για όλους τα άτομα στο ίδιο μέρος.

Η τεχνολογία smartdust μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εξυπηρέτηση ατόμων με ειδικές ανάγκες και να κάνει τη ζωή τους ευκολότερη. Η ιδέα για αυτή την εφαρμογή προήλθε από ένα e-mail που έστειλε ένα άτομο με ειδικές ανάγκες στην BSAC, στο οποίο υποδείκνυε τη δημιουργία αισθητήρων για παραπληγικά άτομα. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να τοποθετηθούν στο πρόσωπο του ατόμου με σκοπό την ανίχνευση και παρακολούθηση συγκεκριμένων αντιδράσεων του προσώπου και την μετέπειτα μετάφραση των αντιδράσεων αυτών σε συγκεκριμένες εντολές. Οι εντολές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκκίνηση και τον έλεγχο διαφόρων συσκευών, όπως ένας υπολογιστής, μια αναπηρική καρέκλα ή ακόμα και ένα αυτοκίνητο. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να αποτελέσει ένα τεράστιο βήμα για την ανεξαρτησία των ατόμων με ειδικές ανάγκες.

Μια ακόμα περίπτωση χρήσης της τεχνολογίας smartdust περιλαμβάνει την αλλαγή του ορισμού του ηλεκτρολογίου, όπως είναι σήμερα σε κάτι που ονομάζεται «εικονικό ηλεκτρολόγιο». Σε αυτή την εφαρμογή, οι επιστήμονες πιστεύουν ότι θα είναι δυνατό να αντικατασταθούν τα σημερινά ηλεκτρολόγια με έξυπνους αισθητήρες στα δάχτυλα των ατόμων που θα μεταφράζουν το νόημα των κινήσεων των δακτύλων, σε πραγματικό έλεγχο του υπολογιστή. Η βασική ιδέα είναι, σε γενικές γραμμές, η δημιουργία ενός εντελώς νέου τρόπου σύνδεσης των ατόμων με τους υπολογιστές, τους φορητούς υπολογιστές και όλες τις συναφείς συσκευές. Η επαναστατική αυτή ιδέα θα κάνει τη ζωή όλων ακόμα πιο εύκολη, ιδιαίτερα των ατόμων με ειδικές ανάγκες. Για παράδειγμα, με βάση αυτήν την ιδέα, κάποιος θα είναι σε θέση να παίζει πιάνο χωρίς καν να χρειάζεται να αγγίξει πραγματικά το όργανο. Μια τέτοια εφαρμογή θα ανοίξει έναν ολόκληρο νέο κόσμο, στον οποίο η φαντασία μπορεί να έχει ελεύθερο και ενεργό ρόλο.

## 1.4 Άλλοι τύποι ασύρματων δικτύων

Μέχρι τώρα έχουν πραγματοποιηθεί αμέτρητες μελέτες πάνω στον τομέα της ασύρματης δικτύωσης, οι οποίες επικεντρώνονται σε διαφορετικά είδη δικτύων με διαφορετικό εύρος ιδιοτήτων και συγκεκριμένο φάσμα εφαρμογών. Άλλωστε, ο τομέας αυτός εξακολουθεί να αναπτύσσεται γεγονός που δημιουργεί πολλές δυνατότητες για έρευνα. Στα πλαίσια της πτυχιακής αυτής εργασίας, θα αναφερθούν και κάποια άλλα είδη ασύρματης δικτύωσης που παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον μελέτης.

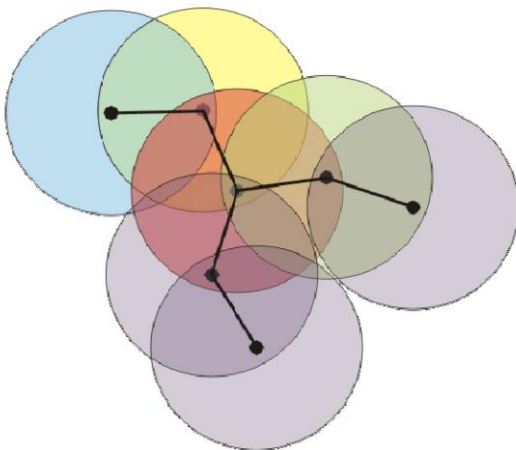
Ένα εξίσου ενδιαφέρον είδος ασύρματης δικτύωσης, το οποίο είναι συναφές με το θέμα της παρούσας εργασίας, είναι τα δίκτυα ad-hoc, τα οποία μπορεί να χωριστούν σε τρεις διαφορετικές ομάδες:

- τα κινητά ad-hoc δίκτυα (Mobile Ad-hoc Networks – MANET)
- τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος (Wireless Mesh Networks – WMN), και
- τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN)

Τα δίκτυα WSN έχουν ήδη παρουσιαστεί εν συντομία, ενώ στη συνέχεια της ενότητας θα γίνει μια αναφορά και για τα δίκτυα MANET.

### 1.4.1 Ad-hoc δίκτυα

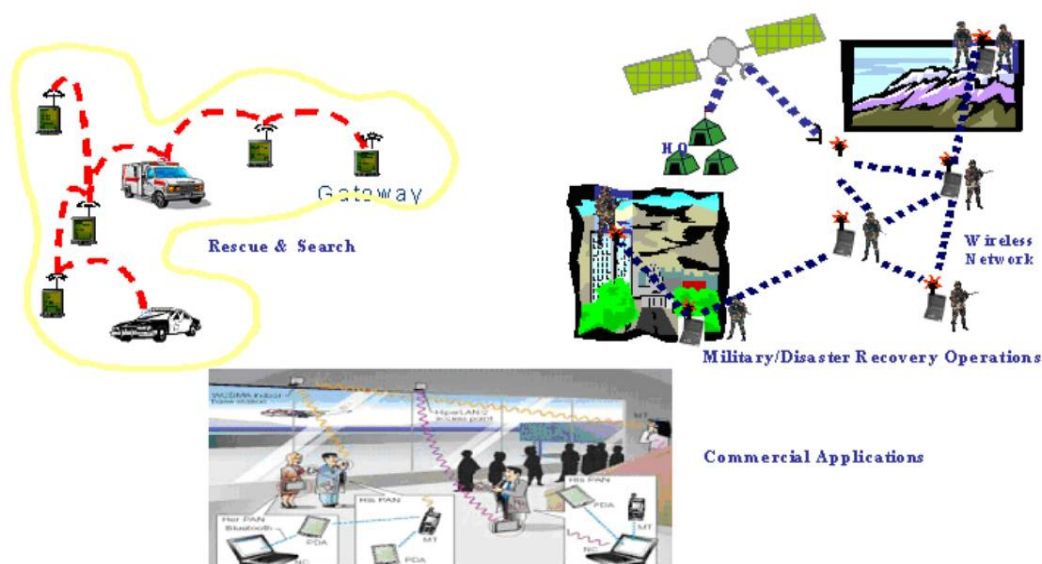
Ένα δίκτυο ad-hoc, γνωστό επίσης και ως δίκτυο μικρής διάρκειας ζωής (short-livenetwork), αποτελείται από δύο ή περισσότερες φορητές συσκευές (κόμβους) που συνδέονται ασύρματα μεταξύ τους, χωρίς καμία καλωδιακή διασύνδεση ή οποιαδήποτε δομή υποβοήθησης (Sharma, 2013). Στο δίκτυο αυτό κάθε κόμβος λειτουργεί ως τελικό σύστημα (endsystem) και δρομολογητής (router) για όλους τους άλλους κόμβους του δικτύου (Εικ.2).



**ΕΙΚΟΝΑ 2: Δομή ενός ad-hoc δικτύου**

Η σύγκριση ενός δικτύου ad-hoc με ένα σταθερό ασύρματο δίκτυο, αποκαλύπτει μερικές ενδιαφέρουσες προδιαγραφές που δίνουν στο δίκτυο ad-hoc περισσότερα πλεονεκτήματα ώστε να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και εφαρμογές. Τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν ένα δίκτυο ad-hoc και του δίνουν μεγαλύτερο πλεονέκτημα σε σύγκριση με τα σταθερά ασύρματα δίκτυα είναι το χαμηλό κόστος και η σχετική ευκολία υλοποίησης με την έννοια της δημιουργίας ενός δικτύου ακόμα και σε περιοχές που βρίσκονται σε πολύ μακρινή απόσταση μεταξύ τους.

Επίσης, η ισχύς κάλυψης ενός δικτύου ad-hoc μπορεί να αυξηθεί αν ενσωματωθεί σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο, γεγονός που το καθιστά χρησιμοποιήσιμο σε μεγαλύτερη γκάμα εφαρμογών. Τα δίκτυα ad-hoc μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη επιτυχία σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπως είναι οι φυσικές καταστροφές, οι στρατιωτικές συγκρούσεις, οι καταστάσεις άμεσης ιατρικής βοήθειας, κλπ, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.



### ΕΙΚΟΝΑ 3: Παραδείγματα εφαρμογών ad-hoc δικτύων

Η εξέλιξη των δικτύων ad-hoc έχει να παρουσιάσει τρεις διαφορετικές γενιές (Gurta, 2011). Τα σημερινά δίκτυα ad-hoc, ως επί το πλείστον, ανήκουν στην τρίτη γενιά. Η προέλευσή τους (πρώτη γενιά δικτύων) χρονολογείται από το 1972, όταν η αμερικανική Υπηρεσία Προηγμένων Αμυντικών Ερευνητικών Προγραμμάτων (DefenseAdvancedResearchProjectsAgency - DARPA) επένδυσε ένα σημαντικό κεφάλαιο πάνω στην έρευνα της μεταγωγής πακέτων ραδιοεπικοινωνίας. Η μελέτη αυτή, τελικά οδήγησε στη δημιουργία της πρώτης γενιάς δικτύων ad-hoc, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές. Το DARPAPRNET (PacketRadioNetworks) είναι επίσης ένα άλλο προϊόν της πρώτης γενιάς δικτύων ad-hoc που αναπτύχθηκε μεταξύ 1973 και 1987 (Bang&Ramteke, 2013).

Το PRNET χρησιμοποίησε ένα συνδυασμό του ALOHA (ArealLocationsofHazardousAtmospheres) και του CSMA (CarrierSenseMediumAccess), γεγονός που οδήγησε σε έλεγχο πρόσβασης στο μέσο, ένα στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε σε κόμβους του δικτύου που αποτελούνταν από κινητά μέρη πεδίων μάχης, όπως στρατιώτες, τανκ, αεροσκάφη, κλπ.

Τα δίκτυα ad-hoc δεύτερης γενιάς άρχισαν να αναπτύσσονται από το 1980, μια ανάπτυξη που συνεχίστηκε μέχρι το 1993, και ως επί το πλείστον αποτελούσαν μέρος του προγράμματος SURAN (SurvivableAdaptiveRadioNetworks) (Bang&Ramteke, 2013). Κύριος σκοπός των δικτύων αυτών ήταν η μεταγωγή πακέτων δικτύωσης σε εφαρμογές πεδίων μάχης, ενώ κύριος στόχος τους ήταν η επίτευξη καλύτερης απόδοσης.

Για το λόγο αυτό, οι συσκευές των δικτύων έγιναν μικρότερες, φθηνότερες, ενεργειακά πιο αποτελεσματικές και παρουσίαζαν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στις ηλεκτρονικές επιθέσεις. Στην ίδια γενιά ανήκουν και τα projectGloMo (GlobalMobile) και NTDRS (NearTermDigitalRadioSystem) που σχεδιάστηκαν με μοναδικά χαρακτηριστικά όπως η αυτο-οργάνωση και η αυτο-ίαση, κυρίως για τους στρατιωτικούς σκοπούς της DARPA (Gupta, 2011).

Η τρίτη γενιά των δικτύων ad-hoc επεκτάθηκε σε εμπορικές εφαρμογές και ξεκίνησε μαζί με όλες τις άλλες τεχνολογικές επαναστάσεις, όπως η εμφάνιση των υπολογιστών notebook, από τις αρχές του 20ου αιώνα. Οι δύο πιο σημαντικές εφαρμογές των δικτύων ad-hoc, δηλαδή τα δίκτυα αισθητήρων και το Bluetooth, είναι προϊόντα αυτής της γενιάς δικτύων ad-hoc (Bang&Ramteke, 2013).

Σε γενικές γραμμές τα δίκτυα ad-hoc και οι προκλήσεις τους, αποτελούν ένα σημαντικότατο θέμα έρευνας. Το θέμα της επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων hosts σε ένα δίκτυο ad-hoc, οι οποίοι δεν συνδέονται άμεσα, αποτελεί μεγάλη πρόκληση αλλά και φλέγον ζήτημα σε περιπτώσεις όπως οι επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης.

Το επίκεντρο της τρέχουσας έρευνας είναι κυρίως μια προσπάθεια τυποποίησης των διαφόρων υφιστάμενων ελέγχων του δικτύου σε ένα ενιαίο πλαίσιο. Μια τέτοια τυποποίηση των προτύπων θα αποδεικνυόταν ιδιαίτερα χρήσιμη σε μελλοντικές εφαρμογές. Επίσης, το γεγονός ότι οι ασύρματες συσκευές γίνονται ολοένα και μικρότερες, με την εξέλιξη της τεχνολογίας MEMS, αλλά και φθηνότερες, οδηγεί στην ανάγκη για έρευνα σχετικά με την εύρεση ενός φθηνότερου μέσου σύνδεσης των συσκευών σε ένα δίκτυο ad-hoc (Bang&Ramteke, 2013).



Μια πιο λεπτομερής ανάλυση των δικτύων ad-hoc τα χωρίζει σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Al-Omari&Sumari, 2010):

- τα κινητά ad-hoc δίκτυα, και
- τα κινητά ad-hoc δίκτυα αισθητήρων

### ***I) Κινητά ad-hoc δίκτυα***

Σύμφωνα με τον ορισμό τους και σε αντίθεση με άλλα πρωτόκολλα δικτύωσης, τα δίκτυα ad-hoc δεν ακολουθούν την παραδοσιακή αρχιτεκτονική ενός δικτύου, αλλά σχηματίζονται με τη βοήθεια μιας αυτόματης δομής συστήματος που αποτελεί το κέντρο ενός δικτύου ad-hoc (Gupta, 2011). Αυτός ο τρόπος δημιουργίας ενός δικτύου θεωρείται επαναστατικός, γεγονός το οποίο αποτελεί επίσης ένα πλεονέκτημα των δικτύων ad-hoc σε σύγκριση με όλα τα άλλα παραδοσιακά είδη δικτύων, ειδικά σε περιβάλλοντα με φτωχές, ή δαπανηρές για ανάπτυξη, υποδομές.

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ad-hoc δικτύωση, οδήγησε, προς τα τέλη της δεκαετίας του '90, στην εξεύρεση νέων προτύπων πρωτοκόλλων δρομολόγησης ειδικά για τα δίκτυα αυτά (Bang&Ramteke, 2013). Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε μια ομάδα εργασίας, η IETF (InternetEngineeringTaskForce), που ερεύνησε την προτυποποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για δίκτυα ad-hoc και, ως εκ τούτου, την προώθηση αυτού του είδους δικτύων. Το αποτέλεσμα της ομάδας αυτής ήταν η διάκριση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε reactive (δρομολογήσεις κατ' απαίτηση) και proactive (δρομολογήσεις έτοιμες για χρήση).

### ***II) Κινητά ad-hoc δίκτυα αισθητήρων***

Ένα κινητό ad-hoc δίκτυο αισθητήρων, ή υβριδικό ad-hoc δίκτυο, είναι ένα δίκτυο από αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται διάσπαρτοι σε μία γεωγραφική περιοχή (Al-Omari&Sumari, 2010). Κάθε αισθητήρας του δικτύου έχει την ικανότητα να ανιχνεύει και να επεξεργάζεται διαφορετικά σήματα του περιβάλλοντος και να μεταδίδει δεδομένων μέσω κινητών επικοινωνιών.

Μια βασική διαφορά μεταξύ των ad-hoc δικτύων αισθητήρων με τα τυπικά δίκτυα αισθητήρων είναι η διαδικασία ρύθμισης του δικτύου. Τα τυπικά δίκτυα αισθητήρων απαιτούν άμεση επικοινωνία με τον ελεγκτή (κεντροποιημένα δίκτυα – centralized networks) ενώ ένα κινητό ad-hoc δίκτυο αισθητήρων ακολουθεί μια ευρύτερη σειρά λειτουργικών σεναρίων που το καθιστά λιγότερο πολύπλοκο κατά τη διαδικασία εγκατάστασης.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του είδους δικτύου είναι η ικανότητά του να προσαρμόζεται. Το χαρακτηριστικό αυτό προκύπτει από τη δυνατότητα του πρωτοκόλλου δρομολόγησης να καθορίζει ανάλογα τη μεταγωγή πακέτων μεταξύ δύο συνδεδεμένων κινητών κόμβων και προσδίδει στο δίκτυο την ικανότητα ανάπτυξης σχεδόν σε κάθε είδος περιβάλλοντος.

Τα κινητά ad-hoc δίκτυα αισθητήρων είναι μία από τις κατηγορίες δικτύων ad-hoc που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί σε ένα τεράστιο φάσμα εφαρμογών μετατρέποντας έτσι την καθημερινότητα των ανθρώπων. Τα οφέλη της χρήσης τους περιλαμβάνουν (Al-Omari&Sumari, 2010):

- τη δυνατότητα δημιουργίας δικτύων μεγάλης κλίμακας (largescalenetworks)
- την εφαρμογή εξελιγμένων πρωτοκόλλων
- τη μείωση της απαιτούμενης (ασύρματης) επικοινωνίας για την εκτέλεση κατανεμημένων ή/και τοπικών καθηκόντων
- την υλοποίηση πολύπλοκων τρόπων εξοικονόμησης ενέργειας λειτουργίας, ανάλογα με το περιβάλλον και την κατάσταση του δικτύου

Αυτά τα οφέλη των κινητών ad-hoc δικτύων αισθητήρων αφορούν μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, στρατιωτικών και μη.

Παράδειγμα χρήσης τους σε στρατιωτικές εφαρμογές είναι η συλλογή πληροφοριών σχετικά με όλες τις θέσεις και την κίνηση των εχθρικών στρατευμάτων, στοιχεία ιδιαίτερα απαραίτητα σε πολεμικές συρράξεις. Μη στρατιωτικές εφαρμογές των κινητών ad-hoc δικτύων αισθητήρων αφορούν την παρακολούθηση της κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομους και εθνικές οδούς καθώς και σε συστήματα κινητής επιτήρησης που χρησιμοποιούνται για θέματα ασφάλειας σε κτίρια, όπως ξενοδοχεία, νοσοκομεία κλπ. Κινητά ad-hoc δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη συστημάτων πληροφοριών που αφορούν την εύρεση διαθέσιμων χώρων στάθμευσης. Τα δίκτυα αυτά μπορούν επίσης να έχουν διάφορες περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως η πρόληψη και ανίχνευση της ρύπανσης στους ωκεανούς καθώς επίσης και η έγκυρη ειδοποίηση σχετικά με την έναρξη πυρκαγιάς σε μεγάλα δάση, αποτρέποντας με τον τρόπο αυτό τεράστιες περιβαλλοντικές καταστροφές.

#### **1.4.2 Αυτόνομα δίκτυα αισθητήρων**

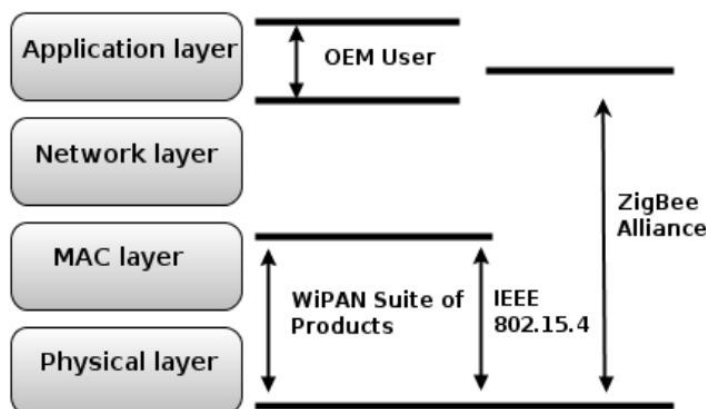
Η τεχνολογία ZigBee είναι μια προδιαγραφή μιας σειράς πρωτοκόλλων επικοινωνίας υψηλού επιπέδου που χρησιμοποιούν μικροσκοπικές ψηφιακές συσκευές χαμηλής ισχύος και στηρίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 σχεδιασμένο για την επικοινωνία WPAN (WirelessNetworkPersonalArea). Η τεχνολογία αυτή μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί ως ένα είδος αυτόνομου δικτύου αισθητήρων (Rohitha και συν., 2012).

Αυτού του είδους τα δίκτυα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές δικτύωσης μικρών αποστάσεων και εμβέλειας, όπως είναι για παράδειγμα η σύνδεση των οικιακών συσκευών.

Κύρια πλεονεκτήματα τους είναι (Mihajlon&Bogdanoski, 2011):

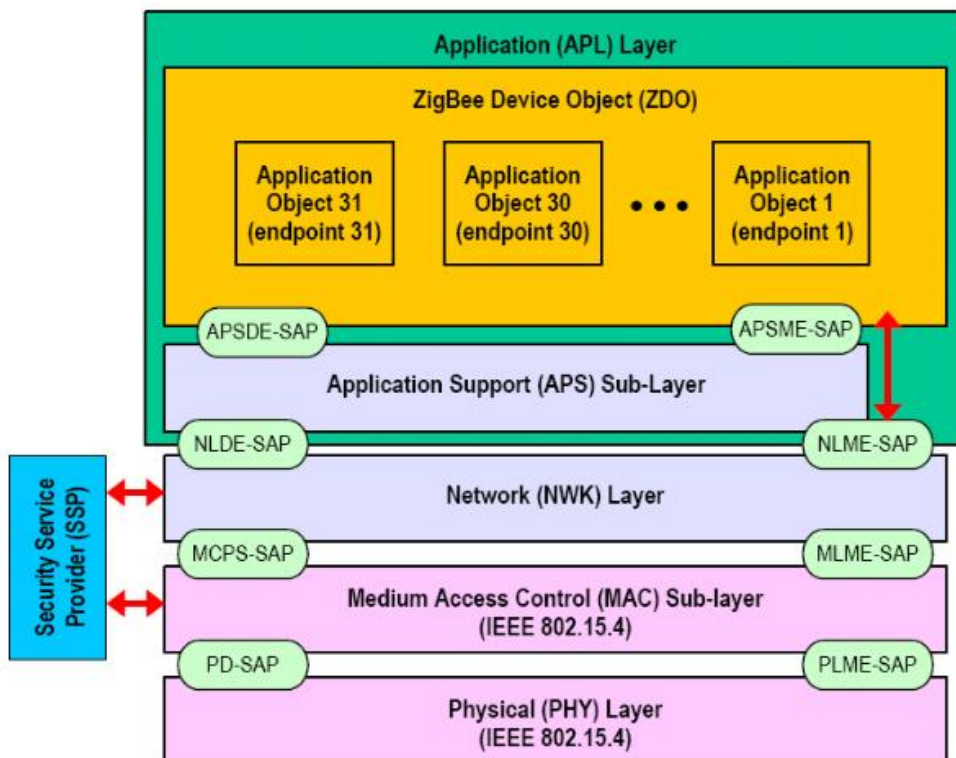
- η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- το χαμηλό κόστος υλοποίησης
- η υψηλή πυκνότητα κόμβων που παρατηρείται σε ένα μοντέλο ZigBee, και
- η απλότητα του πρωτοκόλλου

Όλα τα στοιχεία αυτά καθιστούν την εφαρμογή του μοντέλου ZigBee ευκολότερη. Η τεχνολογία ZigBee παρουσιάζει, επίσης, ένα πολύ καλό και αποδεκτό επίπεδο ασφάλειας, ενώ παράλληλα είναι πολύ αξιόπιστη στη μετάδοση δεδομένων.



#### **ΕΙΚΟΝΑ 4: Τα στρώματα του Zigbee**

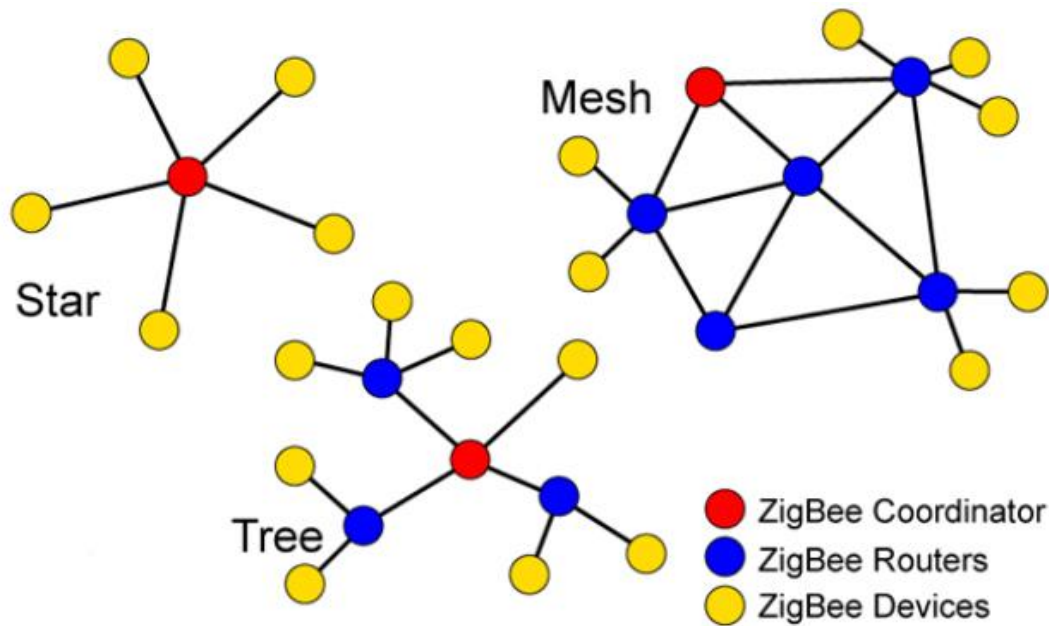
Ένα δίκτυο ZigBee αποτελείται από τέσσερα διαφορετικά στρώματα (Εικ. 4). Τα δύο άνω στρώματα (εφαρμογών και δικτύου) παρέχονται από την ZigBee Alliance ως πρότυπα υλοποίησης του δικτύου. Τα κατώτερα δύο στρώματα (MAC και PHY) παρέχονται από το πρότυπο IEEE 802.15.4-2006 για τη διασφάλιση της συνύπαρξης, χωρίς παρεμβολές, με άλλα ασύρματα πρωτόκολλα, όπως το Wi-Fi.



**ΕΙΚΟΝΑ 5: Αρχιτεκτονική δομή του ZigBee**

Το στρώμα εφαρμογών (Application layer) περιέχει το στοιχείο ZDO (ZigBee Device Object) που παρέχει υπηρεσίες οι οποίες επιτρέπουν στα αντικείμενα εφαρμογής (application objects) του δικτύου να ανακαλύψουν το ένα το άλλο και να οργανωθούν σε μια κατακεντρωμένη εφαρμογή (Εικ. 5). Ένας φορέας παροχής υπηρεσιών ασφαλείας (Security Service Provider - SSP), ο οποίος είναι σε επαφή με τα στρώματα δικτύου (network layer) και MAC, παρέχει το κατάλληλο επίπεδο ασφάλειας του δικτύου. Με χρήση της έννοιας της αυτοοργάνωσης, τα δίκτυα ZigBee μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος εφαρμογών καθώς είναι σε θέση να χειρίζονται διαφορετικούς τύπους μοτίβων κίνησης μεταφοράς δεδομένων.

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 υποστηρίζει τρεις διαφορετικές τοπολογίες ή ένα συνδυασμό δύο ή ακόμα και όλων, όπως την τοπολογία πλέγματος (Mesh), την τοπολογία αστέρα (Star) και την τοπολογία δέντρου (Tree), που μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση της τοπολογίας πλέγματος (Εικ.6).



**ΕΙΚΟΝΑ 6: Τοπολογίες δικτύων ZigBee**

Γενικότερα, επικρατεί η ιδέα ότι η τεχνολογία ZigBee εξυπηρετεί τις ίδιες εφαρμογές με την τεχνολογία Bluetooth, όμως υπάρχουν μερικές μεγάλες διαφορές που κάνουν τις δύο αυτές τεχνολογίες να χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά είδη εφαρμογών (RFWirelessWorld, 2012). Για παράδειγμα, όσον αφορά το μέσο μετάδοσης, μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ότι το ZigBee χρησιμοποιεί ως διαμόρφωση τη τεχνική DSSS, ενώ το Bluetooth χρησιμοποιεί την FHSS (FrequencyHoppingSpreadSpectrum). Επίσης, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, το ZigBee εκτελεί μια σειρά από δραστηριότητες ταχύτερα, γεγονός που του επιτρέπει να μην λειτουργεί μετά την ολοκλήρωσή τους και επομένως να καταναλώνει πολύ λιγότερη ενέργεια. Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών που απαρτίζουν το δίκτυο. Αυτές οι διαφορές καθιστούν τις τεχνολογίες αυτές εφαρμόσιμες σε διαφορετικό φάσμα εφαρμογών. Για παράδειγμα, το ZigBee θα ήταν μια σωστή επιλογή για εφαρμογές δικτύων αισθητήρων ή για εφαρμογές όπου η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι σημαντική (Mihajlov&Bogdanoski, 2011).

## Επίλογος

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) αποτελούν μια μορφή κατανεμημένων δικτύων και συνήθως αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό κατανεμημένων συσκευών (κόμβων) που είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες για την παρακολούθηση φυσικών ή περιβαλλοντικών φαινομένων. Οι συσκευές αυτές λειτουργούν αυτόνομα, συνδέονται μεταξύ τους λογικά και χαρακτηρίζονται από την ικανότητα αυτο-οργάνωσης.

Μερικές από τις προκλήσεις των δικτύων WSN είναι η αξιοπιστία μεταφοράς δεδομένων, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, το μικρό μέγεθος των κόμβων, η φορητότητα και η εξασφάλιση ιδιωτικότητας και ασφάλειας.

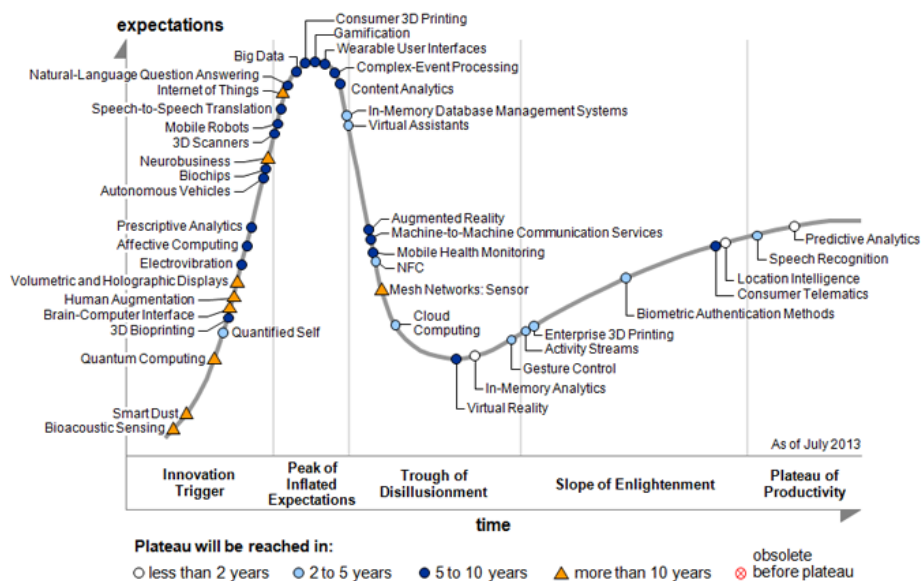
Η εξέλιξή τους μπορεί να χωριστεί σε τρεις φάσεις στις οποίες δημιουργήθηκαν τρεις διαφορετικές γενιές δικτύων. Η τρίτη γενιά, που χρονολογείται από τα τέλη της δεκαετίας του 2000, βρίσκει μεγάλη γκάμα εμπορικών εφαρμογών, ενώ η εξέλιξή της υπόσχεται τη διεύρυνση της γκάμας αυτής. Παραδείγματα δικτύων της τρίτης γενιάς αποτελούν τα δίκτυα ad-hoc, τα δίκτυα Bluetooth και τα δίκτυα ZigBee.

## 2 Δίκτυα Smart Dust

### Εισαγωγή

Τα smartdust είναι δίκτυα που αποτελούνται από μεγάλο αριθμό ασύρματων μικροσκοπικών συσκευών MEMS (το μέγεθός τους μπορεί να είναι όσο και το κεφάλι μιας καρφίτσας) που είναι γνωστές με τον όρο motes (Mashalkar&Kazi, 2015). Κάθε συσκευή του δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ως μικροσκοπικός υπολογιστής αυτόνομης ισχύος που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερους αισθητήρες οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης ενός ευρέος φάσματος φυσικών μεγεθών, όπως θερμοκρασία, υγρασία, φωτεινή ακτινοβολία, μαγνητισμό, δονήσεις ή ακόμα και την παρουσία χημικών ουσιών του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκονται. Οι συσκευές ενός δικτύου smartdust μπορεί να αιωρούνται διάσπαρτες σε μια περιοχή με σκοπό την εκτέλεση ενός συγκεκριμένου έργου και συνήθως επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα.

Η αρχική σύλληψη της ιδέας της τεχνολογίας smartdust έγινε το 1998 από τον Dr. KrisPister του Πανεπιστημίου UC Berkeley και μελετήθηκε από το DARPA, λόγω των προβλεπόμενων εφαρμογών της τεχνολογίας σε στρατιωτικούς σκοπούς (Mashalkar&Kazi, 2015). Οι πρώτοι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων που δημιουργήθηκαν είχαν το μέγεθος ενός κυβικού χιλιοστού. Μάλιστα, μια πρόσφατη ανασκόπηση της τεχνολογίας κάνει λόγο για διάφορες τεχνικές με τις οποίες το μέγεθος των motes μπορεί να φτάσει στο επίπεδο των κυβικών μικρομέτρων. Το 2013, η τεχνολογία μπήκε στο γράφημα GartnerHypeCycle, στο οποίο σημειώνονται οι ανερχόμενες τεχνολογίες πληροφορικής και παρακολουθείται η εξέλιξή τους, ως μία από τις πιο κερδοσκοπικές αναδυόμενες τεχνολογίες (Εικ. 7) (Gartner, 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 7: GartnerHypeCycle αναδυόμενων τεχνολογιών για το 2013

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν κάποια γενικότερα στοιχεία των δικτύων smartdust, όπως είναι οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν, η αρχιτεκτονική δομή τους αλλά και κάποιες στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για τα εν λόγω δίκτυα. Στη συνέχεια, θα εξεταστούν τα βασικά λειτουργικά στοιχεία των δικτύων WSN, όπως είναι οι διάφοροι τρόποι και πρωτόκολλα επικοινωνίας, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης καθώς και οι τεχνολογίες ενδιάμεσου λογισμικού που χρησιμοποιούνται, ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, προκειμένου τα δίκτυα smartdust να λειτουργούν απρόσκοπτα με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας.

## 2.1 Εφαρμογές και προκλήσεις

Εξετάζοντας τα δίκτυα smartdust από την άποψη των πιθανών εφαρμογών και των προκλήσεων της τεχνολογίας, τα παραδείγματα χρήσης τους είναι απλά απεριόριστα. Αυτή τη στιγμή τα δίκτυα αυτά έχουν πολλές πιθανές εφαρμογές, οι περισσότερες εκ των οποίων τα κατατάσσουν ως το αποκορύφωμα του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) (Markert, 2015). Από τη στιγμή που το IoT συνεπάγεται την ανίχνευση του περιβάλλοντος χώρου και τη μετάδοση πληροφοριών στο υπολογιστικό σύννεφο (cloud), οι υπολογιστές που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από μη-παρεμβατικότητα και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Σύμφωνα με ερευνητές του Πανεπιστημίου του Χάρβαρντ, αυτή τη στιγμή είναι τεχνολογικά δυνατή η δημιουργία motes τα οποία μπορούν να είναι τόσο μικρά σε μέγεθος που να παραμένουν αιωρούμενα και να παρασύρονται από ρεύματα του αέρα, να ανιχνεύουν και να επικοινωνούν για πολλές ώρες ή ακόμα και μέρες. Οι ερευνητές εργάζονται με σκοπό να κάνουν τις συσκευές MEMS ακόμα μικρότερες και πιο έξυπνες, με αποτέλεσμα τη δημιουργία δικτύων smartdust τα οποία θα έχουν πολύ προηγμένες εφαρμογές.

Γενικότερα οι τομείς εφαρμογής των δικτύων smartdust μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες (Mashalkar&Kazi, 2015):

- **Στρατιωτικές εφαρμογές:** Παρακολούθηση εχθρικών κινήσεων και ενεργειών σε δύσκολα προσβάσιμες περιοχές, ανίχνευση χημικών ουσιών σε περιπτώσεις χημικού και βιολογικού πολέμου, κλπ
- **Περιβαλλοντική προστασία:** Ανίχνευση και παρακολούθηση περιβαλλοντικών εστιών μόλυνσης, ανίχνευση και ειδοποίηση για κινδύνους που μπορεί να εγκυμονούν μόλυνση του περιβάλλοντος, κλπ
- **Παρακολούθηση ανθρώπινης υγείας** (π.χ. μέσω εισαγωγής πλήθους motes στο ανθρώπινο σώμα για συνεχή έλεγχο πιθανών οργανικών δυσλειτουργιών)



- **Αυτοματοποίηση βιομηχανικών και παραγωγικών διαδικασιών** (π.χ. έλεγχος της παραγωγικής διαδικασίας προϊόντων, παρακολούθηση μεταφοράς προϊόντων προς τους καταναλωτές, κλπ)

Πιο συγκεκριμένα ένα δίκτυο smartdust θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση και παρατήρηση της μόλυνσης των ωκεανών (Sutter, 2010). Αισθητήρες που επιπλέουν στο νερό, μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και να στέλνουν δεδομένα μέσω ραδιοκυμάτων. Τέτοιου είδους αισθητήρες είναι δυνατό να μην χρειάζονται ακόμα και μπαταρία λειτουργίας, δεδομένου ότι η ισχύς λειτουργίας τους μπορεί να παράγεται από την κίνηση των κυμάτων που θα τους φορτίζει συνεχώς. Η μόνη ανθρώπινη παρέμβαση θα έχει να κάνει απλά με την περιοδική συντήρησή τους.

Άλλη εφαρμογή των δικτύων smartdust μπορεί να είναι η ενσωμάτωση των motes στην ασφαλτο του οδοστρώματος για την ανίχνευση των δονήσεων των διερχομένων αυτοκινήτων με σκοπό την παρακολούθηση της κυκλοφορίας σε αυτοκινητοδρόμους, εθνικές οδούς και οδούς ταχείας κυκλοφορίας με πολύ αποδοτικό τρόπο (Sutter, 2010). Επίσης, η χρήση της τεχνολογίας σε αγροκτήματα και καλλιεργήσιμες εκτάσεις μπορεί να δώσει στους αγρότες μια καλύτερη εικόνα για σκοπούς εξοικονόμησης νερού ποτίσματος και χρήσης μικρότερης ποσότητας λιπάσματος, στοιχεία που μπορούν να εξοικονομήσουν χρήματα και να αυξήσουν την παραγωγή.

Μια ακόμα εφαρμογή των δικτύων αυτών είναι η διάδοση ασύρματων σειсмоγράφων στην ευρύτερη περιοχή του πλανήτη, γεγονός που θα δώσει τη δυνατότητα ανίχνευσης σεισμών και προειδοποίησης του κόσμου, τουλάχιστον 30 με 60 δευτερολέπτων πριν συμβεί οτιδήποτε. Ίσως αυτός ο χρόνος να μην φαίνεται μεγάλος, όμως είναι αρκετός για την προστασία των ανθρώπων αλλά και την απενεργοποίηση των μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας κτιρίων που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν προβλήματα ζωτικής σημασίας σε περιπτώσεις σεισμών μεγάλης έντασης (Sutter, 2010).

Είναι γνωστό ότι σε κάθε νέα τεχνολογία παρουσιάζονται προκλήσεις. Στην περίπτωση των δικτύων smartdust, λαμβάνοντας υπόψη το μικρό μέγεθος των motes, η χρήση κεραιών μεγάλης εμβέλειας δεν είναι δυνατή και ως εκ τούτου το εύρος επικοινωνίας μεταξύ τους έχει μετρηθεί ότι είναι πολύ μικρό (της τάξης μερικών χιλιοστών) (Behmann&Wu, 2015). Υπάρχει επίσης μεγάλη πιθανότητα, τα motes του δικτύου να καταστραφούν λόγω έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μικροκύματα ή άλλα φυσικά φαινόμενα. Ως λύση στα προβλήματα αυτά θα μπορούσε να αποτελέσει το ίδιο χαρακτηριστικό γνώρισμα της «σκόνης» του δικτύου, καθώς το εξαιρετικά μικρό μέγεθος των motes του δικτύου τα καθιστούν ικανά να καλύψουν με μεγάλη πυκνότητα μια περιοχή, τέτοια ώστε αν κάποια από αυτά καταστραφούν για οποιοδήποτε λόγο ή απλά τεθούν εκτός δικτύου, το δίκτυο να μπορεί να υποστηριχθεί από τα υπόλοιπα.

Οι πολέμιοι της τεχνολογίας αυτής χρησιμοποιούν το επιχείρημα ότι αποτελεί μια τεράστια δυνητική απειλή για την ιδιωτική ζωή των ατόμων, καθώς πρόκειται για πολλούς μικροσκοπικούς ασύρματους αισθητήρες που δύσκολα μπορούν να ανιχνευθούν (Markert, 2015).

Από τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τεχνολογία smartdust, με τα δίκτυα που δημιουργεί, προκαλεί ορισμένα θέματα που παρά το πλήθος των εφαρμογών της δημιουργεί μια άτυπη διαμάχη μεταξύ ερευνητών και χρηστών.

## 2.2 Αρχιτεκτονική δομή των smart dust motes

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας smart dust είναι η εξελικτική και η επαναστατική προώθηση της σμίκρυνσης, της ολοκλήρωσης και της διαχείρισης της ενέργειας των συσκευών που χρησιμοποιεί (Mashalkar & Kazi, 2015). Η αρχιτεκτονική δομή των συσκευών αυτών (motes) περιλαμβάνει αισθητήρες, στοιχεία οπτικής επικοινωνίας και τροφοδοσίας, τα οποία σχεδιάζονται με τη χρήση μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS), ενώ παράλληλα η χρήση μικροηλεκτρονικής τεχνολογίας επιτρέπει την αυξανόμενη λειτουργικότητα των μικροσκοπικών αυτών συσκευών με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Το σύστημα τροφοδοσίας τους αποτελείται από μία μπαταρία φιλμ παχέος στρώματος, ένα ηλιακό κύτταρο με ενσωματωμένο πυκνωτή φόρτισης (για περιπτώσεις έλλειψης ηλιακού φωτός), ή και τα δύο. Στην εικόνα 8 παρουσιάζεται σε μεγέθυνση ένα smart dust mote.

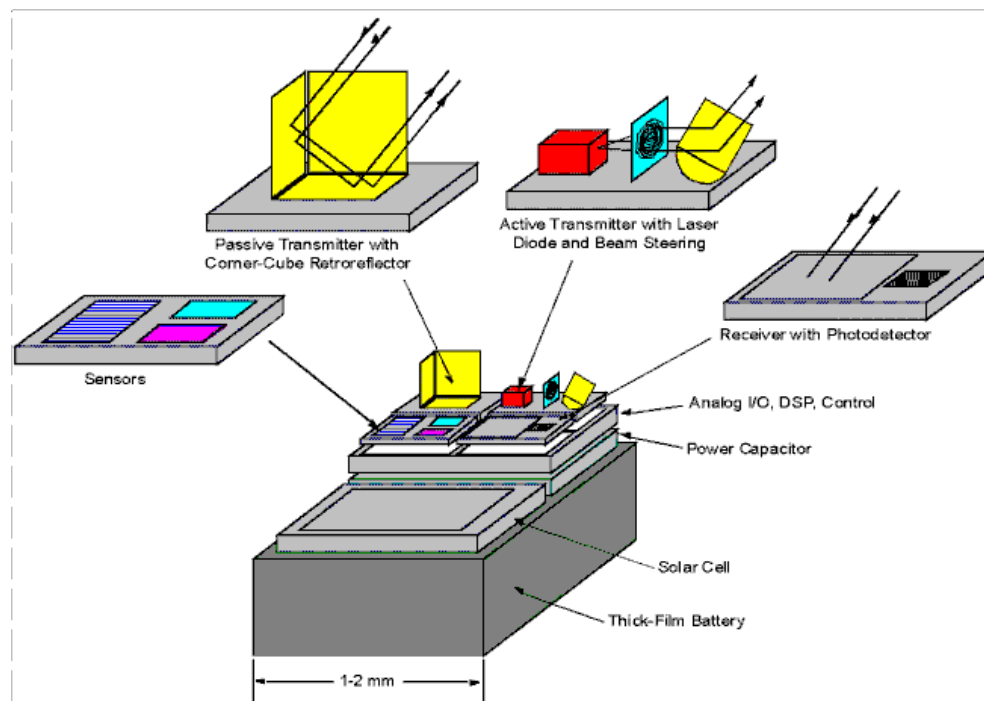


**ΕΙΚΟΝΑ 8: Μεγέθυνση Smart Dust Mote**

Ανάλογα με το σκοπό κατασκευής του, ο σχεδιασμός του εκάστοτε mote ενσωματώνει στη συσκευή διάφορους αισθητήρες, όπως φωτός, θερμοκρασίας, δονήσεως, μαγνητικού πεδίου, ήχου, ή ακόμα και μέτρησης έντασης ροής ανέμου. Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα παρέχει επεξεργασία σήματος που ανιχνεύει ο αισθητήρας, επικοινωνία, έλεγχο, αποθήκευση δεδομένων, και διαχείριση ενέργειας. Η λήψη των δεδομένων μπορεί να γίνεται και οπτικά με χρήση μιας φωτοδιόδου. Επί του παρόντος, υπάρχουν δύο συστήματα μετάδοσης πληροφοριών (Mashalkar & Kazi, 2015):

- παθητική μετάδοση, με χρήση ανακλαστήρων σε σχήμα κύβου, και
- ενεργητική μετάδοση, με χρήση μιας διόδου laser και κατευθυνόμενων καθρεφτών

Το μικροσκοπικό μέγεθος των motes καθιστά τη διαχείριση ενέργειας βασικό και απαραίτητο χαρακτηριστικό στοιχείο των συσκευών αυτών. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα περιλαμβάνει κυκλώματα ελέγχου κατάστασης του σήματος που ανιχνεύει ο αισθητήρας, έναν αισθητήρα θερμοκρασίας, κυκλώματα μετατροπής A/D, έναν μικροεπεξεργαστή, μνήμη SRAM, κυκλώματα επικοινωνίας και κυκλώματα ελέγχου ισχύος. Το IC, μαζί με τους αισθητήρες, λειτουργεί με μία πηγή ισχύος που είναι ενσωματωμένη στο κυρίως σώμα της συσκευής. Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα των στοιχείων που περιέχονται σε ένα smart dust mote.



**ΕΙΚΟΝΑ 9: Διάγραμμα στοιχείων ενός smart dust mote**

Κύριες αγορές της βιομηχανίας MEMS αποτελούν η αυτοκινητοβιομηχανία (αισθητήρες πίεσης και επιταχυνσιόμετρα), η ιατρική (αισθητήρες παρακολούθησης κατάστασης ασθενών) και η βιομηχανία γενικότερα (αισθητήρες ελέγχου παραγωγικής διαδικασίας). Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία έχουν δημιουργήσει όλες τις κατάλληλες συνθήκες που συμβάλουν στην εκθετική μείωση του μεγέθους, της ισχύος λειτουργίας και του κόστους παραγωγής όλων των προαναφερθέντων αισθητήρων.

### 2.3 Στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας

Υπάρχουν πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις για τη μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Με βάση τις τεχνικές παραγωγής των κυκλωμάτων των *nodes* που μπορεί να χρησιμοποιηθούν με σκοπό τη μείωση της ποσότητας της ενέργειας που καταναλώνεται από το δίκτυο συνολικά, οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες (Kahn και συν., 2000):

- **Λειτουργία στην περιοχή κάτω από την τάση κατωφλίου (*sub-threshold operation*):** Μερικά από τα συστήματα που κατασκευάζονται στο Πανεπιστήμιο του Michigan χρησιμοποιούν τροφοδοσία που είναι χαμηλότερη από την τάση κατωφλίου. Με τον τρόπο αυτό η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται ρίχνοντας όμως παράλληλα την απόδοση
- **Ασύγχρονα κυκλώματα (*asynchronous circuits*):** Στο Πανεπιστήμιο Cornell χρησιμοποιείται ο επεξεργαστής SNAP, ο οποίος μειώνει την ισχύ που καταναλώνει το ρολόι (clock) με χρήση ασύγχρονων κυκλωμάτων
- **Τεχνική χαμηλής κατανάλωσης με απομόνωση της ισχύος (*powergating*):** Στη τεχνική αυτή, για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του ρεύματος διαρροής και επομένως της άσκοπης κατανάλωσης ενέργειας, τα τρανζίστορ που υπάρχουν στα κυκλώματα λειτουργίας μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να μην τροφοδοτούν με ρεύμα τα μέρη που δεν χρησιμοποιούνται. Κάτι τέτοιο γίνεται σε συστήματα των Πανεπιστημίων του Χάρβαρντ και της Καλιφόρνια, καθένα από τα οποία χρησιμοποιεί διαφορετική μέθοδο
- **Υπολογισμός γενικού σκοπού (*general purpose computation*):** Η τεχνική αυτή βασίζεται στη χρήση επεξεργαστών με αρχιτεκτονική load-store ή συσσωρευτή (*accumulator*) στο κέντρο του συστήματος και ως πυρήνα του επεξεργαστή
- **Με γνώμονα τα συμβάντα (*event-driven*):** Σε αυτή την κατηγορία, το δίκτυο ανταποκρίνεται μόνο στην περίπτωση ανίχνευσης ενός συμβάντος στο περιβάλλον που χρειάζεται την προσοχή του εν λόγω δικτύου

- **Επιτάχυνση εφαρμογών (applications acceleration):** Η χρήση hardware υλικού επιτάχυνσης στο σύστημα μειώνει επίσης την κατανάλωση ενέργειας

## 2.4 Τεχνολογίες επικοινωνίας στα δίκτυα smartdust

Οι τρόποι επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων σε ένα δίκτυο smartdust αποτελούν μια από τις πιο σημαντικές πτυχές του (Akyildiz&Vuran, 2010). Όλα τα motes σε ένα τέτοιο δίκτυο θα πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά και με το σταθμό βάσης (BaseStationTransceiver – BST). Λαμβάνοντας πάντα υπόψη όλους τους περιορισμούς σχεδιασμού, λόγω των απαιτήσεων μεγέθους και ισχύος, τα δεδομένα που συλλέγονται από όλα τα motes ταυτόχρονα, θα πρέπει να αποστέλλονται στο σταθμό βάσης για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία.

Στην περίπτωση του down-link (δηλαδή, όταν τα δεδομένα διαδίδονται από το σταθμό βάσης προς τα motes), ο σταθμός βάσης (BST) μεταδίδει δεδομένα προς όλα τα motes του δικτύου με ρυθμό αρκετών Kbps. Κατά το up-link (δηλαδή, κατά τη διάδοση των δεδομένων από τα motes προς το σταθμό βάσης), η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων (transferrate) είναι 1Kbps. Ως εκ τούτου, εάν ένα δίκτυο αποτελείται συνολικά από 1000 motes, η μεταφορά δεδομένων (datathroughput) θα είναι 1Mbps. Η μεταφορά δεδομένων και στις δυο περιπτώσεις (up-link και down-link) θα πρέπει να υποστηρίζει αποστάσεις μερικών εκατοντάδων μέτρων (Akyildiz&Vuran, 2010).

Οι περιορισμοί μεγέθους και μικρής κατανάλωσης ενέργειας απαιτούν την ύπαρξη και άλλων προδιαγραφών σχετικά με τα motes, τα οποία θα πρέπει να είναι μικρότερα από  $1\text{mm}^3$  και θα πρέπει να καταναλώνουν ενέργεια μικρότερη από  $1\mu\text{W}$ . Επίσης, η μέθοδος μεταφοράς δεδομένων θα πρέπει να εξασφαλίζει ασφαλή και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ τους (Akyildiz&Vuran, 2010).

Βασικός σκοπός του συστήματος επικοινωνίας του δικτύου είναι η αποστολή και η συλλογή δεδομένων και πληροφοριών σχετικά με τα φυσικά μεγέθη που ανιχνεύονται προς και από τα motes. Για το σκοπό αυτό, οι βασικές τεχνολογίες επικοινωνίας μεταξύ των motes και του σταθμού βάσης (BST) είναι οι εξής δύο (Singh, 2014):

- Μετάδοση δεδομένων μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RF)
- Οπτική μετάδοση δεδομένων

Κάθε μία από τις τεχνολογίες αυτές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία θα εξεταστούν στις επόμενες υποενότητες.

### 2.4.1 Μετάδοση δεδομένων μέσω ραδιοσυχνοτήτων

Η τεχνολογία RF έχει εξελιχθεί κατά πολύ τα τελευταία χρόνια, γεγονός που την έχει καταστήσει ικανή να χρησιμοποιείται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η τεχνολογία βασίζεται στην παραγωγή, διάδοση και ανίχνευση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η συχνότητα των οποίων κυμαίνεται από μερικές δεκάδες KHz σε πολλές εκατοντάδες GHz (Singh, 2014). Στην περίπτωση των δικτύων smartdust, η τεχνολογία RF μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο κατά το up-link όσο και το down-link των δεδομένων.

Αν και η τεχνολογία χρησιμοποιείται στα δίκτυα αισθητήρων γενικότερα (π.χ. σε δίκτυα RFID), στην περίπτωση των smartdust, η χρήση της εισάγει κάποια προβλήματα, τα οποία έχουν ως επί το πλείστον σχέση με την απαίτηση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, τα προβλήματα που παρουσιάζονται από την επικοινωνία RF στα δίκτυα smartdust είναι τα εξής:

- Λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν οι κυκλωματικές διατάξεις των πομποδεκτών RF, η επίτευξη της απαίτησης για χαμηλή κατανάλωση ισχύος είναι σχεδόν αδύνατη
- Ένα από τα θέματα που τίγονται στην σχεδίαση της κεραίας είναι ο περιορισμός του μήκους της, καθώς δεν θα πρέπει να ξεπερνά το όριο του ενός κυβικού χιλιοστού. Όπως είναι γνωστό το μήκος της κεραίας δεν μπορεί, επίσης, να υπερβαίνει το ένα τέταρτο του μήκους κύματος του φέροντος. Αυτό σημαίνει ότι το μήκος της, τελικά, θα πρέπει να ορίζεται στην περιοχή μικρών μηκών κύματος, γεγονός που από μόνο του έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία του δικτύου με μη αποδοτική κατανάλωση ενέργειας
- Λόγω του μεγάλου αριθμού των motes σε ένα δίκτυο smartdust, η χρήση τεχνικών πολυπλεξίας είναι απαραίτητη για την επίτευξη της επικοινωνίας RF. Τέτοιες τεχνικές πολυπλεξίας μπορεί να είναι η πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα, χρόνου και συχνότητας (CodeDivisionMultiplexing – CDMA, TimeDivisionMultiplexing - TDMA, FrequencyDivisionMultiplexing - FDMA). Η χρήση των τεχνικών αυτών οδηγεί στην κατασκευή κυκλωματικών διατάξεων, όπως φίλτρα, διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές, που θα πρέπει να είναι σχεδιασμένα για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Η χρήση διατάξεων πολυπλεξίας (TDMA, FDMA ή CDMA) δημιουργεί επιπρόσθετα προβλήματα, καθώς η πολυπλοκότητα που παρουσιάζουν οι διατάξεις αυτές από μόνες τους δεν τις καθιστούν απόλυτα συμβατές με τα συστήματα smartdust

### 2.4.2 Οπτική μετάδοση δεδομένων

Η οπτική επικοινωνία χρησιμοποιεί ημιαγωγούς laser και φωτοδιόδους για τη μεταφορά οπτικών σημάτων. Σε σύγκριση με την επικοινωνία RF, αυτή η τεχνολογία είναι πιο συμβατή με τις απαιτήσεις σχεδιασμού χαμηλής ισχύος, λόγω του μικρού μεγέθους των οπτικών πομποδεκτών. Στην οπτική επικοινωνία, ένα σήμα συχνότητας 1GHz μπορεί εύκολα να εκπεμφθεί από ένα άνοιγμα του ενός χιλιοστού. Για να γίνει κάτι ανάλογο με την RF επικοινωνία απαιτείται μια κεραία 100 μέτρων (λόγω της διαφοράς μήκους κύματος μεταξύ των δύο μεταδόσεων). Επίσης, η ενίσχυση των οπτικών πομπών μπορεί να φτάσει ακόμα και το ένα εκατομμύριο (O'Brien, 2012).

Από τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα, ότι, όσον αφορά την καταναλωμένη ισχύ, η οπτική επικοινωνία υπερτερεί έναντι της επικοινωνίας RF. Ένας ακόμα λόγος είναι ότι οι οπτικοί πομποδέκτες περιλαμβάνουν απλούστερες κυκλωματικές διατάξεις σε σύγκριση με όσα αναφέρθηκαν για τους πομποδέκτες RF.

Η οπτική επικοινωνία στα δίκτυα smartdust μπορεί να χωριστεί σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες (Singh, 2014):

- Παθητική επικοινωνία μέσω laser (passive laser based communication)
- Ενεργητική επικοινωνία μέσω laser (active laser based communication)
- Επικοινωνία μέσω οπτικών ινών (fibreopticcommunication)

#### **1) Παθητική επικοινωνία μέσω laser**

Η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και ενός πομποδέκτη σταθμού βάσης (BST) σε ένα δίκτυο smartdust, μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση ενός παθητικού συστήματος μέσω laser (Singh, 2014). Για την επικοινωνία down-link (BST προς motes), ο σταθμός βάσης εστιάζει μια διαμορφωμένη δέσμη laser προς τον εκάστοτε κόμβο με τον οποίο θέλει να επικοινωνήσει. Ο εκάστοτε κόμβος χρησιμοποιεί ένα απλό οπτικό δέκτη για να αποκωδικοποιήσει το εισερχόμενο μήνυμα. Για την επικοινωνία up-link (motes προς BST), ο σταθμός βάσης εστιάζει μια μη διαμορφωμένη δέσμη laser προς τον κόμβο, ο οποίος με τη σειρά του διαμορφώνει και ανακλά τη δέσμη πίσω προς το BST. Για το λόγο αυτό, οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με ανακλαστήρες (CornerCubeRetroReflector - CCR), όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Ο CCR έχει την ιδιότητα να ανακλά κάθε ακτίνα φωτός πίσω στην πηγή υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Αν κάποιος από τους καθρέφτες του ανακλαστήρα χάσει την ευθυγράμμισή του, η ανάκλαση δεν πετυχαίνει το στόχο της. Ένας ανακλαστήρας CCR των smartdustmotes έχει ένα ηλεκτροστατικό ενεργοποιητή (actuator) ο οποίος μπορεί να ενεργοποιεί τους καθρέφτες του ανακλαστήρα με ρυθμό που μπορεί να φτάσει τιμές KHz. Με τον τρόπο αυτό, ο ενεργοποιητής παίζει το ρόλο διακόπτη "on-off" της διαμόρφωσης της δέσμης laser πριν αυτή ανακλαστεί πίσω προς το BST.

Αυτός ο τύπος επικοινωνίας δημιουργεί δίκτυα τοπολογίας απλού άλματος (singlehop), στα οποία οι κόμβοι δεν μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μεταξύ τους, αλλά μόνο με κάποιο σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης μπορεί να τοποθετηθεί αρκετά μακριά από τους κόμβους, δεδομένου ότι η υλοποιήσιμη επικοινωνία μέσω laser μπορεί να λειτουργεί με εμβέλεια εκατοντάδων μέτρων, με την προϋπόθεση βέβαια ότι ο BST και οι κόμβοι έχουν καθαρή οπτική επαφή (lineofsight) μεταξύ τους. Η επικοινωνία αυτού του τύπου μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές και πολύ μεταβλητές καθυστερήσεις αν η ακτίνα laser δεν εστιάζει προς τον κόμβο που επικοινωνεί με το BST. Κάτι τέτοιο βέβαια αποτελεί πρόβλημα της επικοινωνίας, καθώς, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, η κινητικότητα που παρουσιάζουν οι κόμβοι σε ένα δίκτυο smartdust είναι ιδιαίτερα μεγάλη, δεδομένου ότι το μέγεθός τους, τους καθιστά μεν ικανούς να αιωρούνται στον αέρα αλλά παράλληλα μπορούν εύκολα να παρασυρθούν από οποιοδήποτε δυνατό ρεύμα.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι οπτικές ζεύξεις είναι πολλά και πιο συγκεκριμένα (Singh, 2014):

- Οι οπτικοί πομποδέκτες απαιτούν απλές αναλογικές και ψηφιακές κυκλωματικές διατάξεις βασικής ζώνης (baseband) και δεν περιέχουν διαμορφωτές, αποδιαμορφωτές ή ενεργά φίλτρα διέλευσης
- Το μικρό μήκος κύματος του ορατού ή εγγύς υπέρυθρου φωτός (της τάξης του 1 μικρού) δίνει τη δυνατότητα σε συσκευές μικρών διαστάσεων να εκπέμπουν στενές δέσμες (δηλαδή, η υψηλή απολαβή κεραίας μπορεί να επιτευχθεί)
- Ένας πομποδέκτης σταθμού βάσης (BTS) εξοπλισμένος με δέκτη συμπαγής απεικόνισης μπορεί να αποκωδικοποιήσει την ταυτόχρονη μετάδοση του μεγάλου αριθμού motes που εκπέμπουν από διαφορετικές θέσεις, εντός του πεδίου λήψης του δέκτη, γεγονός το οποίο αποτελεί μια μορφή πολυπλεξίας διαίρεσης χώρου (SpaceDivisionMultiplexing – SDMA)
- Ο CCR δίνει τη δυνατότητα στους smartdustmotes να χρησιμοποιούν παθητικές τεχνικές οπτικής μετάδοσης, δηλαδή, να μεταδίδουν διαμορφωμένα οπτικά σήματα χωρίς την παροχή οποιασδήποτε οπτικής ισχύος

Η ορθή χρήση της παθητικής μετάδοσης δεδομένων μέσω laser παρουσιάζει ταυτόχρονα και κάποιες απαιτήσεις, όπως:

- Η αποκωδικοποίηση αυτών των ταυτόχρονων μεταδόσεων είναι επιτυχημένη μόνο στην περίπτωση που οι οπτικές επαφές των motes του δικτύου δεν αλληλεπικαλύπτονται, αν και μια τέτοια αλληλοεπικάλυψη μοιάζει απίθανη με δεδομένο το μικρό μέγεθός τους



- Μια δεύτερη απαίτηση της αποκωδικοποίησης των ταυτόχρονων μεταδόσεων είναι ότι η εικόνα που αποστέλλεται από διαφορετικούς motes θα πρέπει να απεικονίζεται σε διαφορετικά εικονοστοιχεία(pixels) στο δέκτη απεικόνισης του BTS. Για παράδειγμα, έστω ότι ένας σταθμός BTS καλύπτει μια περιοχή 17x17 μέτρων που περιέχει δίκτυο smartdust και ότι χρησιμοποιεί μια βιντεοκάμερα υψηλής ταχύτητας με διάταξη pixel-απεικόνισης 256x256. Κάθε εικονοστοιχείο, στην περίπτωση αυτή, καλύπτει μια περιοχή περίπου 6,6 τετραγωνικών μέτρων. Ως εκ τούτου, η ταυτόχρονη μετάδοση δύο motes μπορεί να αποκωδικοποιηθεί εφόσον η απόσταση μεταξύ τους δεν ξεπερνά αυτό το όριο

## ***II) Ενεργητική επικοινωνία μέσω laser***

Κατά την ενεργητική οπτική επικοινωνία, η επικοινωνία μεταξύ των motes και του BTS γίνεται συνήθως με αποστολή μιας ευθυγραμμισμένης ακτίνας laser από τον εκάστοτε mote προς το σταθμό βάσης με χρήση ενός ενεργού πομπού διόδου laser οδήγησης δέσμης (Singh, 2014). Το συγκεκριμένο σύστημα περιλαμβάνει έναν ημιαγωγό laser, ένα φακό ευθυγράμμισης και ένα μικρο-καθρέφτη οδήγησης δέσμης, όπως φαίνεται στην εικόνα 9. Το είδος αυτό οπτικής επικοινωνίας είναι κατάλληλο για peer-to-peer επικοινωνία, υπό τον όρο ότι υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ των peer. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία MEMS, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε δίκτυο που επικοινωνεί με ενεργητικό οπτικό τρόπο μπορεί να κατασκευαστούν τόσο μικροσκοπικά ώστε να ταιριάζουν στις διαστάσεις των smartdustmotes.

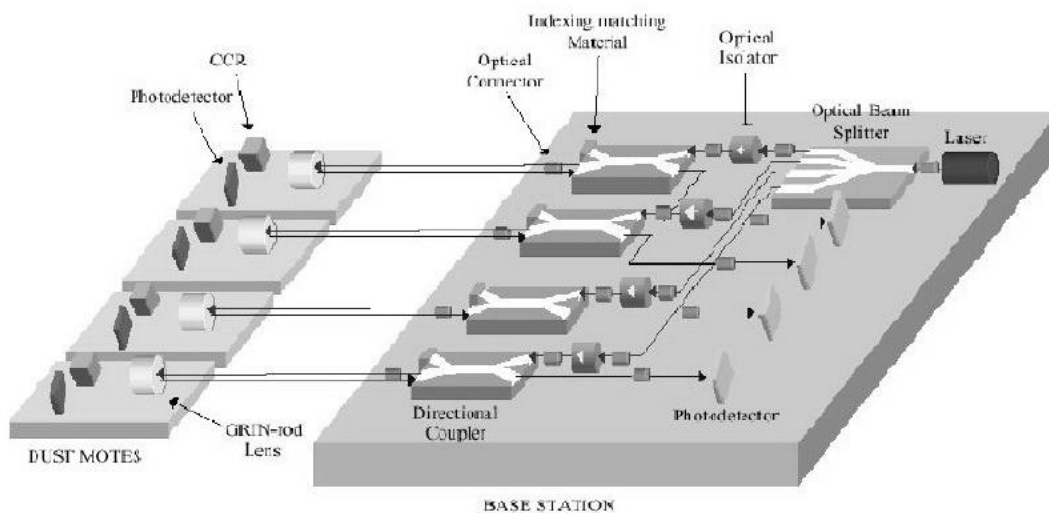
Ένα από τα μειονεκτήματα του ενεργού πομπού είναι η σχετικά υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη χρήση της ενεργητικής οπτικής επικοινωνίας μόνο σε περιπτώσεις «καταιγιστικής επικοινωνίας» μικρής διάρκειας (shortdurationburst-modecommunication). Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ισχύς κατανάλωσης, ο ενεργός πομπός θα πρέπει να διαθέτει κάποιου είδους πρωτόκολλο που θα διευκολύνει τη στόχευση της δέσμης προς το δέκτη, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς κατεύθυνσης της πορείας και ενεργής οδήγησης της δέσμης. Τα στοιχεία αυτά όμως καθιστούν το σχεδιασμό των motes πιο περίπλοκο.

Μεγάλο πλεονέκτημα της ενεργητικής οπτικής επικοινωνίας είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος. Το χαρακτηριστικό αυτό δίνει τη δυνατότητα στην οπτική ασύρματη επικοινωνία να καλύπτει τεράστιες αποστάσεις. Η χρήση του τρόπου αυτού επικοινωνίας δίνει επίσης τη δυνατότητα δημιουργίας δικτύων πολλαπλών αλμάτων (multi-hop). Ο «καταιγιστικός» τρόπος λειτουργίας (burst-mode) παρέχει τον πιο ενεργειακά αποδοτικό τρόπο δημιουργίας ενός δικτύου multi-hop. Τέλος, η χρήση ενεργού πομπού διόδου laser δίνει τη δυνατότητα λειτουργίας των motes, έστω και για λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου, μέχρι και αρκετές δεκάδες megabits/sec.

### III) Επικοινωνία μέσω οπτικών ινών

Σε αυτή την προσέγγιση, ένας ημιαγωγός laser, ένα καλώδιο οπτικών ινών και μια δίοδος που λειτουργεί ως δέκτης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, τη μεταφορά και την ανίχνευση του οπτικού σήματος, αντίστοιχα (Εικ.10).

Τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τρόπου επικοινωνίας είναι τα ίδια με την περίπτωση παθητικής οπτικής επικοινωνίας, δεδομένου ότι στην επικοινωνία μέσω οπτικών ινών χρησιμοποιούνται παρόμοιες τεχνικές. Η κατανάλωση ισχύος σε αυτή την προσέγγιση είναι χαμηλή λόγω του μικρού μεγέθους του οπτικού πομποδέκτη. Οι smartdustmotes, επίσης, δεν απαιτείται να έχουν ενσωματωμένη κάποια πηγή φωτός, καθώς τα στοιχεία CCR διαμορφώνουν και μεταφέρουν τα δεδομένα στο σταθμό βάσης (Akyildiz&Vuran, 2010).



### ΕΙΚΟΝΑ 10: Κυκλωματική διάταξη επικοινωνίας μέσω οπτικών ινών

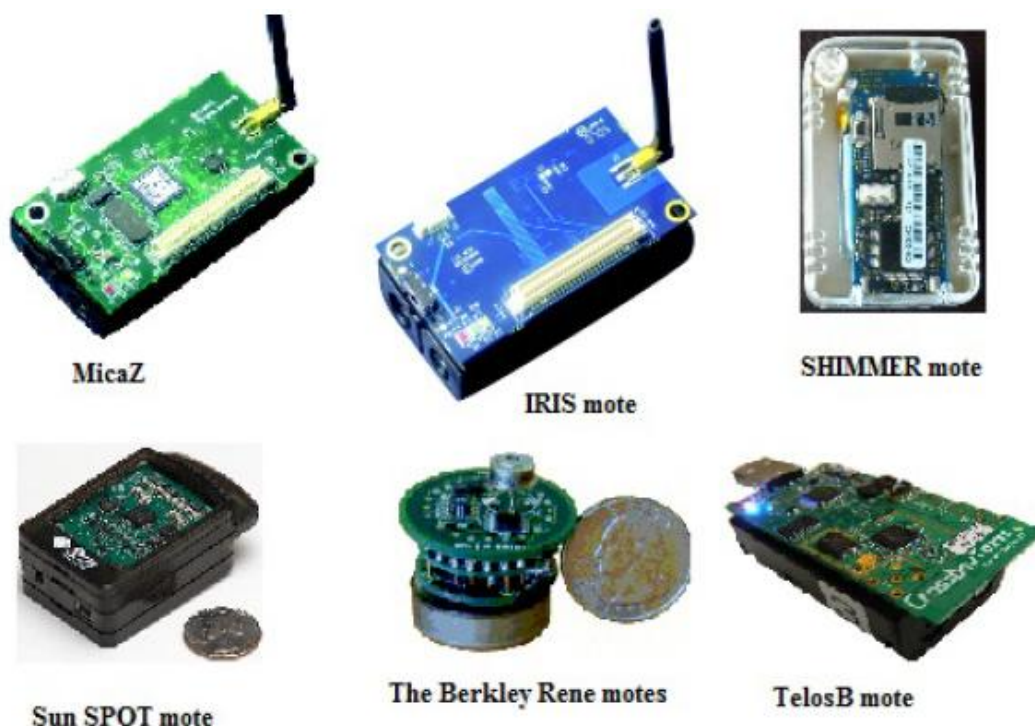
Η σύγκριση των δύο τρόπων επικοινωνίας (παθητική οπτική και μέσω οπτικών ινών) αποκαλύπτει την ύπαρξη μερικών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του ενός έναντι του άλλου. Στην επικοινωνία μέσω οπτικών ινών δεν υπάρχει ανάγκη ύπαρξης οπτικής επαφής μεταξύ motes και BST, καθώς η αποστολή και λήψη των οπτικών σημάτων γίνεται μέσω οπτικών ινών. Η μέθοδος αυτή είναι επίσης ασφαλέστερη για το ανθρώπινο μάτι, επειδή δεν εμπλέκεται καμία δίοδος εκπομπής laser. Δύο ακόμα πλεονεκτήματα της προσέγγισης αυτής αποτελούν το μεγαλύτερο εύρος επικοινωνίας και η εγγυημένη επικοινωνία μεταξύ των motes και του σταθμού βάσης.

Τα καλώδια οπτικών ινών αποτελούν, όμως, πηγή περιορισμού κίνησης και επομένως ελαχιστοποιούν την κινητικότητα των motes.

Επιπλέον, καθένα από αυτά θα πρέπει να έχει σταθερή σύνδεση με το σταθμό βάσης, γεγονός που επιβαρύνει το κόστος υλοποίησης του δικτύου αλλά και δυσκολεύει το σχεδιασμό του σταθμού βάσης.

## 2.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας

Ουσιαστικά μέχρι στιγμής τα δίκτυα smartdust δεν χρησιμοποιούν κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας που να έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για να καλύπτει τις ανάγκες τους, αλλά χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 το οποίο έχει υιοθετηθεί ως επικοινωνιακό πρότυπο για όλες τις περιπτώσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και χαμηλού κόστους (Veena&Umar, 2013). Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο είναι αρκετά ευέλικτο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, με την προϋπόθεση ότι πραγματοποιείται κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του.



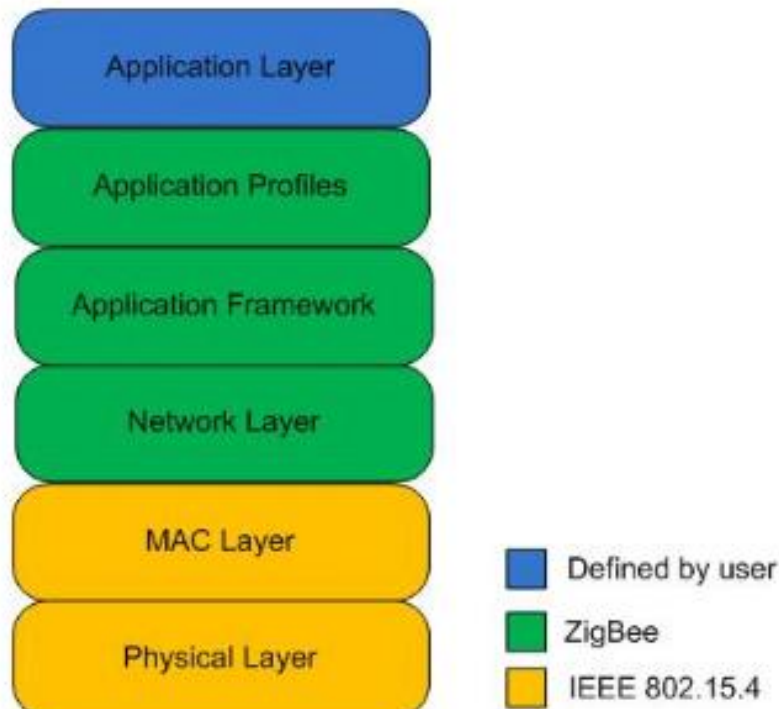
### ΕΙΚΟΝΑ 11: Διάφοροι τύποι motes

Οι περισσότεροι από τους τύπους smartdustmotes χρησιμοποιούν αυτό το πρότυπο επικοινωνίας στα δίκτυα στα οποία χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα οι τύποι Rene, IRIS, TelosB, SunSPOT και LOTUS είναι όλοι συμβατοί με το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4. Ο τύπος MicaZ είναι συμβατός με τα πρωτόκολλα IEEE 802.15.4/Zigbee, ενώ ο τύπος SHIMMER είναι συμβατός με τα πρωτόκολλα IEEE 802.15.4/Bluetooth. Οι διαφορές αυτές οφείλονται τόσο στις διαφορετικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται οι διάφοροι τύποι motes όσο και στο εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιούν για την επικοινωνία μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα (Veena&Umar, 2013):

- Ο τύπος RENE χρησιμοποιείται σε εφαρμογές παρακολούθησης και επιτήρησης εξωτερικών χώρων καθώς και ελέγχου των περιβαλλοντικών συνθηκών, ενώ οι ζώνες συχνοτήτων επικοινωνίας είναι 2,4GHz, 868MHz ή 916MHz
- Οι τύποι IRIS και TelosB χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές παρακολούθησης και επιτήρησης εσωτερικών χώρων και χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων 2405-2480MHz
- Οι τύποι MicaZ, SHIMMER και SunSPOT κάνουν χρήση της μπάντας 2400-2483,5MHz για επικοινωνία και χρησιμοποιούνται σε ευρεία γκάμα εφαρμογών όπως παρακολούθησης και επιτήρησης εσωτερικών χώρων (MicaZ), ιατρικές εφαρμογές (SHIMMER) και στρατιωτικές εφαρμογές (SunSPOT)

Στην εικόνα 11 παρουσιάζονται όλοι οι τύποι motes που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 ρυθμίζει την επικοινωνία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN), ορίζοντας το στρώμα MAC (Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο) και το φυσικό στρώμα, όπως μπορεί να φανεί στην εικόνα 12 (Lanric&Pora, 2015). Στην περίπτωση συμβατότητας των motes με τα ZigBee ή Bluetooth, τα πρωτόκολλα αυτά ορίζουν τα στρώματα δικτύου (NWK) και εφαρμογών.



**ΕΙΚΟΝΑ 12:** Το πρότυπο επικοινωνίας IEEE 802.15.4 και το πρωτόκολλο ZigBee

Σε ένα δίκτυο WSN που συμμορφώνεται με το πρότυπο IEEE 802.15.4, το φυσικό στρώμα βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο. Αυτό το στρώμα ελέγχει τον πομπό και είναι άμεσα υπεύθυνο για την ενεργοποίηση των μεταδόσεων δεδομένων ή τη λήψη πακέτων, επιλέγοντας το κανάλι επικοινωνίας. Το στρώμα MAC ασφαρίζει τη διεπαφή μεταξύ του φυσικού στρώματος και του στρώματος δικτύου, όντας υπεύθυνο για τη δημιουργία πακέτων και το συγχρονισμό των συσκευών.

Το στρώμα δικτύου εξασφαλίζει τη σύνδεση μεταξύ του στρώματος MAC και των τριών στρωμάτων που συνδέονται με τις εφαρμογές: το πλαίσιο εφαρμογών (applicationframework), τα προφίλ εφαρμογών (applicationprofiles) και το στρώμα εφαρμογών (applicationlayer) που ορίζεται από το χρήστη. Το στρώμα δικτύου είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη του δικτύου, την ασφάλεια, τη διαχείριση ενέργειας, την ανάπτυξη της κατάλληλης τοπολογίας του δικτύου και τη δρομολόγηση των πακέτων.

Στην περίπτωση που οι smartdustmotes είναι συμβατοί με το πρωτόκολλο ZigBee, το στρώμα εφαρμογών αναπτύσσεται από το χρήστη με βάση τα προφίλ εφαρμογών και το πλαίσιο εφαρμογών που ορίζονται από την ZigBeeAlliance. Ανάλυση της απόδοσης του πρωτοκόλλου ZigBee σε δίκτυα smartdust απέδειξε ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των motes σε ένα δίκτυο τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των μεταφερόμενων πακέτων αλλά με ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού απώλειας πακέτων (Kumar, & Singh, 2012). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης απέδειξαν επίσης ότι η περιοχή κάλυψης του δικτύου περιορίζεται από το χαρακτηριστικό της επεκτασιμότητας (scalability) του πρωτοκόλλου. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι για την καλύτερη εκμετάλλευση της τεχνολογίας smartdust θα πρέπει στο μέλλον να γίνει έρευνα πάνω στο σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας που θα άρει όλα αυτά τα μειονεκτήματα του πρωτοκόλλου ZigBee αλλά και του Bluetooth, όπως αυτά αναφέρθηκαν και στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

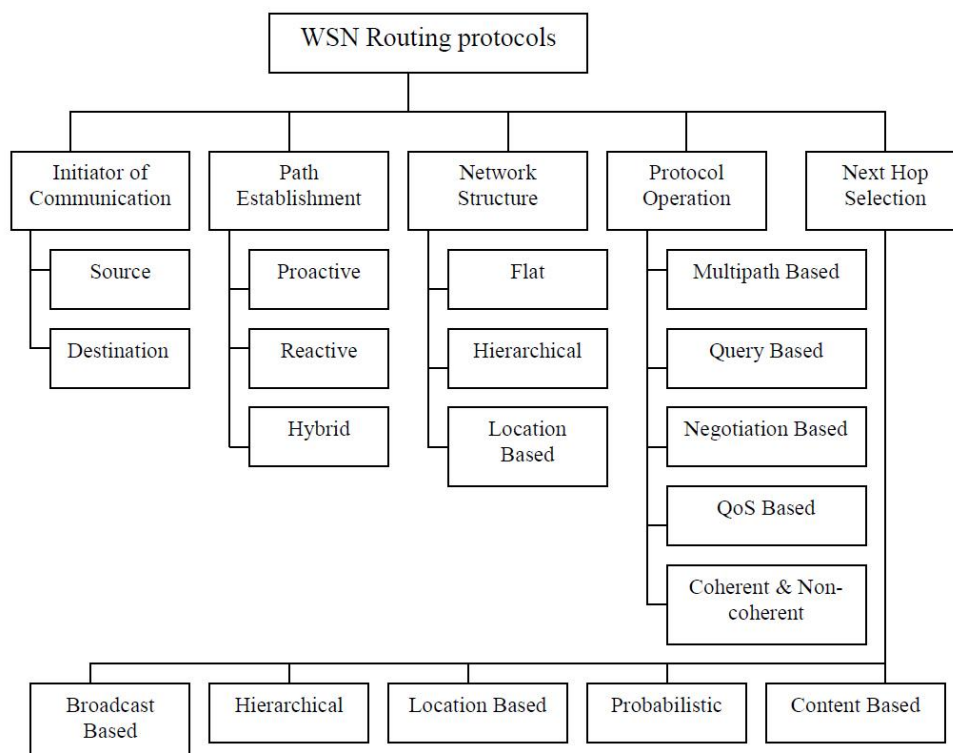
## 2.6 Πρωτόκολλα δρομολόγησης

Η δρομολόγηση είναι μια διαδικασία προσδιορισμού μιας διαδρομής μεταξύ του κόμβου πηγής (sourcencode) και του κόμβου προορισμού (destination ή sinknode), η οποία επιλέγεται κατόπιν αιτήματος για μετάδοση δεδομένων (Dargie&Poellabauer, 2010). Στα δίκτυα WSN το στρώμα δικτύου, ως επί το πλείστον, χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της δρομολόγησης των εισερχόμενων δεδομένων. Όπως είναι γνωστό, γενικά, στα δίκτυα πολλαπλών αλμάτων, τα δεδομένα που αποστέλλει ο κόμβος πηγής δεν μπορούν να φτάσουν άμεσα στον κόμβο προορισμού (Salman, 2014). Έτσι, οι ενδιάμεσοι αισθητήρες κόμβοι πρέπει να αναμεταδίδουν τα πακέτα τους.

Η λύση στο πρόβλημα αυτής της αναμετάδοσης καθώς και της καλύτερης δρομολόγησης των πακέτων δεδομένων δίνεται μέσω της υλοποίησης των πινάκων δρομολόγησης (routingtables). Οι πίνακες αυτοί περιέχουν καταλόγους με όλους τους πιθανούς κόμβους στους οποίους μπορεί να προωθηθεί το εκάστοτε πακέτο δεδομένων μέχρι να καταλήξει στον τελικό προορισμό του. Οι πίνακες δρομολόγησης δημιουργούνται και συντηρούνται από τους εκάστοτε αλγορίθμους δρομολόγησης με τη βοήθεια του χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου δρομολόγησης.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των δικτύων WSN μπορούν να ταξινομηθούν με πέντε διαφορετικούς τρόπους, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 13 (Salman, 2014):

- σύμφωνα με τον τρόπο καθορισμού των διαδρομών δρομολόγησης (pathestablishment)
- σύμφωνα με τη δομή του δικτύου (networkstructure)
- σύμφωνα με την λειτουργία του πρωτόκολλου (protocoloperation)
- σύμφωνα με τον εκκινητή της επικοινωνίας (initiatorofcommunication), και
- σύμφωνα με τον τρόπο επιλογής από το πρωτόκολλο του επόμενου άλματος προώθησης των δεδομένων (nexthopselection)



**ΕΙΚΟΝΑ 13: Ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης των δικτύων WSN**

### 2.6.1 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει καθορισμού διαδρομής

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που καθορίζουν τη διαδρομή δρομολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν εκ νέου με έναν από τους ακόλουθους τρεις τρόπους (Sharma, 2013):

- Πρωτόκολλα δρομολόγησης έτοιμης για χρήση (proactiveprotocols)
- Πρωτόκολλα δρομολόγησης κατ' απαίτηση (reactiveprotocols), και
- Υβριδικά πρωτόκολλα (hybridprotocols)

Στα proactive πρωτόκολλα, γίνεται υπολογισμός όλων των δυνατών διαφορετικών διαδρομών δρομολόγησης, πριν καν απαιτηθούν, οι οποίες στη συνέχεια αποθηκεύονται στον πίνακα δρομολόγησης κάθε κόμβου του δικτύου. Στα reactive πρωτόκολλα οι διαδρομές αυτές υπολογίζονται μόνο όταν απαιτούνται. Όπως είναι αναμενόμενο, τα υβριδικά πρωτόκολλα χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό των άλλων δύο προσεγγίσεων.

#### ***I) Πρωτόκολλα δρομολόγησης έτοιμης για χρήση***

Τα proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης αποσκοπούν στη διατήρηση πινάκων δρομολόγησης για όλους τους κόμβους του δικτύου, χρησιμοποιώντας στοιχεία περιοδικής διάδοσης των πληροφοριών δρομολόγησης. Κύρια χαρακτηριστικά των πινάκων δρομολόγησης που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο είναι η συνέπεια και η ακρίβεια (Ullah&Ahmad, 2009). Με αυτόν τον τρόπο δρομολόγησης, όλες οι δυνατές διαδρομές υπολογίζονται πριν καν απαιτηθούν και επομένως όταν κάτι τέτοιο συμβεί, η βέλτιστη διαδρομή είναι ήδη υπολογισμένη και έτοιμη για χρήση. Τα περισσότερα από αυτά τα είδη πρωτοκόλλων δρομολόγησης μπορεί να χρησιμοποιηθούν τόσο σε επίπεδα (flat) αλλά και σε ιεραρχικά (hierarchical) δομημένα δίκτυα.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης proactive δρομολόγησης στα δίκτυα επίπεδης δομής είναι η ικανότητά της να υπολογίζει τη βέλτιστη διαδρομή, υπολογισμός όμως που επιβαρύνει την υπολογιστική ικανότητα του δικτύου, γεγονός το οποίο δεν είναι αποδεκτό σε πολλά περιβάλλοντα. Στην περίπτωση μεγαλύτερων ad-hoc δικτύων, η κάλυψη των απαιτήσεων δρομολόγησης γίνεται με χρήση proactive πρωτοκόλλου για δίκτυα ιεραρχικής δομής.

#### ***II) Πρωτόκολλα δρομολόγησης κατ' απαίτηση***

Στην περίπτωση της reactive δρομολόγησης δεν διατηρείται καμία πληροφορία που να αφορά τους κόμβους ενός δικτύου αλλά ο καθορισμός της δρομολόγησης πακέτων μεταξύ των κόμβων πηγής και του προορισμού βασίζεται σε δυναμική αναζήτηση της, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις

της. Ο καθορισμός της βέλτιστης διαδρομής προκύπτει μέσω ερωτημάτων (routediscoveryquery) τα οποία εντοπίζουν την καταλληλότερη διαδρομή μεταξύ πηγής και προορισμού καθώς και της αντίστροφης πορείας (Ullah&Ahmad, 2009).

Ως εκ τούτου, στην περίπτωση της δρομολόγησης κατ' απαίτηση, η επιλογή της διαδρομής γίνεται ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του δικτύου με χρήση ερωτημάτων διαδρομής οι οποίες γίνονται πριν τον καθορισμό της. Στην πράξη, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αυτού του τύπου λειτουργούν με δύο τρόπους:

- με αποκατάσταση και εκ νέου υπολογισμό της διαδρομής σε περίπτωση εμφάνισης προβλήματος αποστολής πακέτων μέσω της προεπιλεγμένης διαδρομής, και
- με μείωση της επιβάρυνσης της επικοινωνίας (communicationoverhead) που μπορεί να προκύψει από πλημμύρες στο δίκτυο

### **III) Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης**

Αυτός ο τύπος πρωτοκόλλων εφαρμόζεται σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας. Όπως προκύπτει και από την ονομασία τους, η προσέγγιση υβριδικής δρομολόγησης περιέχει στοιχεία και από τα δύο προαναφερθέντα είδη δρομολόγησης. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται τεχνική ομαδοποίησης (clusteringtechnique) που καθιστά το δίκτυο σταθερό και κλιμακούμενο. Αυτό σημαίνει ότι το εκάστοτε δίκτυο χωρίζεται σε πολλές συστάδες, η σύσταση των οποίων διατηρείται δυναμικά, ακόμα και στην περίπτωση που κάποιος κόμβος προστεθεί ή φύγει από μια συγκεκριμένη συστάδα (Ullah&Ahmad, 2009).

Η ομαδοποίηση αυτή δίνει τη δυνατότητα χρήσης proactive δρομολόγησης για διαδρομές εντός των συστάδων και reactive δρομολόγησης για διαδρομές μεταξύ των συστάδων. Η επιβάρυνση του δικτύου στην περίπτωση της υβριδικής δρομολόγησης αφορά τη διατήρηση των συστάδων.

#### **2.6.2 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει δομής του δικτύου**

Η αρχιτεκτονική δομή ενός δικτύου είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο το οποίο καθορίζεται από την απαιτούμενη λειτουργία του. Με βάση τη δομή αυτή, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες (Sharma, 2013):

- Πρωτόκολλα δρομολόγησης δικτύων επίπεδης δομής (flat-basedroutingprotocols)
- Πρωτόκολλα δρομολόγησης δικτύων ιεραρχικής δομής (hierarchical-basedroutingprotocols)
- Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει θέσης (location-basedroutingprotocols)



## **I) Πρωτόκολλα δρομολόγησης δικτύων επίπεδης δομής**

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης δικτύων επίπεδης δομής (flat-based routing protocols) χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου ο αριθμός των κόμβων αισθητήρων είναι πολύ μεγάλος. Στα δίκτυα αυτά, ο ρόλος του κάθε κόμβου είναι ο ίδιος, ενώ, δεδομένου του μεγάλου αριθμού τους, δεν είναι δυνατός ο ορισμός συγκεκριμένης αναγνώρισης (Id) για καθένα από αυτούς. Το στοιχείο αυτό οδηγεί σε προσέγγιση δρομολόγησης με επίκεντρο τα δεδομένα (data-centric routing approach) κατά την οποία ο σταθμός BTS στέλνει ερωτήματα σε ομάδες κόμβων, περιμένοντας την απόκρισή τους.

Παραδείγματα πρωτοκόλλων δρομολόγησης δικτύων επίπεδης δομής είναι τα εξής :

- Το ενεργειακά ενήμερο πρωτόκολλο δρομολόγησης (EnergyAwareRouting- EAR)
- Η κατευθυνόμενη διάχυση (DirectedDiffusion - DD)
- Το πρωτόκολλο δρομολόγησης διαδοχικής ανάθεσης (SequentialAssignmentRouting- SAR)
- Ο αλγόριθμος ελαχίστου κόστους προώθησης (MinimumCostForwardingAlgorithm - MCFA)
- Το πρωτόκολλο αισθητήρων για πληροφορίες μέσω διαπραγμάτευσης (SensorProtocolsforInformationviaNegotiation - SPIN)
- Η τεχνική ενεργής προώθησης ερωτημάτων σε δίκτυα αισθητήρων (ActiveQueryforwardingInsensoRnEtworks - ACQUIRE)

## **II) Πρωτόκολλα δρομολόγησης δικτύων ιεραρχικής δομής**

Στην περίπτωση που απαιτείται ένα δίκτυο WSN να παρουσιάζει επεκτασιμότητα και αποτελεσματική επικοινωνία, η καλύτερη επιλογή είναι η χρήση πρωτοκόλλων δρομολόγησης δικτύων ιεραρχικής δομής (hierarchical-based routing protocols), γνωστών και ως πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει συστάδων (cluster based routing) (Salman, 2014). Αυτός ο τρόπος δρομολόγησης αποτελεί μια ενεργειακά αποδοτική μέθοδο στην οποία οι κόμβοι υψηλής ενέργειας επιλέγονται τυχαία για την επεξεργασία και την αποστολή των δεδομένων, ενώ οι κόμβοι χαμηλής ενέργειας χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την αποστολή πληροφοριών προς τους επικεφαλές της κάθε συστάδας. Αυτή η ιδιότητα της δρομολόγησης βάσει ιεραρχίας συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην επεκτασιμότητα του δικτύου, τη διάρκεια ζωής του αλλά και την κατανάλωση ελάχιστης ενέργειας.

Παραδείγματα πρωτοκόλλων δρομολόγησης που βασίζονται στην ιεραρχική δομή του δικτύου αποτελούν (Singh και συν., 2010):

- Το πρωτόκολλο δρομολόγησης ιεραρχικής ενεργούς ισχύος (HierarchicalPower-ActiveRouting - HPAR)

- Το ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο δικτύου αισθητήρων ευαίσθητο σε κατώφλι (ThresholdsensitiveEnergyEfficientsensorNetworkprotocol – TEEN)
- Η ενεργειακά αποδοτική συνάθροιση στα συστήματα πληροφοριών αισθητήρων (Power-EfficientGatheringinSensorInformationSystems – PEGASIS)
- Το δίκτυο επικοινωνίας ελάχιστης ενέργειας (MinimumEnergyCommunicationNetwork – MECN)

### **III) Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει θέσης**

Σε αυτό το είδος της αρχιτεκτονικής του δικτύου, οι κόμβοι αισθητήρων είναι τυχαία διάσπαρτοι σε μια περιοχή και κυρίως γνωστοί μόνο από τη γεωγραφική θέση όπου έχουν αναπτυχθεί. Η θέση τους, σε αυτή την περίπτωση βρίσκεται ως επί το πλείστον με τη βοήθεια GPS. Η απόσταση μεταξύ τους εκτιμάται από την ισχύ του σήματος που λαμβάνουν και οι συντεταγμένες τους υπολογίζονται από την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των γειτονικών κόμβων.

Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει θέσης (location-basedrouting) είναι τα εξής:

- Το πρωτόκολλο δρομολόγησης διαδοχικής ανάθεσης (SequentialAssignmentRouting- SAR)
- Το σύστημα ad-hoc θέσης (Ad-hoc Positioning System - APS)
- Η γεωγραφική προσαρμοστική πιστότητα (GeographicAdaptiveFidelity -GAP)
- Το πρωτόκολλο GOAFR (Greedy Other Adaptive Face Routing)
- Η γεωγραφική και ενεργειακά ενήμερη δρομολόγηση (Geographic and Energy-Aware Routing – GEAR)
- Η δρομολόγηση σε γεωγραφική απόσταση (GeographicDistanceRouting - GEDIR)

#### **2.6.3 Πρωτόκολλα δρομολόγησης με βάση τη λειτουργία τους**

Οι εφαρμογές των δικτύων WSN μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη λειτουργικότητά τους. Ως εκ τούτου, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη λειτουργία τους η οποία θα πρέπει να ανταποκρίνεται σε αυτή την λειτουργικότητα των δικτύων (Salman, 2014). Η λογική βάσει της οποίας γίνεται αυτή η ταξινόμηση είναι η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης και η εξοικονόμηση των λιγοστών πόρων του δικτύου.

Έτσι, με την λογική αυτή, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- Πρωτόκολλα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών (multipathroutingprotocols)
- Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει ερωτήματος (querybasedroutingprotocols)
- Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει διαπραγμάτευσης (negotiationbasedroutingprotocols)
- Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει ποιότητας υπηρεσίας (QoSbasedroutingprotocols)
- Σύμφωνη και ασύμφωνη επεξεργασία (coherent and non-coherent processing)

### ***I) Πρωτόκολλα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών***

Όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, τα πρωτόκολλα που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία παρέχουν σε ένα μήνυμα επιλογές πολλαπλών διαδρομών ώστε να φθάσει στον προορισμό του, μειώνοντας έτσι την καθυστέρηση (delay) και αυξάνοντας την απόδοση του δικτύου (Salman, 2014). Με τα πρωτόκολλα αυτά η αξιοπιστία του δικτύου επιτυγχάνεται μέσω της αυξημένης επιβάρυνσης. Από τη στιγμή όμως, που οι διαδρομές αυτές θα πρέπει να διατηρούνται συνεχώς ενεργές για την περιοδική αποστολή μηνυμάτων, η κατανάλωση ενέργειας στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτερη.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών είναι τα εξής (Ullah&Ahmad, 2009):

- Το πρωτόκολλο πολλαπλών διαδρομών και πολλαπλών ταχυτήτων (MultipathandMultiSPEED - MMSPEED)
- Τα πρωτόκολλα αισθητήρα για πληροφορίες μέσω διαπραγμάτευσης (SensorProtocolsforInformationviaNegotiation - SPIN)

### ***II) Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει ερωτήματος***

Η κατηγορία αυτή των πρωτοκόλλων στοχεύει στην αποστολή και λήψη ερωτημάτων για τα δεδομένα. Ο κόμβος προορισμού στέλνει ένα ερώτημα ενδιαφέροντος για την αποστολή δεδομένων μέσω του δικτύου και ο κόμβος που μπορεί να αποκριθεί στο συγκεκριμένο ερώτημα απαντά με αποστολή καταφατικής απόκρισης στον κόμβο που απέστειλε το αρχικό ερώτημα. Το ερώτημα χρησιμοποιεί συνήθως γλώσσες υψηλού επιπέδου.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει ερωτήματος είναι τα εξής (Ullah&Ahmad, 2009):

- Τα πρωτόκολλα αισθητήρα για πληροφορίες μέσω διαπραγμάτευσης (SensorProtocolsforInformationviaNegotiation - SPIN)
- Η κατευθυνόμενη διάχυση (DirectedDiffusion - DD)
- Το πρωτόκολλο δρομολόγησης COUGAR

### **III) Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει διαπραγμάτευσης**

Η κατηγορία αυτή των πρωτοκόλλων χρησιμοποιεί περιγραφείς (descriptors) δεδομένων υψηλού επιπέδου για την αποφυγή περιττών μεταδόσεων δεδομένων κατά τη διάρκεια των διαπραγματεύσεων. Τα πρωτόκολλα αυτά παίρνουν έξυπνες αποφάσεις, σχετικά με τη διαδικασία της επικοινωνίας με βάση δεδομένα του δικτύου, όπως για παράδειγμα το ποσό των διαθέσιμων πόρων.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει διαπραγμάτευσης είναι τα εξής (Ullah&Ahmad, 2009):

- Τα πρωτόκολλα αισθητήρα για πληροφορίες μέσω διαπραγμάτευσης (SensorProtocolsforInformationviaNegotiation - SPIN)
- Το πρωτόκολλο δρομολόγησης διαδοχικής ανάθεσης (SequentialAssignmentRouting- SAR)
- Η κατευθυνόμενη διάχυση (DirectedDiffusion - DD)

### **IV) Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει ποιότητας υπηρεσίας**

Σε αυτό το είδος της δρομολόγησης, σκοπός είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ποιότητας υπηρεσίας (QoS) στις εφαρμογές του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, τα μετρικά που χρησιμοποιούνται είναι η ευαισθησία καθυστέρησης και η κατανάλωση ενέργειας, ενώ παράλληλα λαμβάνεται υπ' όψη και η συνάρτηση κόστους της επιθυμητής QoS.

Παραδείγματα τέτοιου είδους δρομολόγησης είναι τα εξής (Ullah&Ahmad, 2009):

- Το πρωτόκολλο δρομολόγησης διαδοχικής ανάθεσης (SequentialAssignmentRouting- SAR)
- Το πρωτόκολλο SPEED
- Το πρωτόκολλο πολλαπλών διαδρομών και πολλαπλών ταχυτήτων (MultipathandMultiSPEED - MMSPEED)

### **V) Σύμφωνη και ασύμφωνη επεξεργασία**

Η επεξεργασία των δεδομένων αποτελεί μια από τις σημαντικότερες λειτουργίες των δικτύων WSN. Με βάση τις διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων που χρησιμοποιούνται, είναι δυνατή η ταξινόμηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που υποστηρίζουν τις τεχνικές αυτές στους εξής δύο τύπους (Sharma, 2013):

- **Ασύμφωνη επεξεργασία δεδομένων (Non-coherentdataprocessing):** Στην περίπτωση αυτή, οι κόμβοι επεξεργάζονται τοπικά τα πρωτογενή δεδομένα (rawdata) πριν την αποστολή τους σε άλλους κόμβους για περαιτέρω επεξεργασία.

Οι κόμβοι που εκτελούν την περαιτέρω επεξεργασία αποκαλούνται aggregators

- **Σύμφωνη επεξεργασία δεδομένων (Coherent data processing):**  
Στην περίπτωση αυτή, τα δεδομένα διαβιβάζονται στους aggregators μετά από ελάχιστη επεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει διεργασίες όπως χρονική σήμανση (timestamping), αποφυγή διπλοεγγραφών (duplicatesuppression), κ.λπ. Όταν όλοι οι κόμβοι είναι πηγές και στέλνουν τα δεδομένα στον κεντρικό κόμβο (aggregator), καταναλώνεται μεγάλη ποσότητα ισχύος. Ένας τρόπος μείωσης της ισχύος αποτελεί ο περιορισμός του αριθμού των πηγών που μπορούν να στείλουν δεδομένα στον κεντρικό κόμβο (aggregator)

#### **2.6.4 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει του εκκινητή επικοινωνίας**

Σε αυτόν τον τύπο πρωτοκόλλων, η δρομολόγηση εξαρτάται από την επικοινωνία ανάμεσα στις συνιστώσες του δικτύου, οι οποίες συνήθως βρίσκονται σε προσωρινή κατάσταση αναστολής λειτουργίας. Όταν οποιοδήποτε μέρος του δικτύου(ο κόμβος προορισμού, ο σταθμός βάσης ή ο κόμβος πηγής) χρειάζεται κάποια υπηρεσία από άλλο μέρος, τότε το πρώτο μέρος θα ξεκινήσει τη διαδικασία δρομολόγησης, ώστε να αποστείλει ή / και να λάβει τα πακέτα ελέγχου ή δεδομένων.

Έτσι σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τα εξής πρωτόκολλα (Sharma, 2013):

- Πρωτόκολλο δρομολόγησης με εκκίνηση από την πηγή
- Πρωτόκολλο δρομολόγησης με εκκίνηση από τον προορισμό

#### **2.6.5 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει επιλογής του επόμενου άλματος**

Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των πρωτοκόλλων είναι ότι κάθε κόμβος επιλέγει το επόμενο άλμα (ενός ερωτήματος ή / και μιας απόκρισης) προς τον προορισμό, με βάση τοπικά αποθηκευμένες πληροφορίες (Acs&Buttyán, 2007). Το επόμενο άλμα μπορεί να επιλεγεί:

- με τυχαία επιλογή κόμβου μεταξύ όλων των γειτονικών (πιθανολογική επιλογή - probabilistic)
- με εξαγωγή πληροφοριών δρομολόγησης από τα ανιχνευόμενα δεδομένα που μεταφέρονται από το μήνυμα (επιλογή με βάση το περιεχόμενο – content-based)
- χρησιμοποιώντας ένα ιεραρχικό σύστημα (ιεραρχική επιλογή – hierarchical)
- με χρήση της γεωγραφικής θέσης (επιλογή βάσει θέσης - location-based)

- μεταδίδοντας το μήνυμα και αφήνοντας στους γειτονικούς κόμβους την απόφαση της εκ νέου μετάδοσής του (επιλογή με βάση τη μετάδοση – broadcast-based)

### ***I) Πρωτόκολλα δρομολόγησης πιθανολογικής επιλογής***

Τα πρωτόκολλα αυτά προϋποθέτουν ότι όλοι οι κόμβοι αισθητήρων είναι ομοιογενείς και τυχαία αναπτυγμένοι εντός δικτύου. Η χρήση αυτού του πρωτοκόλλου δρομολόγησης επιτρέπει στους κόμβους αισθητήρων να επιλέγουν τυχαία τον γείτονα του επόμενου άλματος για τη μεταφορά του εκάστοτε μηνύματος. Σε αυτή την περίπτωση, η πιθανότητα επιλογής ενός ορισμένου γείτονα είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το κόστος υλοποίησης του δικτύου (Singh και συν., 2010). Το ενεργειακά ενήμερο πρωτόκολλο δρομολόγησης (EnergyAwareRouting- EAR) αποτελεί παράδειγμα πρωτοκόλλων δρομολόγησης πιθανολογικής επιλογής.

### ***II) Πρωτόκολλα δρομολόγησης με βάση το περιεχόμενο***

Τα πρωτόκολλα αυτά καθορίζουν το επόμενο άλμα στη διαδρομή αποκλειστικά με βάση το περιεχόμενο του ερωτήματος. Αυτό το είδος πρωτοκόλλων δρομολόγησης ταιριάζει περισσότερο στην αρχιτεκτονική δομή των δικτύων αισθητήρων, αφού τα ερωτήματα που αποστέλλει ένας σταθμός βάσης δεν αφορά συγκεκριμένους κόμβους αλλά δεδομένα, ανεξάρτητα από το που βρίσκονται (Singh και συν., 2010).

Παραδείγματα πρωτοκόλλων δρομολόγησης με βάση το περιεχόμενο αποτελούν:

- Το πρωτόκολλο κατευθυνόμενης διάχυσης (DirectedDiffusion - DD), και
- Το ενεργειακά ενήμερο πρωτόκολλο δρομολόγησης (EnergyAwareRouting- EAR)

### ***III) Πρωτόκολλα δρομολόγησης ιεραρχικής επιλογής***

Στα πρωτόκολλα αυτά, όλοι οι κόμβοι διαβιβάζουν τα μηνύματά τους σε έναν κόμβο (aggregator) που βρίσκεται σε υψηλότερο επίπεδο ιεραρχίας από τον εκάστοτε αποστολέα. Με τον τρόπο αυτό, τα δεδομένα συγκεντρώνονται σε ένα κόμβο, γεγονός που μειώνει την επιβάρυνση επικοινωνίας αλλά και τα ποσοστά κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου. Ως εκ τούτου, αυτά τα πρωτόκολλα αυξάνουν την διάρκεια ζωής του δικτύου. Το σύνολο των κόμβων που διαβιβάζει τα δεδομένα στον ίδιο aggregator αποτελεί μια συστάδα (cluster), ενώ ο κόμβος aggregator αναφέρεται και ως επικεφαλής της συστάδας. Οι επικεφαλείς κάθε συστάδας κόμβων διαθέτουν

περισσότερους πόρους από τον μέσο όρο των πόρων των κόμβων της συστάδας για λόγους μεγαλύτερης υπολογιστικής ικανότητας.

Η ιεραρχική δρομολόγηση είναι κυρίως δρομολόγηση δύο στρωμάτων, όπου το ένα στρώμα χρησιμοποιείται για την επιλογή του επικεφαλής της συστάδας και το άλλο καθαρά για τη δρομολόγηση.

Αντιπροσωπευτικό πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας είναι το LEACH (LowEnergyAdaptiveClusteringHierarchy), το οποίο είναι ένα από τα πιο διάσημα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων.

#### ***IV) Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει θέσης***

Αυτά τα πρωτόκολλα επιλέγουν το επόμενο άλμα προς τον προορισμό με βάση τη γνωστή θέση των γειτονικών κόμβων και τον προορισμό. Η θέση του προορισμού μπορεί να χαρακτηρίζει το κέντρο μιας περιοχής ή την ακριβή θέση ενός συγκεκριμένου κόμβου. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει θέσης μπορεί μεν να παρουσιάζουν μικρότερη επιβάρυνση της επικοινωνίας λόγω πλημμύρας δεδομένων, αλλά ο υπολογισμός των θέσεων των γειτονικών κόμβων μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον επικοινωνιακή επιβάρυνση.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει θέσης αποκέντρωσης (decentralizedlocation-basedroutingprotocols) παρουσιάζουν ένα κοινό πρόβλημα: υπάρχει περίπτωση όλοι οι γειτονικοί κόμβοι ενός ενδιαμέσου κόμβου να βρίσκονται σε μακρύτερη απόσταση από τον ίδιο τον προορισμό του κόμβου αυτού. Για να παρακάμψει το πρόβλημα αυτό, κάθε πρωτόκολλο χρησιμοποιεί διαφορετικές τεχνικές δρομολόγησης (Singh και συν., 2010).

Αντιπροσωπευτικό πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας είναι το GEAR (πρωτόκολλο γεωγραφικής και ενεργειακά ενήμερης δρομολόγησης).

#### ***V) Πρωτόκολλα δρομολόγησης βάσει μετάδοσης***

Η λειτουργία αυτών των πρωτοκόλλων είναι πολύ απλή (Singh και συν., 2010). Κάθε κόμβος του δικτύου αποφασίζει μεμονωμένα αν θα προωθήσει ένα μήνυμα ή όχι. Στην πρώτη περίπτωση το μήνυμα μεταδίδεται, ενώ στη δεύτερη, το μήνυμα απορρίπτεται.

Αντιπροσωπευτικό πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας είναι ο αλγόριθμος προώθησης ελάχιστου κόστους (MinimalCostForwardingAlgorithm - MCFA).

### **2.7 Τεχνολογίες ενδιάμεσου λογισμικού**

Ο όρος ενδιάμεσο λογισμικό (middleware) αναφέρεται στο στρώμα λογισμικού και στα εργαλεία που κρύβουν την υποκείμενη πολυπλοκότητα και την ετερογένεια του hardware υλικού ενός δικτύου.

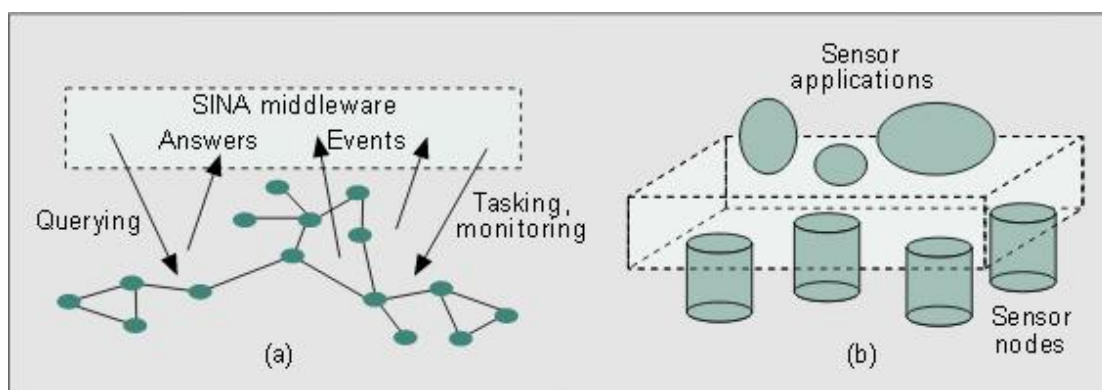
Κύρια ευθύνη του ενδιαμέσου λογισμικού είναι να καθιστά τη διαχείριση των πόρων του συστήματος ευκολότερη, γεγονός που διευκολύνει τη συνολική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος (Wang και συν. 2008). Όσον αφορά τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, κύριος σκοπός τους είναι να στηρίζουν την ανάπτυξη, τη συντήρηση, την εφαρμογή και την εκτέλεση των αισθητήριων εφαρμογών των δικτύων (Bhuyan και συν., 2014).

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται πολλά ερευνητικά προγράμματα σχεδιασμού και ανάπτυξης τεχνολογιών ενδιαμέσου λογισμικού των δικτύων WSN. Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας θα παρουσιαστούν διάφορες προσεγγίσεις μαζί με αντίστοιχα παραδείγματα τεχνολογιών ενδιαμέσου λογισμικού.

### 2.7.1 Προσέγγιση βάσης δεδομένων

Στην προσέγγιση αυτή, το σύνολο του δικτύου αισθητήρων θεωρείται ως μια βάση δεδομένων. Μια εφαρμογή μπορεί να πραγματοποιεί ερωτήματα στη βάση δεδομένων χρησιμοποιώντας δομημένη γλώσσα ερωτημάτων (SQL). Η προσέγγιση αυτή διευκολύνει τη δημιουργία ενός απλού και εύκολου συστήματος επικοινωνίας μεταξύ χρηστών και δικτύου, αλλά γενικά παρουσιάζει μια έλλειψη σχέσεων χώρου και χρόνου μεταξύ των συμβάντων (Radhika&Malarvizhi, 2012).

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ενδιαμέσου λογισμικού προσέγγισης βάσης δεδομένων αποτελεί το SINA (Sensor Information Networking Architecture and Applications). Το ενδιαμέσο λογισμικό SINA επιτρέπει στις αισθητήριες εφαρμογές να πραγματοποιούν ερωτήματα και να παίρνουν απαντήσεις προς και από το δίκτυο αλλά και να παρακολουθούν τις αλλαγές που πραγματοποιούνται σε αυτό (Εικ. 14).



**ΕΙΚΟΝΑ 14: Εφαρμογή ενδιαμέσου λογισμικού SINA σε δίκτυο WSN**

Τα βασικά χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν:

- **Ιεραρχική ομαδοποίηση (hierarchical clustering)** των κόμβων που βασίζεται στην εγγύτητα ή τα επίπεδα ενέργειάς τους, χαρακτηριστικό που ενισχύει την επεκτασιμότητα (scalability) του δικτύου



- **Ονοματοδοσία βάσει μεταβλητών (attributebasednaming)** των κόμβων που αντικαθιστά την πρότυπη ονοματοδοσία βάσει του αριθμού id και βασίζεται στα χαρακτηριστικά των δεδομένων των κόμβων. Αυτός ο μηχανισμός χρησιμοποιείται για κεντροποιημένη δρομολόγηση δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων
- **Ευαισθητοποίηση θέσης (locationawareness)** των κόμβων αισθητήρων που επιτυγχάνεται με χρήση τεχνικών GPS (GlobalPositioningSystem)

Κατά την πραγματοποίηση κάποιου ερωτήματος στο δίκτυο, υπάρχει πιθανότητα να προκύψουν συγκρούσεις λόγω του μεγάλου αριθμού απαντήσεων που προέρχονται από διαφορετικά μέρη του δικτύου. Όλες αυτές οι απαντήσεις διαδίδονται προς τον αιτούντα κόμβο εντός σύντομου χρονικού διαστήματος, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα κατάρρευσης των απαντήσεων (responseimplosionproblem). Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, το SINA εισάγει τις ακόλουθες τρεις τεχνικές:

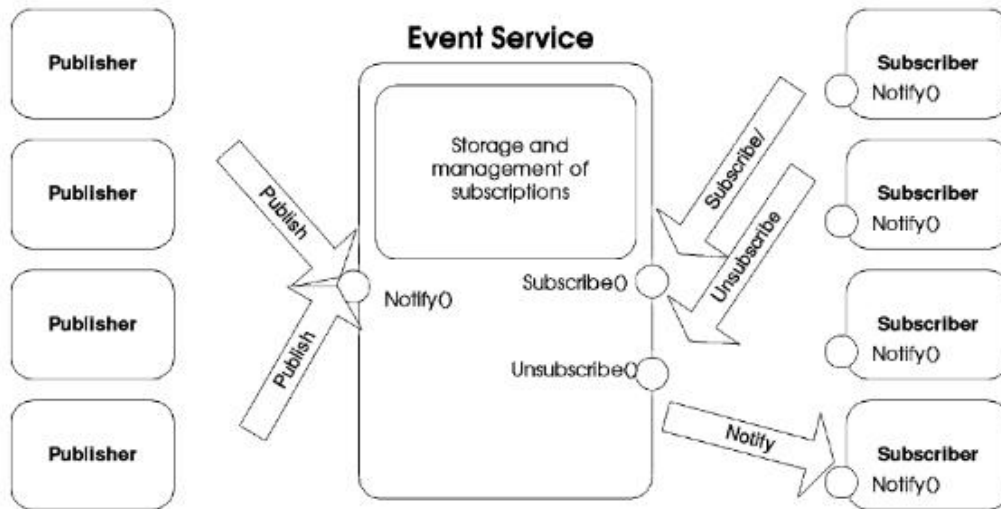
- **Δειγματοληψία (samplingoperation)**, λειτουργία στην οποία ένας κόμβος δεν μπορεί να απαντήσει σε ένα ερώτημα, όταν κάποιος γειτονικός του κόμβος ήδη αποκρίνεται στο ερώτημα αυτό
- **Αυτό-οργάνωση (self-orchestratedoperation)**, λειτουργία στην οποία κάποιοι κόμβοι διαφοροποιούν το χρόνο απόκρισης σε ένα ερώτημα, γεγονός που εισάγει κάποια επιπλέον καθυστέρηση αλλά βελτιώνει την απόδοση μειώνοντας τις πιθανότητες συγκρούσεων
- **Διασπορά υπολογισμών (diffusedcomputationoperation)**, λειτουργία η οποία χρησιμοποιεί συσσωμάτωση δεδομένων για να μειώσει την ποσότητα των δεδομένων που ανταλλάσσονται εντός του δικτύου

Σε σύγκριση με άλλα ενδιάμεσα λογισμικά προσέγγισης βάσης δεδομένων, όπως τα TinyDB και Cougar το SINA θεωρείται πιο ευέλικτο αν και η χρήση του μπορεί να δυσκολέψει τον ουσιαστικό προγραμματισμό των εργασιών.

### 2.7.2 Προσέγγιση βάσει συμβάντων

Τα ενδιάμεσα λογισμικά που προσανατολίζονται στα μηνύματα (message-oriented) και βασίζονται σε συμβάντα (event-based) παρέχουν ασύγχρονη επικοινωνία η οποία στηρίζεται στο παράδειγμα δημοσιεύσεων/συνδρομών (publish/subscriberparadigm). Στην προσέγγιση βάσει συμβάντων, η υποστήριξη απόκτησης δεδομένων επικεντρώνεται στον ορισμό, την καταχώριση/ακύρωση, την ανίχνευση και την παράδοση συμβάντων. Ως συμβάντα θεωρούνται ορισμένες αλλαγές των καταστάσεων των δεδομένων. Όταν εντοπιστεί ένα τέτοιο συμβάν, το ενδιάμεσο λογισμικό το κοινοποιεί στην εφαρμογή που επηρεάζεται περισσότερο από μια τέτοια αλλαγή κατάστασης των δεδομένων. Το publish/subscribe παράδειγμα είναι ο τυπικός τρόπος πραγματοποίησης ενδιάμεσων λογισμικών βάσει συμβάντων.

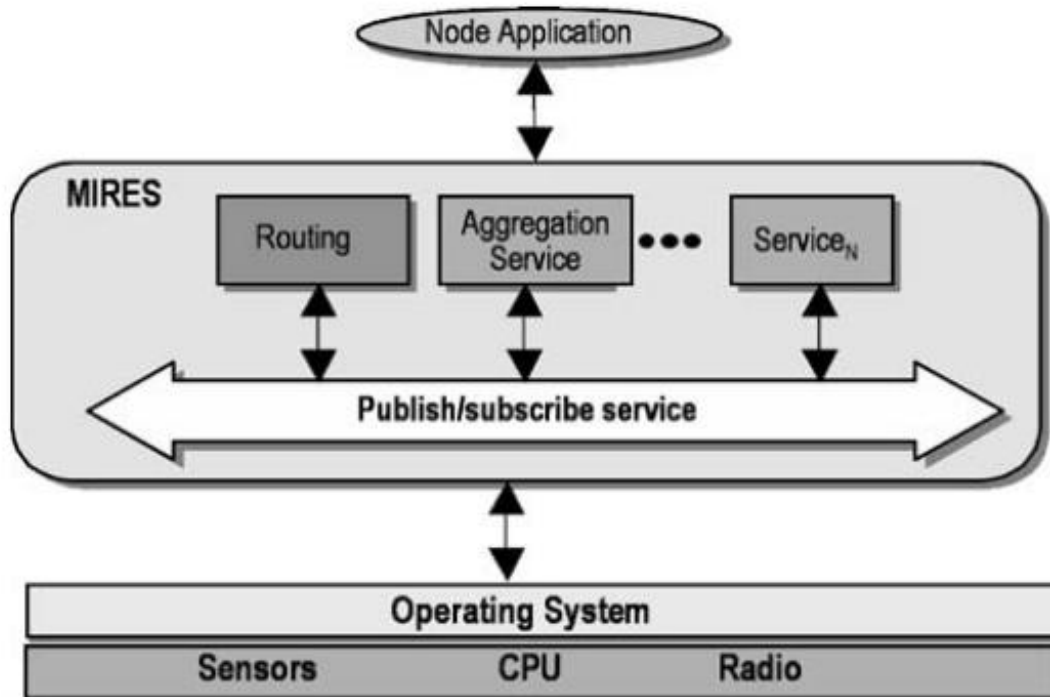
Οι βασικές οντότητες ενός publish/subscribe συστήματος είναι ο συνδρομητής συμβάντων (eventsubscriber) και ο εκδότης συμβάντων (eventpublisher) (Εικ. 15). Στην περίπτωση των δικτύων WSN, τον ρόλο του συνδρομητή και του εκδότη συμβάντων παίζουν ο σταθμός βάσης (sinknode) και οι κόμβοι αισθητήρων, αντίστοιχα.



**ΕΙΚΟΝΑ 15: Απλοποιημένο Publish/Subscribe Σύστημα**

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ενδιάμεσου λογισμικού publish/subscribe αποτελεί το Mires. Η αρχιτεκτονική δομή του ενδιάμεσου λογισμικού Mires περιλαμβάνει τρία βασικά μέρη (Εικ. 16):

- την υπηρεσία δημοσιεύσεων/συνδρομών (publish/subscribeservice)
- τις υπηρεσίες δρομολόγησης (routingservices), και
- τις υπηρεσίες συνάθροισης δεδομένων (dataaggregationservices)



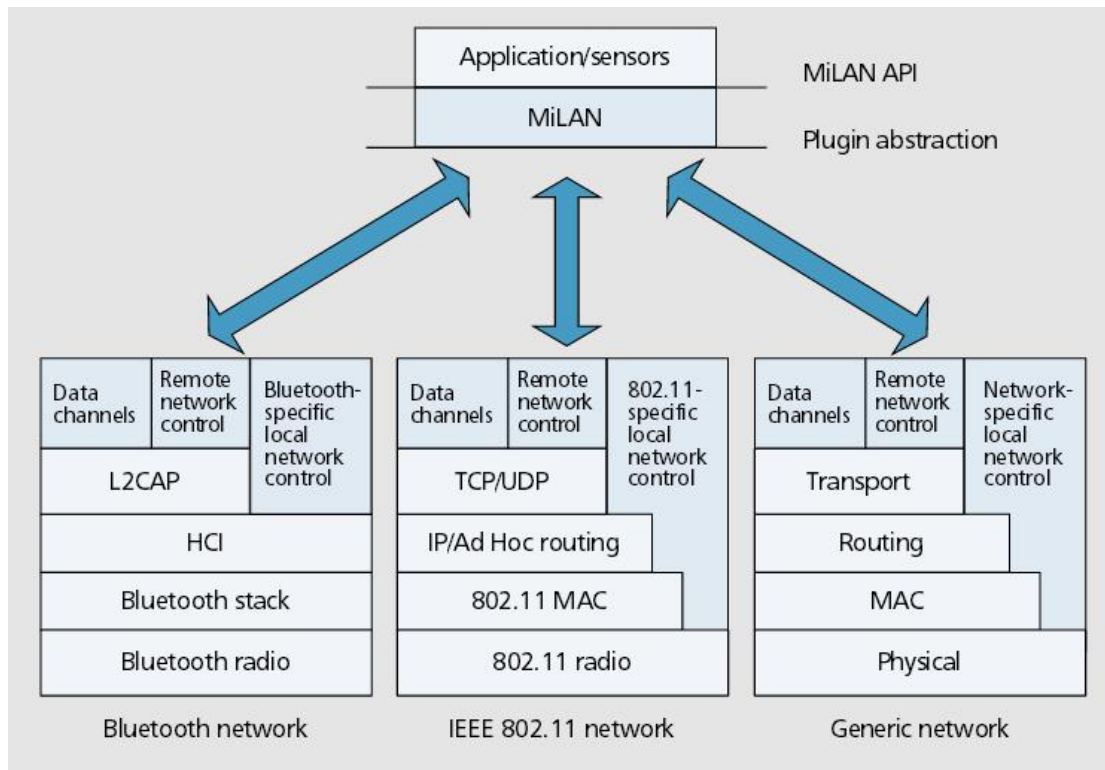
**ΕΙΚΟΝΑ 16: Αρχιτεκτονική δομή ενδιάμεσου λογισμικού Mires**

Η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων αποτελείται από τρεις φάσεις. Αρχικά, οι κόμβοι του δικτύου διαφημίζουν τα δεδομένα που διαθέτουν, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία κτλ. Στη συνέχεια, τα διαφημιζόμενα μηνύματα δρομολογούνται προς το σταθμό βάσης. Με τον τρόπο αυτό, οι χρήστες των εφαρμογών που συνδέονται με το σταθμό βάσης μπορούν να γίνουν συνδρομητές των συμβάντων που επιθυμούν να παρακολουθούν. Τέλος, τα μηνύματα που περιέχονται στο σταθμό βάσης και για τα οποία υπάρχει ενδιαφέρον παρακολούθησης από τους συνδρομητές, μεταδίδονται στους κόμβους αισθητήρων του δικτύου.

Έτσι αυτό που επιτυγχάνεται στο ενδιάμεσο λογισμικό Mires, είναι η αποστολή μόνο των μηνυμάτων για τα οποία υπάρχει ενδιαφέρον από τους χρήστες/συνδρομητές, γεγονός που μειώνει τον αριθμό των μεταδόσεων και, συνεπώς, την καταναλωμένη ενέργεια.

### 2.7.3 Προσέγγιση βάσει εφαρμογών

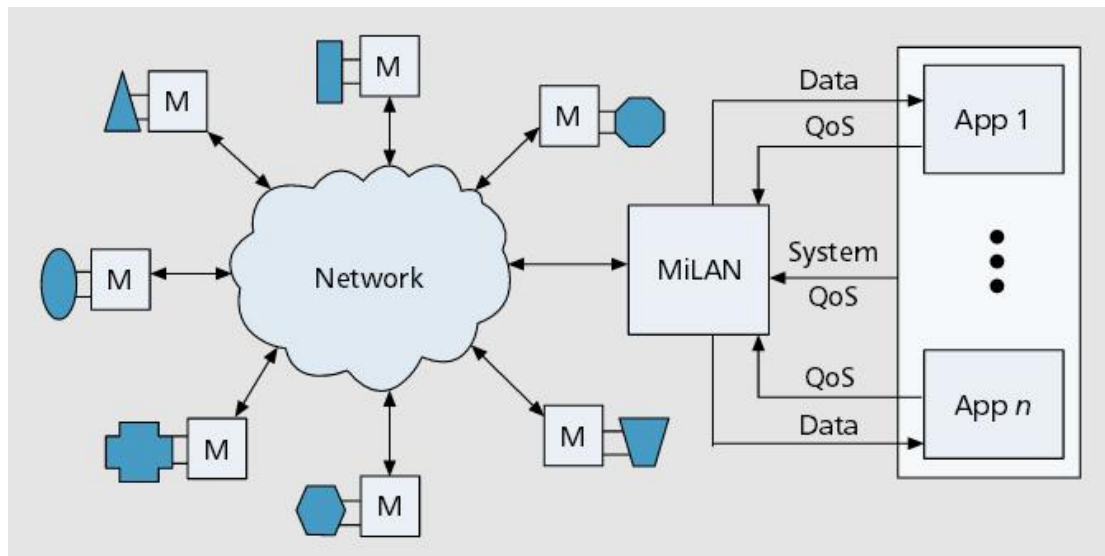
Σε αυτή την προσέγγιση, στις εφαρμογές δίνονται περισσότερα προνόμια, καθώς η αρχιτεκτονική των ενδιάμεσων λογισμικών φτάνει μέχρι τη στοίβα πρωτοκόλλου του δικτύου και συντονίζει το δίκτυο με βάση τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής (Radhika&Malarvizhi, 2012) (Εικ.17). Ως εκ τούτου, η εφαρμογή υπαγορεύει τη διαχείριση του δικτύου θέτοντας το ζήτημα ποιότητας της υπηρεσίας (QoS) ως θέμα υψηλής προτεραιότητας.



**ΕΙΚΟΝΑ 17: Αρχιτεκτονική του ενδιάμεσου λογισμικού MiLAN**

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ενδιάμεσου λογισμικού προσέγγισης βάσει εφαρμογών αποτελεί το MiLAN (MiddlewareLinkingApplicationandNetworks) (Heinzelman και συν., 2004). Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμογή καθορίζει τις απαιτήσεις της μέσω ειδικών γραφημάτων, παρακολουθεί τις συνθήκες του δικτύου και βελτιστοποιεί τις διαμορφώσεις των αισθητήρων του δικτύου. Το MiLAN λαμβάνει τις μεταβλητές των εφαρμογών και τις παραμέτρους της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσίας μέσα από αυτά τα γραφήματα και, στη συνέχεια, καθορίζει ποιος αισθητήρας ή σύνολο αισθητήρων μπορεί να παρέχει το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας για κάθε μεταβλητή (Εικ. 18). Το MiLAN μπορεί επίσης να καθορίσει το σύνολο των αισθητήρων που μπορεί να ικανοποιήσει όλες τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Λόγω των περιορισμών της καταναλωμένης ενέργειας και της δυναμικής τοπολογίας του δικτύου, το σύνολο που καθορίζει το ενδιάμεσο λογισμικό MiLAN περιορίζεται σε υποσύνολο των αισθητήρων. Στη συνέχεια, επιλέγεται ο καταλληλότερος αισθητήρας που μπορεί να παρέχει το απαιτούμενο ποιοτικό επίπεδο υπηρεσίας.

Παρά το γεγονός ότι το MiLAN υποστηρίζει QoS και επεκτασιμότητα, δεν παρέχει καμία υποστήριξη για την κινητικότητα των κόμβων. Επιπλέον, λόγω του δεσμού του με τη στοιβά δικτύου δεν υποστηρίζει ετερογένεια πλατφορμών.



**ΕΙΚΟΝΑ 18: Σύστημα με ενδιάμεσο λογισμικό MiLAN**

#### 2.7.4 Προσέγγιση τμηματικού προγραμματισμού

Σε αυτή την προσέγγιση, η εκάστοτε εφαρμογή χωρίζεται σε μικρές μονάδες προγράμματος (programmodules). Η μετάδοση αυτών των μονάδων καταναλώνει λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με τη μετάδοση ολόκληρης της εφαρμογής. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί κινητούς πράκτορες που εγχέονται στο δίκτυο αισθητήρων ή μετακινούνται από κόμβο σε κόμβο για τη συλλογή τοπικών δεδομένων.

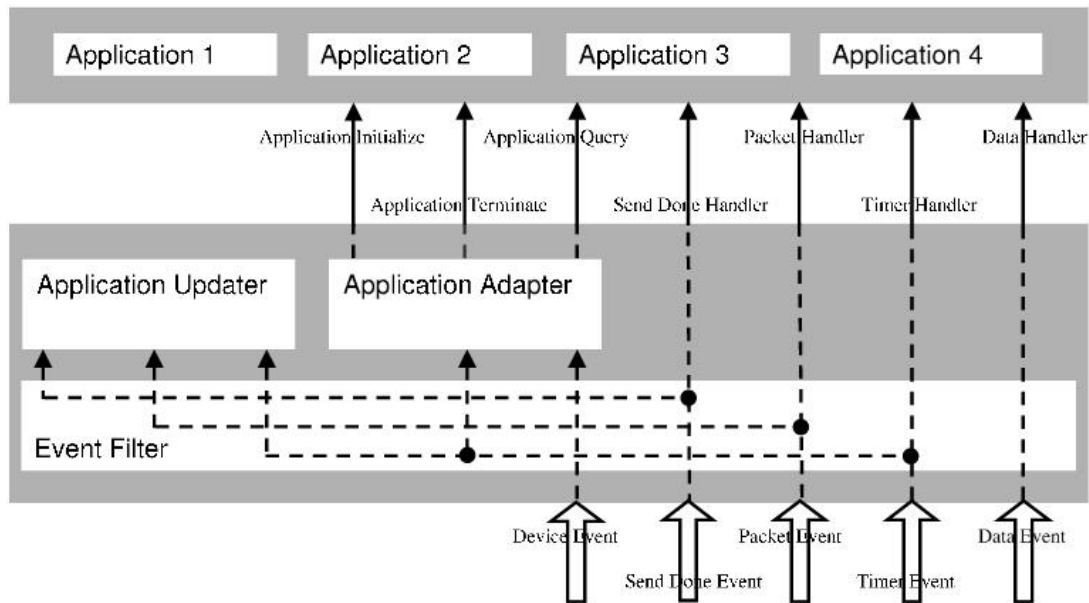
Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα τμηματικού προγραμματισμού αποτελεί το ενδιάμεσο λογισμικό Impala (Liu&Martonosi, 2003). Το Impala αποτελεί μια αρχιτεκτονική ενδιάμεσου λογισμικού που υποστηρίζει την προσαρμοστικότητα, την τμηματοποίηση και την επιδιόρθωση των εφαρμογών σε δίκτυα WSN. Υποστηρίζει πολλαπλές εφαρμογές με τη χρήση μοντέλου τμηματικού προγραμματισμού βάσει συμβάντων και παρέχει μια φιλική προς το χρήστη διεπαφή.

Το ενδιάμεσο λογισμικό Impala αποτελείται από δύο στρώματα (Εικ. 19). Το ανώτερο στρώμα περιέχει τις εφαρμογές και τα πρωτόκολλα. Αυτές οι εφαρμογές χρησιμοποιούν διάφορες στρατηγικές για τη συλλογή περιβαλλοντικών πληροφοριών και για την αποστολή τους στο σταθμό βάσης. Το κατώτερο στρώμα περιέχει τρεις διαφορετικούς πράκτορες ενδιάμεσου λογισμικού:

- **Φίλτρο συμβάντων (eventfilter)**: Ελέγχει διάφορες λειτουργίες που προκαλούν μια αλυσίδα επεξεργασίας. Αυτά τα συμβάντα αφορούν συμβάντα χρονομέτρου (timerevents), πακέτων, δεδομένων και συσκευής
- **Προσαρμογέα εφαρμογών (applicationadapter)**: Είναι εφοδιασμένος με μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων εφαρμογών

(ApplicationFiniteStateMachine -AFSM), η οποία χειρίζεται την προσαρμογή της εκάστοτε εφαρμογής στις διαφορετικές συνθήκες εκτέλεσής της, με σκοπό την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου

- **Ενημερωτή εφαρμογών (applicationupdater):** Είναι υπεύθυνος για τη λήψη και το διαμοιρασμό αποτελεσματικών ενημερώσεων λογισμικού μέσω των πομποδοκτών και την εγκατάστασή τους στους κόμβους.



### ΕΙΚΟΝΑ 19: Αρχιτεκτονική του ενδιάμεσου λογισμικού Impala

Παρά το γεγονός ότι το Impala καλύπτει ζητήματα όπως η προσαρμοστικότητα, οι ενημερώσεις λογισμικού, η ενεργειακή απόδοση και η ασφάλεια, δεν παρέχει υποστήριξη στα ζητήματα της ετερογένειας του hardware υλικού και της ποιότητας υπηρεσίας (Radhika&Malarvizhi, 2012).

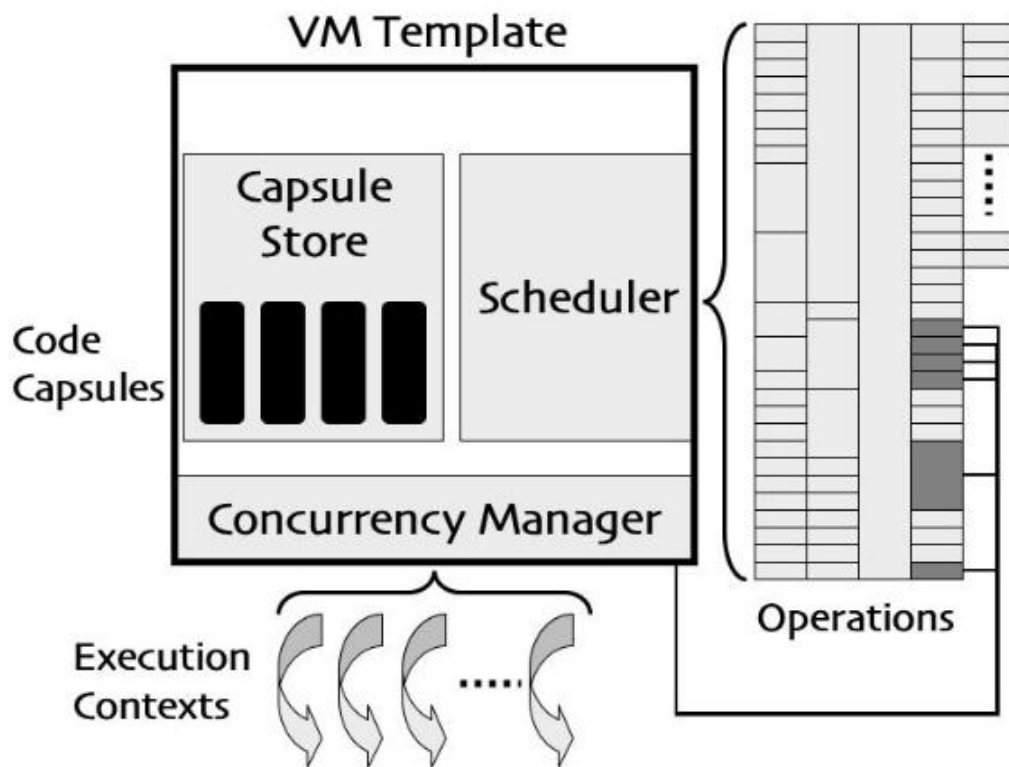
#### 2.7.5 Προσέγγιση εικονικών μηχανών

Στα δίκτυα WSN, η χρήση των εικονικών μηχανών (VirtualMachines - VM) γίνεται για διάφορους λόγους. Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτής είναι ότι επιτρέπει στον προγραμματιστή την εγγραφή εφαρμογών σε ξεχωριστές μικρές μονάδες. Το σύστημα εγχέει και διαδίδει τις μονάδες αυτές εντός του δικτύου χρησιμοποιώντας ειδικούς αλγόριθμους, καταφέροντας έτσι να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας και την χρήση πόρων (Levis&Culler, 2002).

Η προσέγγιση εικονικών μηχανών παρέχει εγγενώς μοντέλα ασφαλείας και συγχρονισμού που απλοποιούν το έργο του προγραμματισμού.

Αντιπροσωπευτικότερο παράδειγμα ενδιάμεσου λογισμικού βάσει εικονικών μηχανών για δίκτυα WSN αποτελεί το Mate (Levis&Culler, 2002). Χρησιμοποιεί την προσέγγιση εικονικών μηχανών και εκτελείται στο TinyOS, ένα λειτουργικό σύστημα που έχει σχεδιαστεί ειδικά για χρήση στα δίκτυα αισθητήρων. Το Mate διαθέτει μια διεπαφή χρήστη υψηλού επιπέδου, ενώ τα προγράμματά του μπορούν να χωριστούν σε 24 πακέτα εντολών, που ονομάζονται capsules, τα οποία μπορούν να χωρέσουν σε ένα μόνο πακέτο του TinyOS (Radhika&Malarvizhi, 2012).

Η αρχιτεκτονική της εικονικής μηχανής του Mate αποτελείται από στοίβες, ενώ το ενδιάμεσο λογισμικό έχει ένα συνοπτικό σύνολο εντολών που περιλαμβάνει τρεις τύπους εντολών οι οποίες εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες (Εικ. 20). Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι το Mate λειτουργεί ως διερμηνευτής byte κώδικα.



**ΕΙΚΟΝΑ 20: Αρχιτεκτονική της εικονικής μηχανής του Mate**

Πλεονέκτημα του αποτελεί η γρηγορότερη και ευκολότερη έγχυση των εφαρμογών σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το Mate είναι ενεργειακά αποδοτικό για γρήγορες εφαρμογές, αλλά σε αργές εφαρμογές συνεπάγεται υψηλή επιβάρυνση της CPU, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο μόνο για χρήση σε εφαρμογές της πρώτης περίπτωσης.

## Επίλογος

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων smartdust αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό μικροσκοπικών ηλεκτρομηχανικών συσκευών (MEMS) που μπορούν να ανιχνεύσουν φυσικά μεγέθη, όπως φως, θερμοκρασία, ή ακόμα και χημικές ουσίες. Εξετάζοντας τα δίκτυα smartdust από την άποψη των πιθανών εφαρμογών και των προκλήσεων της τεχνολογίας, τα παραδείγματα χρήσης είναι απλά απεριόριστα. Αυτή τη στιγμή τα δίκτυα αυτά έχουν πολλές πιθανές εφαρμογές, οι περισσότερες εκ των οποίων τα κατατάσσουν ως το αποκορύφωμα του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT).

Οι τρόποι επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων σε ένα δίκτυο smartdust αποτελούν μια από τις πιο σημαντικές πτυχές του. Όλα τα motes σε ένα τέτοιο δίκτυο θα πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά και με το σταθμό βάσης. Λαμβάνοντας πάντα υπόψη όλους τους περιορισμούς σχεδιασμού, λόγω των απαιτήσεων μεγέθους και ισχύος, τα δεδομένα που συλλέγονται από όλα τα motes ταυτόχρονα, θα πρέπει να αποστέλλονται στο σταθμό βάσης για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία. Ο βασικός αυτός σκοπός ενός δικτύου smartdust επιτυγχάνεται μέσω οπτικής επικοινωνίας ή επικοινωνίας ραδιοσυχνοτήτων.

Ουσιαστικά μέχρι στιγμής τα δίκτυα smartdust δεν χρησιμοποιούν κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας που να έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για να καλύπτει τις ανάγκες τους, αλλά χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 το οποίο έχει υιοθετηθεί ως επικοινωνιακό πρότυπο για όλες τις περιπτώσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και χαμηλού κόστους. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο είναι αρκετά ευέλικτο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, με την προϋπόθεση ότι πραγματοποιείται κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του.

Εκτός από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αποτελούν ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα στα δίκτυα WSN. Η ανάλυση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης απέδειξε ότι μπορούν να ταξινομηθούν σε πολλές κατηγορίες ανάλογα με μετρικές σύγκρισης αλλά και τις εφαρμογές των εκάστοτε δικτύων.

Οι διάφορες προκλήσεις των δικτύων WSN έχουν αναδείξει και την παρουσία διάφορων προσεγγίσεων σχεδιασμού ενδιάμεσου λογισμικού. Κύρια ευθύνη του ενδιάμεσου λογισμικού είναι να καθιστά τη διαχείριση των πόρων του συστήματος ευκολότερη, γεγονός που διευκολύνει τη συνολική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και συνεπάγεται τη δυνατότητα μικρότερης κατανάλωσης ενέργειας, ένα ζήτημα ιδιαίτερα σημαντικό για τα δίκτυα smartdust αλλά και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων γενικότερα.



Αυτό που προκύπτει ως γενικό συμπέρασμα είναι ότι πολλά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων δεν έχουν τυποποιηθεί ακόμα. Για το λόγο αυτό, οι πειραματισμοί πάνω στα δίκτυα αυτά συνεχίζονται ακόμα και σήμερα. Η διεξαγωγή όμως πειραμάτων και αναλύσεων, όπως θα φανεί καλύτερα στο επόμενο κεφάλαιο, είναι αρκετά χρονοβόρα και δαπανηρή, ενώ ο έλεγχος πραγματικών περιπτώσεων δικτύων μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες που είναι πιθανό να αλλάζουν κάθε φορά τα πειραματικά αποτελέσματα. Επομένως, η προσομοίωση των δικτύων WSN είναι σημαντική για την ανάπτυξή τους.

### 3 Εργαλεία προσομοίωσης δικτύων WSN

---

#### Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, τα δίκτυα WSN αντιμετωπίζουν διάφορα ζητήματα, τα οποία συνήθως δεν υφίστανται σε άλλα είδη δικτύων. Καθώς το κόστος, ο χρόνος και η πολυπλοκότητα που εμπλέκονται ως στοιχεία ανάπτυξης αλλά και υλοποίησης των δικτύων αυτών είναι πολύ μεγάλα, οι σχεδιαστές προτιμούν να παίρνουν πληροφορίες σε πρώτο χρόνο σχετικά με τις δυνατότητες του εκάστοτε δικτύου που αναπτύσσουν, πριν από την υλοποίηση του συστήματος (Nayyar & Singh, 2015).

Έτσι σήμερα, δεν προκαλεί εντύπωση το γεγονός της συνεχούς εμφάνισης νέων πρωτοκόλλων, τεχνικών και αλγορίθμων τα οποία χρησιμοποιούνται στην προσπάθεια αντιμετώπισης των προκλήσεων που αφορούν τα δίκτυα αισθητήρων ώστε να γίνουν περισσότερο αξιόπιστα και υλοποιήσιμα σε περισσότερες περιοχές του πραγματικού κόσμου. Η αξιολόγηση και η ανάλυση όλων αυτών των προτεινόμενων τεχνικών είναι εξαιρετικά αναγκαίες και επιθυμητές, διαδικασίες οι οποίες όμως είναι πιο περίπλοκες, χρονοβόρες και δαπανηρές, αν γίνουν μέσω πραγματικών πειραμάτων (Mishra & Thakkar, 2012).

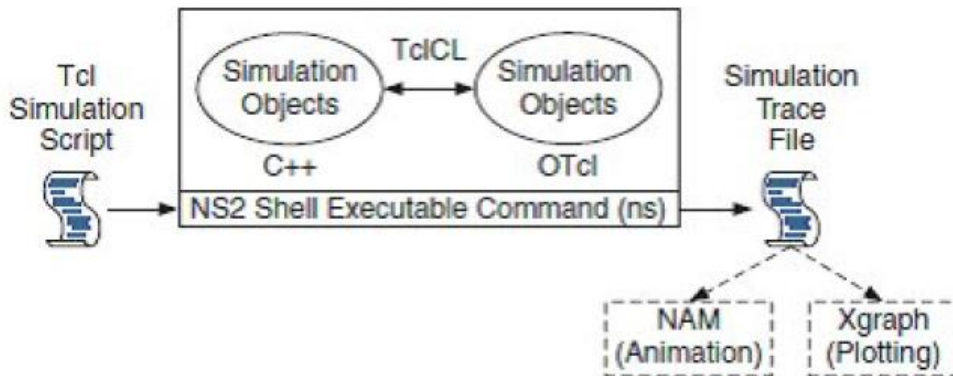
Λύση για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό αποτελεί η χρήση εργαλείων προσομοίωσης (simulation tools) τα οποία έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά στη δοκιμή και ανάλυση της απόδοσης των προτεινόμενων πρωτοκόλλων και αλγορίθμων. Με τη βοήθεια των εργαλείων προσομοίωσης, ένα οποιοδήποτε νέο πρωτόκολλο που αφορά δίκτυα αισθητήρων μπορεί εύκολα να αναπτυχθεί και να δοκιμαστεί. Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας προσέγγισης είναι πολλά, όπως (Nayyar & Singh, 2015): εύκολη εφαρμογή, χαμηλό κόστος, ανάλυση αποτελεσμάτων πραγματικού χρόνου και εύκολη κατανόηση των όποιων προβλημάτων εφαρμογής του δικτύου θα μπορούσαν να εμφανιστούν.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια επισκόπηση και σύγκριση των σημαντικότερων εργαλείων προσομοίωσης τα οποία είναι διαθέσιμα για την προηγμένη έρευνα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

#### 3.1 NS-2

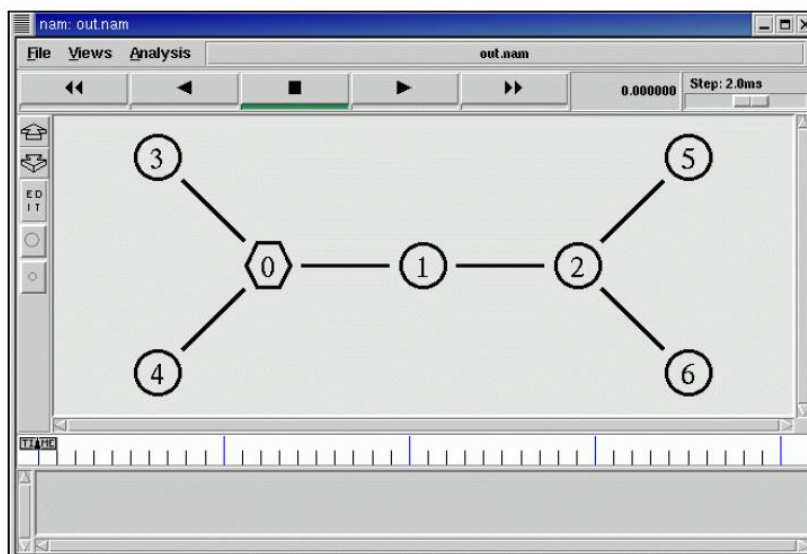
Το NS-2 αποτελεί ένα εργαλείο προσομοίωσης διακριτών συμβάντων (discrete event) που βασίζεται αποκλειστικά σε αντικειμενοστρεφή προγραμματισμό (Object Oriented programming) (Mishra & Thakkar, 2012). Για την υλοποίησή του χρησιμοποιεί δύο γλώσσες προγραμματισμού: την C++ και την OTcl (Object oriented Tool Command Language).

Η C++ χρησιμοποιείται κυρίως για την υλοποίηση διαφόρων πρωτοκόλλων και για την επέκταση των βιβλιοθηκών προσομοίωσης ενώ τα script της OTcl παρέχουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης του προσομοιωτή, ρύθμισης της τοπολογίας του δικτύου, δημιουργίας σεναρίων δικτύου και προβολής των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Η ύπαρξη της TclCL δίνει τη δυνατότητα της μίας προς μία αντιστοίχισης των κλάσεων της C++ και της OTcl (Εικ. 21).



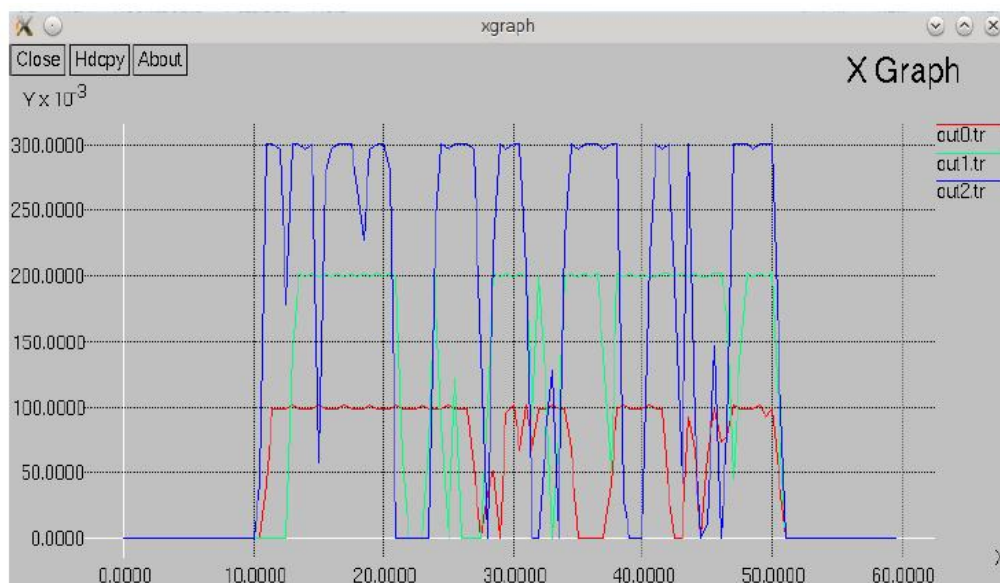
**ΕΙΚΟΝΑ 21: Βασική αρχιτεκτονική του εργαλείου προσομοίωσης NS-2**

Το NS-2 αποτελείται από 300.000 γραμμές κώδικα, είναι διαθέσιμο χωρίς κόστος και χρησιμοποιείται παγκοσμίως στον ακαδημαϊκό χώρο. Μπορεί να τρέξει σε διάφορα λειτουργικά συστήματα όπως το Linux, FreeBSD, MAC OS X, Solaris, ακόμη και στα Windows με τη χρήση λογισμικού τρίτων, το Cygwin. Επίσης, μπορεί να υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα πρωτοκόλλων σε όλα τα στρώματα της αρχιτεκτονικής δομής ενός δικτύου WSN, όπως για παράδειγμα τα πρωτόκολλα 802.11, 802.16, 802.15.4, κτλ.



**ΕΙΚΟΝΑ 22: Εργαλείο γραφικής απεικόνισης NAM του προσομοιωτή NS-2**

Το εργαλείο υποστηρίζει διπλή έξοδο η οποία μπορεί να είναι είτε γραφικής απεικόνισης είτε κειμένου (Εικ. 21). Για την έξοδο γραφικής απεικόνισης περιέχει ένα ενσωματωμένο εργαλείο, το NAM (NetworkAnimator), το οποίο δίνει τη δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης σε πραγματικό χρόνο της θέσης των κόμβων και της κίνησης των πακέτων προς αυτούς (Εικ. 22). Περιέχει επίσης το εργαλείο XGraphs που δείχνει τη γραφική ανάλυση των αποτελεσμάτων στο τέλος της προσομοίωσης (Εικ. 23).



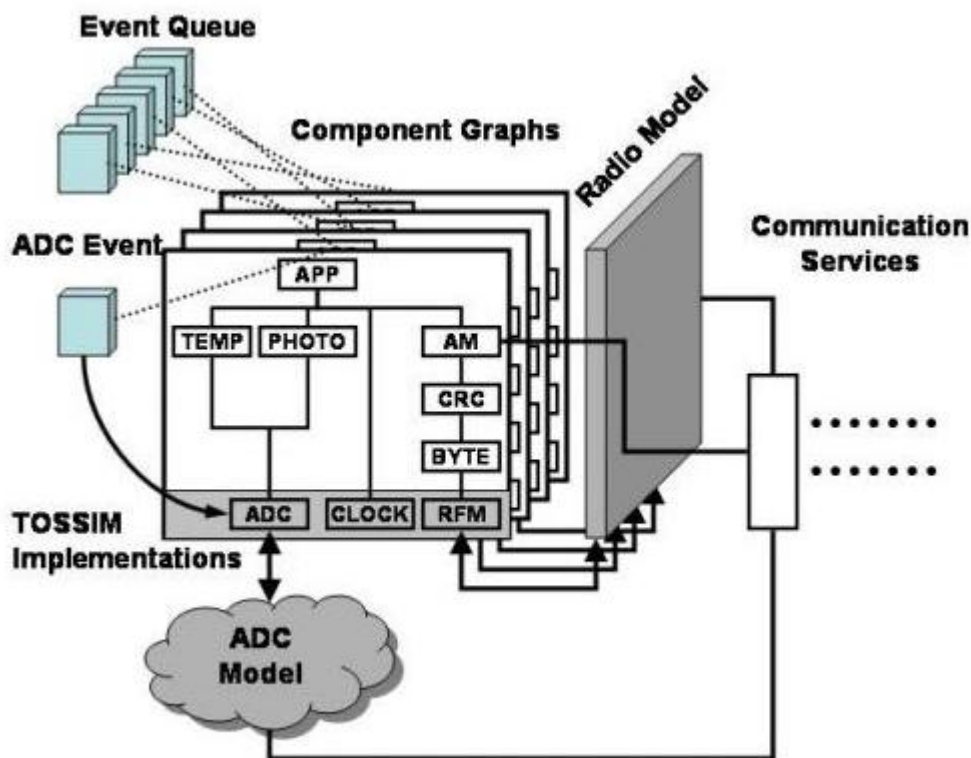
**ΕΙΚΟΝΑ 23: Εργαλείο απεικόνισης γραφικής ανάλυσης XGraphs των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή NS-2**

Ωστόσο, παρά τις προσπάθειες βελτίωσης του εργαλείου προσομοίωσης από πολλούς μελετητές παγκοσμίως, το NS-2 παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα (Nayyar & Singh, 2015):

- Παρουσιάζει μεγάλη καμπύλη εκμάθησης και απαιτεί προηγμένες δεξιότητες για την εκτέλεση ουσιαστικών και επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων
- Παρουσιάζει έλλειψη προσαρμοστικότητας με τις πραγματικές συνθήκες καθώς οι μορφές των πακέτων, τα ενεργειακά μοντέλα, τα πρωτόκολλα MAC ή ακόμα και τα μοντέλα των αισθητήρων διαφέρουν από εκείνα που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα πραγματικά δίκτυα αισθητήρων
- Στερείται επίσης ενός μοντέλου εφαρμογής το οποίο είναι απαραίτητο στα δίκτυα αισθητήρων λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του στρώματος εφαρμογών και του στρώματος πρωτοκόλλου του δικτύου

### 3.2 TOSSIM

Το TOSSIM είναι επίσης ένα εργαλείο προσομοίωσης διακριτών συμβάντων, ειδικά σχεδιασμένο όμως για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων TinyOS (Mishra & Thakkar, 2012). Το εργαλείο έχει τη δυνατότητα να αντιλαμβάνεται και να αναπαριστά τη συμπεριφορά και τις αλληλεπιδράσεις των κόμβων ενός δικτύου εμβαθύνοντας σε επίπεδο διακριτότητας bit και όχι σε επίπεδο πακέτου, όπως το NS-2. Έχει σχεδιαστεί ειδικά για εφαρμογές TinyOS που λειτουργούν με motes MICA και λειτουργεί αντικαθιστώντας τα μέρη ενός δικτύου με εφαρμογές προσομοίωσης. Διαθέτει επίσης μηχανισμούς επεκτάσιμων μοντέλων επικοινωνίας ραδιοσυχνοτήτων καθώς και μετατροπέα A/D, γεγονός που του δίνει τη δυνατότητα να αντικαθιστά στοιχεία επικοινωνίας επιπέδου πακέτου με στοιχεία προσομοίωσης για μια πιο ακριβή προσομοίωση της εκτέλεσης κώδικα (Εικ.24).

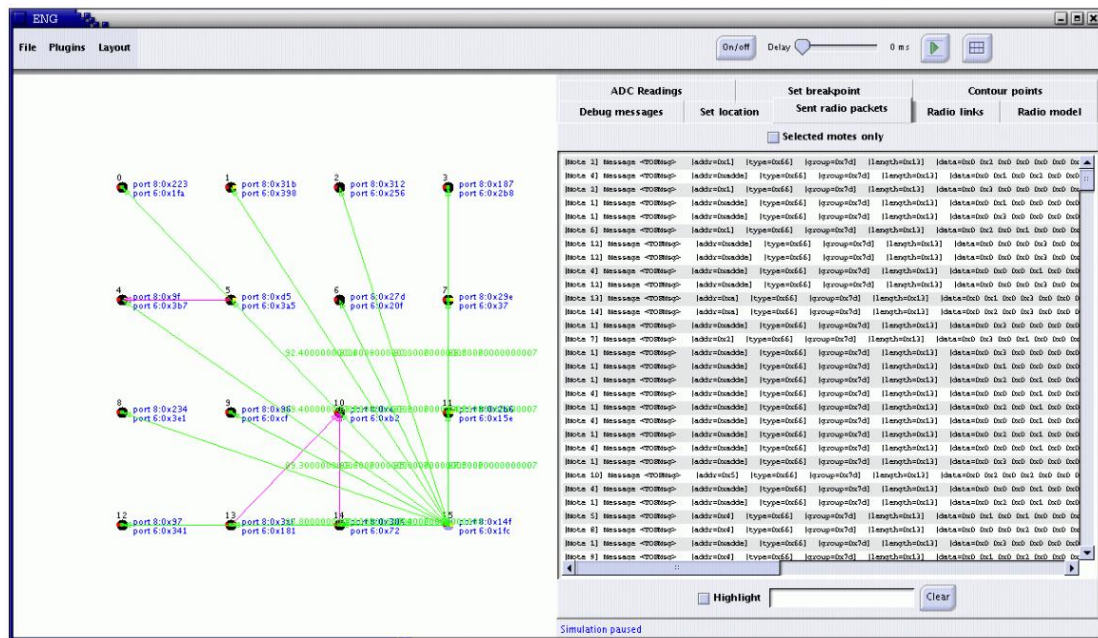


**ΕΙΚΟΝΑ 24: Αρχιτεκτονική του εργαλείου προσομοίωσης TOSSIM**

Όντας σχεδιασμένο ειδικά για το λειτουργικό σύστημα δικτύου αισθητήρων TinyOS, το TOSSIM παρέχει μηχανισμούς οι οποίοι επιτρέπουν στους προγραμματιστές τέτοιων δικτύων να επιλέγουν την ακρίβεια και την πολυπλοκότητα των μοντέλων ραδιοεπικοινωνίας. Επίσης, για την υποστήριξη των δικτύων TinyOS, διαθέτει ένα μοντέλο προγραμματισμού που βασίζεται στην έννοια της συνιστώσας (component-based programming model) που παρέχεται από τη γλώσσα προγραμματισμού NesC, μια διάλεκτο της C.

Το TOSSIM προσομοιώνει τη στοίβα δικτύου TinyOS σε επίπεδο bit, επιτρέποντας τον πειραματισμό με πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου επιπρόσθετα των εφαρμογών υψηλού επιπέδου. Η διαδικασία προσομοίωσης περιέχει διάφορους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης με το δίκτυο και παρακολούθησης της κυκλοφορίας των πακέτων ενώ παράλληλα δίνεται η δυνατότητα στατικής ή δυναμικής έγχυσης πακέτων στο δίκτυο. Η μετάδοση προσομοιώνεται σε επίπεδο bit.

Εργαλείο απεικόνισης του TOSSIM αποτελεί το TinyViz (Εικ. 25). Μέσω αυτού είναι δυνατόν να απεικονιστούν οι υπηρεσίες επικοινωνιών του TOSSIM. Βασίζεται στην Java και επιτρέπει την απεικόνιση, τον έλεγχο και την ανάλυση των προσομοιώσεων. Προσφέρει μια plugin διεπαφή επιτρέποντας στους σχεδιαστές να υλοποιήσουν τα δικά τους γραφικά περιβάλλοντα και κώδικα ώστε να μελετήσουν συγκεκριμένες εφαρμογές (Levis και συν., 2003).



**ΕΙΚΟΝΑ 25:** Σύνδεση του εργαλείου απεικόνισης TinyViz με τον προσομοιωτή TOSSIM για την εκτέλεση εφαρμογής παρακολούθησης αντικειμένου

Αν και το TOSSIM πληροί αρκετά από τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένα εργαλείο προσομοίωσης, εντούτοις παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες, όπως :

- Περιορίζεται στην προσομοίωση δικτύων με λειτουργικό σύστημα TinyOS και στις πλατφόρμες του hardware υλικού που αυτό εφαρμόζεται
- Κάθε κώδικας εκτελείται αμέσως χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος επεξεργασίας

- Δεν μοντελοποιεί την κατανάλωση της ενέργειας σε επίπεδο κόμβου, αν και η ύπαρξη του add-on PowerTOSSIMz διορθώνει κάπως αυτό το πρόβλημα
- Υπάρχει πιθανότητα ο κώδικας που θα εκτελεστεί στην προσομοίωση να μην μπορεί να εκτελεστεί σε πραγματικές συνθήκες λόγω ορισμένων παραδοχών που γίνονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης όπως είναι η αδυναμία αλλαγής σειράς ή ταυτόχρονης εκτέλεσης των διεργασιών προσομοίωσης
- Το εργαλείο βασίζεται στην παραδοχή ότι κάθε κόμβος του δικτύου εκτελεί ακριβώς τον ίδιο κώδικα, καθιστώντας το έτσι λιγότερο ευέλικτο

### 3.3 EMSTAR

Το εργαλείο προσομοίωσης EmStar παρέχει ένα ευέλικτο περιβάλλον για τη μετάβαση μεταξύ προσομοίωσης και ανάπτυξης σε δίκτυο κόμβων αισθητήρων iPAQ-class που λειτουργούν σε περιβάλλον Linux (Mishra & Thakkar, 2012). Στους χρήστες του παρέχονται τρεις επιλογές (Girod και συν., 2007):

- Η λειτουργία πολλών εικονικών κόμβων σε ένα μόνο τερματικό με προσομοιωμένο δίκτυο
- Η λειτουργία πολλών εικονικών κόμβων σε ένα μόνο τερματικό, όπου κάθε εικονικός κόμβος γεφυρώνεται με κάποιο κόμβο πραγματικού δικτύου
- Η λειτουργία ενός μόνο πραγματικού κόμβου σε ένα τερματικό με διασύνδεση δικτύου

Το EmStar προσφέρει μια σειρά από περιβάλλοντα εκτέλεσης, από καθαρή προσομοίωση μέχρι πραγματική ανάπτυξη δικτύου. Σχεδιάστηκε για να είναι συμβατό με δύο διαφορετικούς τύπους κόμβων: τους motes Mica2 (όπως ακριβώς και τα άλλα εργαλεία προσομοίωσης), αλλά παράλληλα μπορεί να προσφέρει υποστήριξη ανάπτυξης λογισμικού για microservers iPAQ based.

Μεγάλο του πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα επιλογής διασύνδεσης με πραγματικούς κόμβους δικτύων κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Το μοντέλο προσομοίωσης βασίζεται στην έννοια της συνιστώσας και χρησιμοποιεί ένα μοντέλο διακριτών συμβάντων. Η προσέγγιση λειτουργίας του είναι ένας συνδυασμός προσομοίωσης - εξομοίωσης, όπου το λογισμικό εκτελείται σε ένα τερματικό και διασυνδέεται με κάποιο πραγματικό αισθητήρα. Αυτό επιτρέπει τη χρήση των πραγματικών καναλιών επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Ο κώδικας του EmStar μπορεί να εκτελεστεί σε ένα διαφορετικό σύνολο από πλατφόρμες, καθεμιά από τις οποίες εκτελεί τον ίδιο κώδικα και χρησιμοποιεί τα ίδια αρχεία ρυθμίσεων, γεγονός που καθιστά εύκολη τη ρύθμιση των λειτουργιών του ανεξαρτήτως πλατφόρμας.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι συγκεντρώνει τα καλύτερα χαρακτηριστικά πολλών άλλων προσομοιωτών και εξομοιωτών, ενώ παράλληλα η χρήση του μοντέλου component-based του επιτρέπει μεγάλη επεκτασιμότητα.

Παρ' όλα αυτά, το EmStar δεν αποφεύγει τους περιορισμούς :

- Χρησιμοποιεί ένα πολύ απλό μέσο δικτυακού περιβάλλοντος, γεγονός που δημιουργεί αφαιρετικότητα του κώδικα που θα πρέπει να μεταφερθεί στο πραγματικό περιβάλλον του αισθητήρα
- Το εργαλείο λειτουργεί μόνο για τους τύπους των κόμβων για τους οποίους έχει σχεδιαστεί
- Εάν ένας χρήστης επιχειρήσει να μοντελοποιήσει ένα σύστημα μέσω του κύκλου ανάπτυξης, θα πρέπει είτε να διασφαλίσει ότι η διαμόρφωση του υλικού που χρησιμοποιείται ταιριάζει με το αρχείο ρυθμίσεων, ή να έχει κατά νου ότι θα υπάρξουν διαφορές και αποκλίσεις από τα τελικά συμπεράσματα
- Το εργαλείο δεν υποστηρίζει παράλληλες προσομοιώσεις και στερείται αλγόριθμους κατ' απαίτηση που είναι απαραίτητοι σε αρκετούς τύπους αισθητήρων

### 3.4 GLoMoSim

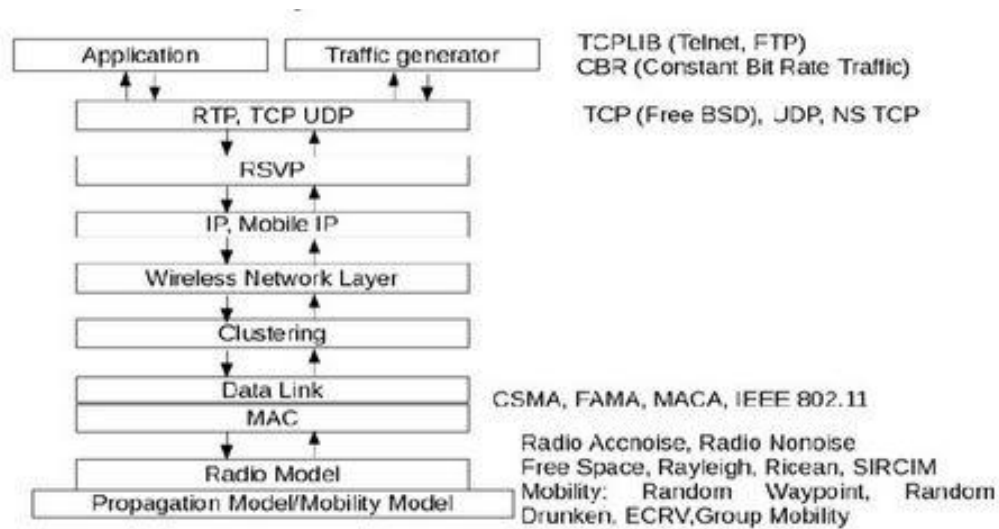
Το GloMoSim (Global Mobile Information System Simulator) είναι ένα κλιμακούμενο εργαλείο προσομοίωσης για μεγάλα ασύρματα και ενσύρματα δίκτυα επικοινωνίας που βασίζεται σε βιβλιοθήκες (Nayyar & Singh, 2015). Έχει σχεδιαστεί ως ένα σύνολο μονάδων βιβλιοθήκης (library modules) καθεμιά από τις οποίες προσομοιώνει ένα συγκεκριμένο ασύρματο πρωτόκολλο της στοίβας. Οι βιβλιοθήκες του είναι γραμμένες στη γλώσσα PARSEC (PARrallel Simulation Environment for Complex Systems), η οποία υιοθετεί μια προσέγγιση ακολουθιακής και παράλληλης προσομοίωσης ξεχωριστών συμβάντων.

Το εργαλείο περιλαμβάνει τεχνικές συσσωμάτωσης κόμβων οι οποίες μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την απόδοση της προσομοίωσης. Στο GloMoSim, κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει μια γεωγραφική περιοχή προσομοίωσης. Ως εκ τούτου, η φυσική θέση των κόμβων ενός δικτύου αντιστοιχεί σε οντότητες του εργαλείου ενώ τα συμβάντα αντιπροσωπεύονται με την εκπομπή χρονο-σημασμένων μηνυμάτων (time-stamped messages) μεταξύ των οντοτήτων αυτών.

Το GloMoSim χρησιμοποιεί την προσέγγιση στρωμάτων, μια ανάλυση της στοίβας δικτύου που διευκολύνει τη διενέργεια προσομοίωσης μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων (Εικ. 26).



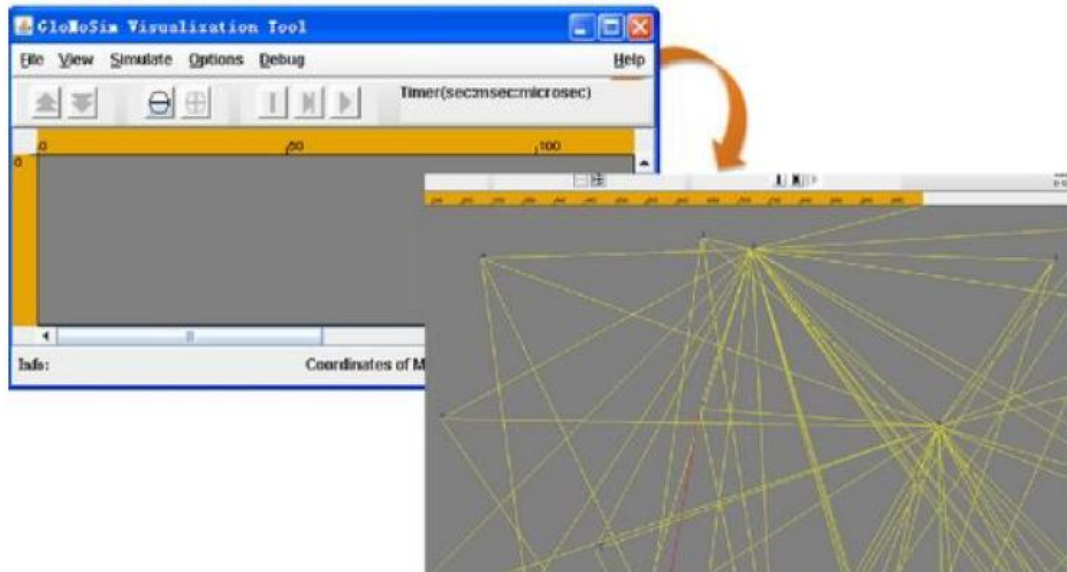
Ανάμεσα σε κάθε δύο γειτονικά στρώματα στη στοίβα πρωτοκόλλου ορίζεται ένα API που υποστηρίζει τη σύνθεση τους και καθορίζει την ανταλλαγή παραμέτρων και τις υπηρεσίες μεταξύ των στρωμάτων αυτών.



## ΕΙΚΟΝΑ 26: Αρχιτεκτονική του εργαλείου GloMoSim

Για κάθε στρώμα έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός πρωτοκόλλων, ενώ επίσης παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής νέων μοντέλων για τα στρώματα ή τα πρωτόκολλα αυτά. Στα μοντέλα αυτά περιλαμβάνονται πρωτόκολλα διάδοσης ραδιοσυχνοτήτων, πρωτόκολλα CSMA MAC (συμπεριλαμβανομένου του 802,11), πρωτόκολλα κινητής ασύρματης δρομολόγησης και υλοποιήσεις του UDP και TCP. Το GloMoSim είναι ιδανικό για προσομοίωση κινητών δικτύων IP.

Η δυνατότητα χρησιμοποίησης του GloMoSim σε παράλληλο περιβάλλον, το κάνει ξεχωριστό σε σύγκριση με τα περισσότερα εργαλεία προσομοίωσης δικτύων αισθητήρων. Όπως ακριβώς συμβαίνει με το NS-2, στο GloMoSim μπορούν να προγραμματιστούν νέα πρωτόκολλα και συστατικά και κατόπιν να προστεθούν στις βιβλιοθήκες του προκειμένου να του προσδώσουν επιπλέον λειτουργικότητα, γεγονός που το καθιστά επεκτάσιμο και ευέλικτο. Το GloMoSim μπορεί επίσης να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας μια ποικιλία πρωτοκόλλων συγχρονισμού ενώ μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε τερματικά κοινόχρηστη ή καταμεμημένης μνήμης. Στην εικόνα 27 παρουσιάζεται η διεπαφή γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (Graphical User Interface – GUI) του εργαλείου GloMoSim.



### ΕΙΚΟΝΑ 27: Διεπαφή GUI του εργαλείου GloMoSim

Δυστυχώς, το GloMoSim περιορίζεται στην προσομοίωση δικτύων IP λόγω των παραδοχών σχεδιασμού χαμηλού επιπέδου. Ως εκ τούτου, παρουσιάζει τα ίδια προβλήματα με το NS-2, δηλαδή οι μορφές των πακέτων, τα μοντέλα ενέργειας και τα πρωτόκολλα MAC δεν είναι αντιπροσωπευτικά εκείνων που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

### 3.5 J-SIM

Το J-Sim (JavaSim) θεωρείται εργαλείο προσομοίωσης γενικής χρήσης, σχεδιασμένο με βάση την αυτόνομη αρχιτεκτονική συνιστωσών (Autonomous Component Architecture - ACA) και το εκτεταμένο πλαίσιο εργασίας του Διαδικτύου (extensible internetworking framework - INET) (Nayyar & Singh, 2015). Για την υλοποίησή του χρησιμοποιεί δύο γλώσσες προγραμματισμού: την Java και την Tcl, μια έκδοση Java της Tcl. Ο συνδυασμός της Java με την αρχιτεκτονική ACA, καθιστούν το J-Sim ουδέτερο, επεκτάσιμο και επαναχρησιμοποιήσιμο περιβάλλον προσομοίωσης.

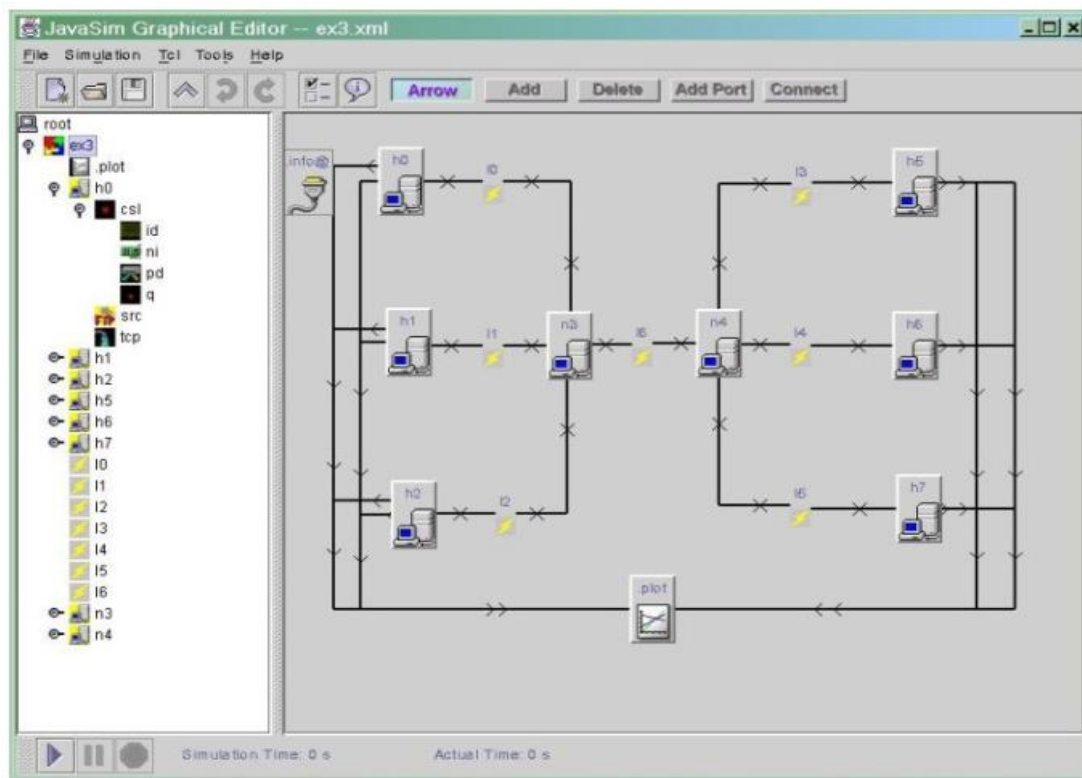
Σε αντίθεση με το NS-2, το J-Sim χρησιμοποιεί την έννοια των συνιστωσών (component based), αντικαθιστώντας την ιδέα ότι κάθε κόμβος θα πρέπει να αναπαριστάται ως αντικείμενο. Το εργαλείο παρέχει ένα πλαίσιο προσομοίωσης δικτύων WSN το οποίο βρίσκεται πάνω από τα ACA, INET και της στοιβάς του ασύρματου πρωτοκόλλου, προσφέροντας αντικειμενοστρεφή ορισμό για τις εξής συνιστώσες :

- τους κόμβους στόχους (target nodes) (οι οποίοι παράγουν ερεθίσματα), τους αισθητήριους κόμβους (sensor nodes) (που αντιδρούν στα ερεθίσματα) και τους aggregators ή τους σταθμούς

βάσης (sink nodes) (που αποτελούν τον τελικό προορισμό αναφοράς των ερεθισμάτων)

- αισθητήρια κανάλια και κανάλια ασύρματης επικοινωνίας
- φυσικά μέσα, μοντέλα κινητικότητας και μοντέλα ενέργειας (παραγωγής αλλά και κατανάλωσής της)

Καθεμιά από τις συνιστώσες αυτές αναλύεται σε διάφορα μέρη και διαμορφώνεται με διαφορετικό τρόπο εντός του προσομοιωτή. Η ανάλυση της κάθε συνιστώσας καθιστά εύκολη τη χρήση διαφορετικών πρωτοκόλλων σε διαφορετικές εκτελέσεις της προσομοίωσης.



**ΕΙΚΟΝΑ 28: Διεπαφή GUI του εργαλείου προσομοίωσης J-Sim**

Όσον αφορά τη προσομοίωση δικτύων, το J-Sim χρησιμοποιείται για την υλοποίηση τριών πρωτοκόλλων των δικτύων αυτών: εντοπισμού (localization), γεωγραφικής δρομολόγησης (geographicrouting) και κατευθυνόμενης διάχυσης (directeddiffusion). Σε σύγκριση με το NS-2, το J-Sim παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα που αφορούν το χρόνο εκτέλεσης, τη δέσμευση μνήμης (memoryallocation) και την επεκτασιμότητα. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης δικτύων μεγάλης κλίμακας με πάνω από 1000 κόμβους, κάτι που δεν είναι υλοποιήσιμο με το εργαλείο NS-2. Τέλος, το J-Sim διαθέτει ένα βελτιωμένο μοντέλο ενέργειας και την ικανότητα να προσομοιώνει τη χρήση των αισθητήρων για την ανίχνευση φυσικών φαινομένων. Στην εικόνα 28 παρουσιάζεται η διεπαφή GUI του εργαλείου προσομοίωσης J-Sim.

Ωστόσο, χωρίς να ξεφεύγει από τον κανόνα, το εργαλείο παρουσιάζει αρκετούς περιορισμούς, όπως :

- Αν και είναι πιο επεκτάσιμο από ότι πολλοί άλλοι προσομοιωτές, αντιμετωπίζει προβλήματα αναποτελεσματικότητας, κυρίως λόγω της Java, που σε γενικές γραμμές, είναι αναμφισβήτητα λιγότερο αποτελεσματική από ότι πολλές άλλες γλώσσες προγραμματισμού
- Το εργαλείο παρουσιάζει περιττή επιβάρυνση στο μοντέλο ενδοεπικοινωνίας
- Το μόνο πρωτόκολλο MAC που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το 802.11, ένα πρόβλημα που φαίνεται να εμφανίζεται στα περισσότερα εργαλεία προσομοίωσης δικτύων WSN που δεν είναι σχεδιασμένοι αποκλειστικά για το σκοπό αυτό

### 3.6 COOJA

Το COOJA (COntiki Os JAva) είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης σχεδιασμένο ειδικά για το λειτουργικό σύστημα των κόμβων αισθητήρων Contiki (Sundani και συν., 2011). Επιτρέπει την ταυτόχρονη cross-level προσομοίωση σε επίπεδο εφαρμογής, λειτουργικού συστήματος και συνόλου εντολών γλώσσας μηχανής. Το εργαλείο έχει επίσης τη δυνατότητα να συνδυάζει σε μία μόνο εκτέλεση, προσομοίωση χαμηλού επιπέδου του hardware υλικού των κόμβων αισθητήρων με προσομοίωση συμπεριφοράς υψηλού επιπέδου.

Το COOJA είναι μια εφαρμογή Java και όλη η αλληλεπίδραση με τον μεταγλωττισμένο κώδικα Contiki γίνεται μέσω της διεπαφής JNI (Java Native Interface). Είναι ευέλικτο και επεκτάσιμο, καθώς όλα τα επίπεδα του συστήματος μπορούν να αλλάξουν ή να αντικατασταθούν: πλατφόρμες κόμβων αισθητήρων, λογισμικό λειτουργικού συστήματος, πομποδέκτες και μοντέλα διάδοσης RF επικοινωνιών. Το εργαλείο έχει δυνατότητα υποστήριξης κάθε είδους επικοινωνίας των δικτύων WSN, αφού δέχεται και κάνει χρήση διαφόρων μέσων ραδιοσυχνότητας (Österlind, 2006).

Βασικό χαρακτηριστικό του COOJA είναι η προσομοίωση επιπέδου κώδικα για δίκτυα που αποτελούνται από κόμβους που χρησιμοποιούν το Contiki ως λειτουργικό σύστημα. Κόμβοι με διαφορετικό hardware υλικό και software λογισμικό μπορούν να συνυπάρχουν μέσα στην ίδια προσομοίωση. Η προσομοίωση επιπέδου κώδικα επιτυγχάνεται με μεταγλώττιση του πυρήνα Contiki, των διεργασιών του χρήστη και ειδικών προγραμμάτων οδήγησης σε αντικειμενικό κώδικα που παράγεται στην πλατφόρμα του προσομοιωτή και στη συνέχεια εκτελείται από το COOJA.

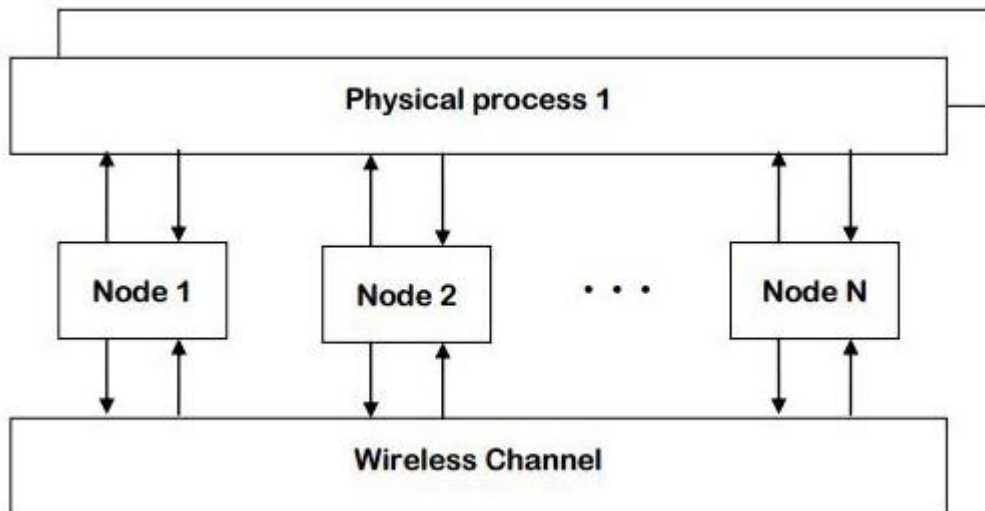
Παρ' όλα αυτά, το εργαλείο προσομοίωσης COOJA παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς, όπως :

- Λόγω της επεκτασιμότητάς του, παρουσιάζει σχετικά χαμηλή απόδοση
- Η ταυτόχρονη προσομοίωση πολλών κόμβων, ο καθένας με αρκετές διασυνδέσεις, απαιτεί πολλούς υπολογισμούς, ειδικά στην περίπτωση εκκίνησης των plugins και καταχώρησής τους ως παρατηρητές των διεπαφών αυτών
- Υποστηρίζει ένα περιορισμένο αριθμό ταυτόχρονης προσομοίωσης κόμβων και θα πρέπει να ξαναρχίζει την λειτουργία του κάθε φορά που ο αριθμός των κόμβων υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο
- Δεν διαθέτει διεπαφή GUI δοκιμών, καθιστώντας έτσι δύσκολη τη διενέργεια εκτεταμένων και εξαρτώμενων από το χρόνο προσομοιώσεων

### 3.7 Castalia

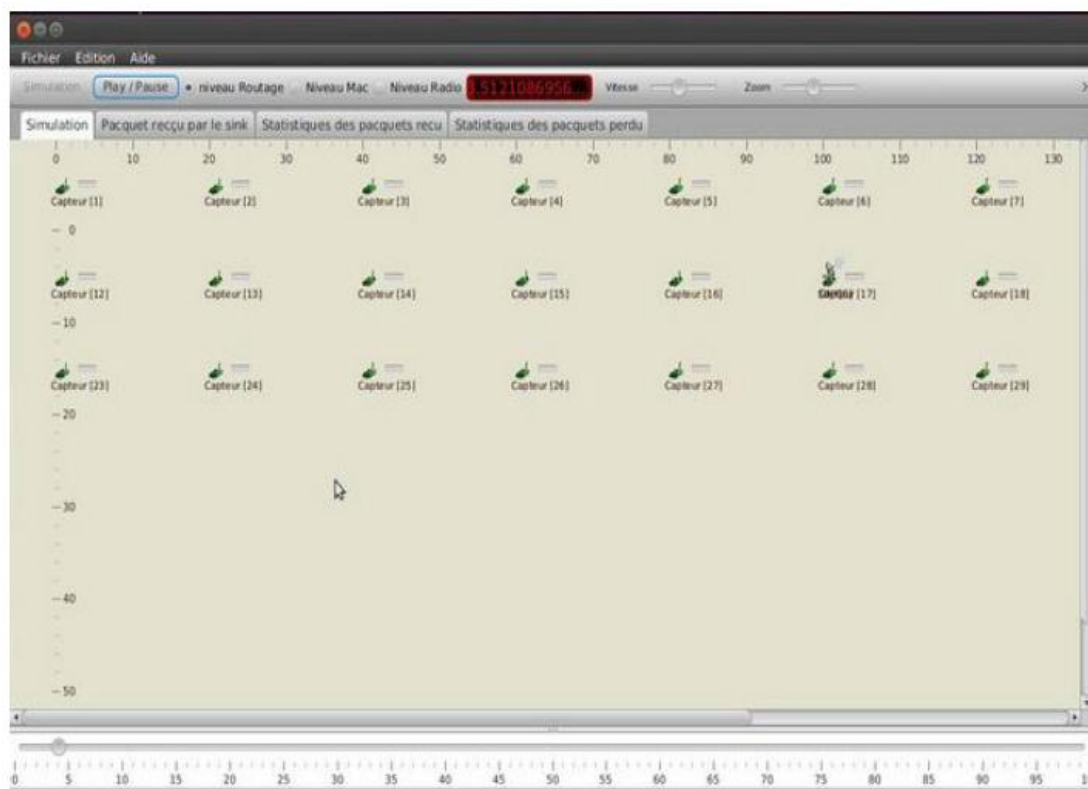
Το Castalia είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης επιπέδου εφαρμογών αποκλειστικά για δίκτυα WSN, σχεδιασμένο βάσει ενός άλλου δημοφιούς προσομοιωτή, του OMNeT ++ (Nayyar & Singh, 2015). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση χαρακτηριστικών πολλών διαφορετικών πλατφορμών για συγκεκριμένες εφαρμογές, δεδομένου ότι είναι εξαιρετικά παραμετρικό και μπορεί να προσομοιώσει ένα ευρύ φάσμα πλατφορμών. Στο Castalia, οι κόμβοι αισθητήρων υλοποιούνται ως σύνθετες μονάδες (compound modules) ανεπτυγμένες σε γλώσσα C++, που αποτελούνται από υπομονάδες που αντιπροσωπεύουν, για παράδειγμα, τα στρώματα της στοίβας δικτύου, τις εφαρμογές και τους αισθητήρες. Οι μονάδες των κόμβων συνδέονται στις μονάδες ασύρματου καναλιού και φυσικής διαδικασίας (Εικ. 29) (Boulis, 2011).

Πρόκειται για ένα εργαλείο προσομοίωσης που διαθέτει πραγματικά ασύρματα κανάλια και μοντέλα επικοινωνίας RF και παρέχει μια προσομοίωση που βασίζεται σε στοιχεία μετρήσεων. Δεδομένου ότι βασίζεται στην πλατφόρμα του OMNeT ++, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους ερευνητές και προγραμματιστές που θέλουν να δοκιμάσουν κατανεμημένους αλγόριθμους ή και πρωτόκολλα σε ασύρματα κανάλια και μοντέλα επικοινωνίας RF, εξετάζοντας την πραγματική συμπεριφορά των κόμβων ιδιαίτερα σχετικά με την πρόσβαση τους στο επίπεδο των ραδιοσυχνοτήτων.



**ΕΙΚΟΝΑ 29: Μονάδες και οι συνδέσεις του στο εργαλείο προσομοίωσης Castalia**

Στην εικόνα 30 παρουσιάζεται η διεπαφή GUI του εργαλείου προσομοίωσης Castalia.



**ΕΙΚΟΝΑ 30: Διεπαφή GUI του εργαλείου προσομοίωσης Castalia**

Τα βασικά χαρακτηριστικά του εργαλείου περιλαμβάνουν (Boulis, 2011):

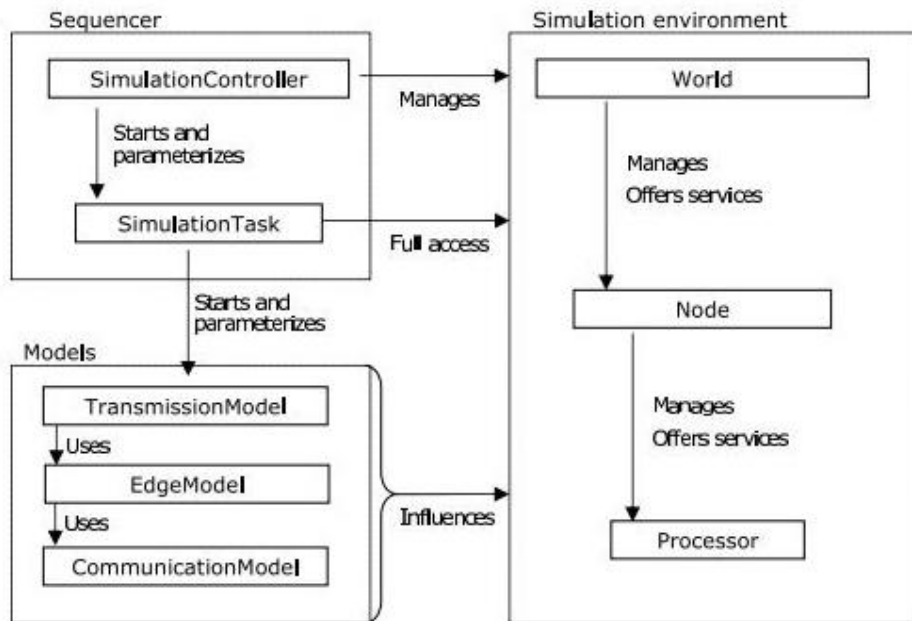
- Μοντελοποίηση φυσικής διαδικασίας, καθώς διαθέτει πολλές διακριτές μονάδες που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές αισθητήριες συσκευές (π.χ. αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, φωτεινής έντασης και επιτάχυνσης) και ένα ευέλικτο παραμετρικό μοντέλο φυσικής διαδικασίας
- Ανίχνευση πόλωσης (bias), θορύβου και ολίσθησης (drift) του ρολογιού των κόμβων
- Υλοποίηση πολλών πρωτοκόλλων MAC και δρομολόγησης, καθώς διαθέτει ένα πρωτόκολλο MAC που μπορεί να ρυθμιστεί σε μεγάλο βαθμό

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το Castalia δεν εξαρτάται από την πλατφόρμα των αισθητήρων που χρησιμοποιείται. Βασικός του στόχος είναι η παροχή ενός γενικά αξιόπιστου και ρεαλιστικού πλαισίου για μια πρώτη επικύρωση ενός αλγορίθμου πριν την εφαρμογή του σε μια συγκεκριμένη πλατφόρμα αισθητήρων. Αν και το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματά του έναντι άλλων εργαλείων προσομοίωσης, εντούτοις περιορίζει τη δοκιμή κώδικα σχεδιασμένου για συγκεκριμένη πλατφόρμα κόμβου αισθητήρων.

### 3.8 Shawn

Το Shawn είναι ένα προσαρμόσιμο εργαλείο προσομοίωσης δικτύων αισθητήρων, ανοιχτού κώδικα (open source), γραμμένο σε γλώσσα C++ και έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει προσομοίωση δικτύων μεγάλης κλίμακας (Nayyar & Singh, 2015). Αντί για προσομοίωση ενός φαινομένου, το εργαλείο έχει σχεδιαστεί για προσομοίωση της επίδρασής του. Θεωρείται ότι παρέχει το υψηλότερο δυνατό επίπεδο αφαιρετικότητας και ότι μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερα δίκτυα σε σύγκριση με άλλα εργαλεία προσομοίωσης, όπως τα NS-2, SENSE, OmNeT ++, GloMoSim και TOSSIM.

Το περιβάλλον προσομοίωσης είναι καθαρά εικονικό και περιλαμβάνει τα αντικείμενα της προσομοίωσης (Εικ. 31). Οι προσομοιωμένοι κόμβοι βρίσκονται στο στιγμιότυπο World, ενώ οι ίδιοι οι κόμβοι χρησιμοποιούνται ως περιεχόμενο της κλάσης Processor.

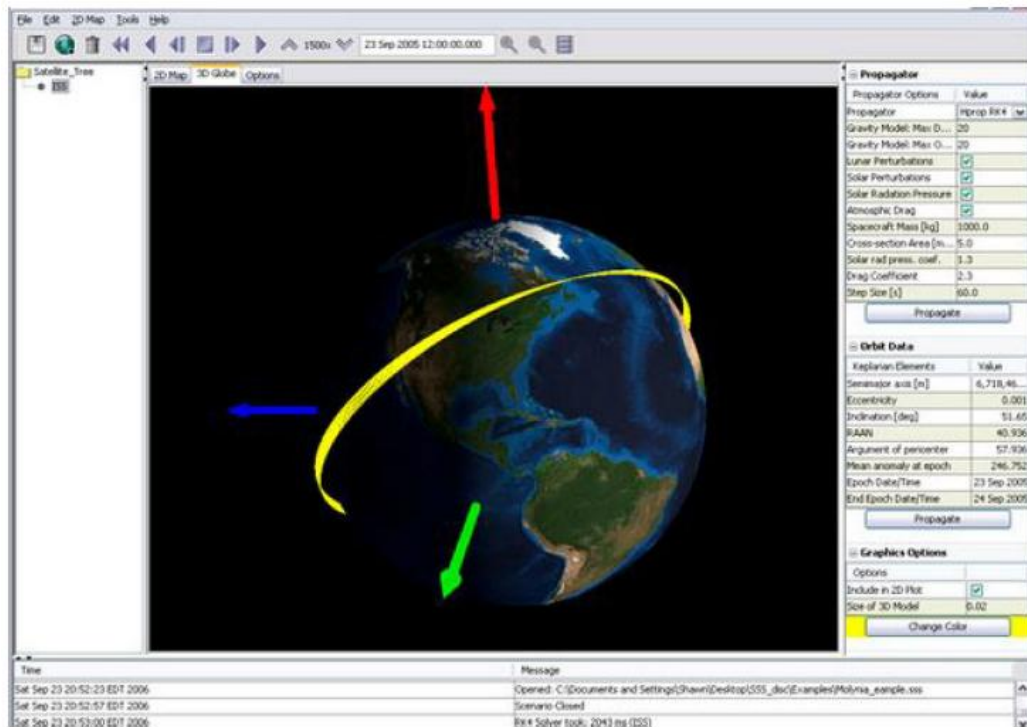


**ΕΙΚΟΝΑ 31:** Σύνοψη της αρχιτεκτονικής των βασικών στοιχείων του Shawn

Το Shawn παρουσιάζει παραμονή / επιμονή (persistence) και απομόνωση (decoupling) του περιβάλλοντος προσομοίωσης με την εισαγωγή της έννοιας των ετικετών (Tags). Οι ετικέτες αυτές αποδίδουν μη παραμένοντα (persistent) και μεταβαλλόμενα (volatile) δεδομένα στα αντικείμενα των κλάσεων Node και World. Επίσης απομονώνουν τις μεταβλητές κατάστασης από τις μεταβλητές μελών, επιτρέποντας έτσι την εύκολη εφαρμογή της παραμονής / επιμονής. Ένα άλλο πλεονέκτημα των ετικετών είναι ότι μέρη ενός εν δυνάμει πολύπλοκου πρωτοκόλλου μπορούν να αντικατασταθούν χωρίς τροποποίηση του κώδικα.

Στην εικόνα 32 παρουσιάζεται η διεπαφή GUI δορυφορικής προσομοίωσης του εργαλείου Shawn.





**ΕΙΚΟΝΑ 32: Διεπαφή GUI δορυφορικής προσομοίωσης του εργαλείου Shawn**

Οι λίγοι περιορισμοί του εργαλείου περιλαμβάνουν και τη μη σωστή θεώρηση λεπτομερειών προσομοίωσης περιπτώσεων, όπως οι ιδιότητες μετάδοσης των ραδιοσυχνοτήτων ή θέματα που αφορούν τα χαμηλά στρώματα.

### 3.9 SENSE

Το SENSE είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης δικτύων αισθητήρων που μοιάζει με το J-Sim στο ότι χρησιμοποιεί την έννοια των συνιστωσών, αλλά είναι γραμμένο σε γλώσσα C++ προκειμένου να αποφευχθεί η αναποτελεσματικότητα της Java που χρησιμοποιεί το J-Sim. Το SENSE εκτελείται πάνω από το COST, έναν προσομοιωτή διακριτών συμβάντων που επίσης χρησιμοποιεί την έννοια των συνιστωσών και είναι γραμμένο σε C++, μια επέκταση της C++.

Το SENSE υποστηρίζει ένα ενεργειακό μοντέλο που είναι επαρκές για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι η ισορροπία που παρουσιάζει ανάμεσα στη μεθοδολογία μοντελοποίησης και την αποτελεσματικότητα προσομοίωσης. Είναι ένα εργαλείο φιλικό προς το χρήστη και παράλληλα πολύ γρήγορο. Σε αντίθεση με τους αντικειμενοστρεφείς (objectoriented) προσομοιωτές δικτύου, το SENSE βασίζεται σε μια καινοτόμο μεθοδολογία συνιστωσοστρεφή (componentoriented) προσομοίωση που προωθεί σε μέγιστο βαθμό την επεκτασιμότητα (extensibility) και την επαναχρησιμοποίηση (reusability).

Την ίδια στιγμή, η απόδοση της προσομοίωσης και το ζήτημα της κλιμάκωσης (scalability) δεν παραβλέπονται (Nayyar & Singh, 2015).

Λόγω του γεγονότος ότι το εργαλείο βρίσκεται ακόμα σε φάση ενεργού ανάπτυξης και παρά το ότι ο πυρήνας του σταθεροποιείται σταδιακά, εξακολουθεί να στερείται μιας ολοκληρωμένης σειράς μοντέλων και μιας μεγάλης ποικιλίας προτύπων διαμόρφωσης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Εκτός αυτού, ένα εργαλείο οπτικοποίησης είναι επιθυμητό για την γρήγορη ανεύρεση κάποιου πιθανού προβλήματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Χωρίς ένα τέτοιο εργαλείο, η έξοδος της προσομοίωσης είναι δύσκολο να ερμηνευθεί. Η οπτικοποίηση μπορεί επίσης να διευκολύνει τη φάση διαμόρφωσης, επιτρέποντας τη γραφική δημιουργία δικτύων.

### 3.10 Prowler

Το Prowler (Probabilistic Wireless Sensor Network Simulator) και η επέκτασή του, το JProwler, αποτελούν πιθανολογικούς προσομοιωτές ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Το Prowler υποστηρίζει μια δομή βασισμένη σε γεγονότα (event-based) και μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να λειτουργεί:

- **σε προσδιοριστικό τρόπο λειτουργίας (deterministic mode)**, για την παραγωγή αναπαραγόμενων αποτελεσμάτων κατά τον έλεγχο της εφαρμογής
- **σε πιθανολογικό τρόπο λειτουργίας (probabilistic mode)**, για την προσομοίωση της μη προσδιοριστικής φύσης του καναλιού επικοινωνίας και του πρωτοκόλλου επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου των motes

Το Prowler είναι γραμμένο σε Matlab, ενώ το JProwler είναι γραμμένο σε Java. Ανεξαρτήτως γλώσσας προγραμματισμού, το εργαλείο μπορεί να ενσωματώσει αυθαίρετο αριθμό motes, σε αυθαίρετη (ενδεχομένως δυναμική) τοπολογία και έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης.

Αν και το εργαλείο θα μπορούσε να τροποποιηθεί για να παρέχει ένα γενικό περιβάλλον προσομοίωσης, η σημερινή πλατφόρμα του είναι η Berkeley MICA Mote που τρέχει TinyOS, ένα mote το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της έρευνας για την ανάπτυξη πρωτόκολλων δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Εικ. 33).

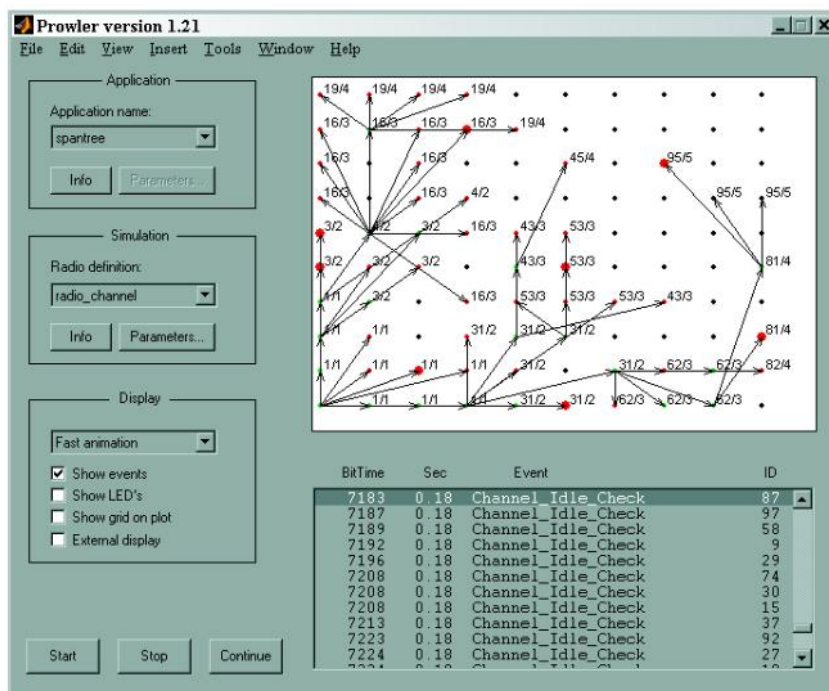


**ΕΙΚΟΝΑ 33: Το mote Berkeley**

Η χρήση του MATLAB προσφέρει ένα γρήγορο και εύκολο τρόπο για τη δημιουργία εφαρμογών και παρουσιάζει δυνατότητες εύχρηστης απεικόνισης της διαδικασίας (Nayyar & Singh, 2015). Το εργαλείο μοντελοποιεί τις σημαντικές πτυχές όλων των επιπέδων του καναλιού επικοινωνίας και της εφαρμογής. Η μη προσδιοριστική φύση της διάδοσης ραδιοσυχνοτήτων καθορίζεται από ένα πιθανολογικό κανάλι RF.

Ένα απλοποιημένο, αλλά ακριβές μοντέλο χρησιμοποιείται για να περιγράψει την λειτουργία του στρώματος MAC. Το χαρακτηριστικό αυτό όμως αποτελεί ταυτόχρονα και περιορισμό του συγκεκριμένου εργαλείου προσομοίωσης, καθώς το πρωτόκολλο MAC είναι το μοναδικό που παρέχεται και μάλιστα πρόκειται για το προεπιλεγμένο πρωτόκολλο MAC του TinyOS.

Στην εικόνα 34 παρουσιάζεται η διεπαφή GUI του εργαλείου Prowler.



**ΕΙΚΟΝΑ 34: Διεπαφή GUI του εργαλείου Prowler**

### 3.11 Ανάλυση και σύγκριση εργαλείων προσομοίωσης

Ο προγραμματισμός των δικτύων WSN είναι και κατά πάσα πιθανότητα θα παραμείνει μια αρκετά δύσκολη και επίπονη διαδικασία. Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους των εργαλείων προσομοίωσης είναι η ελάφρυνση της διαδικασίας αυτής. Ανάμεσα στα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν όλα τα εργαλεία αυτά, για τα δίκτυα WSN, ιδιαίτερη βαρύτητα έχουν τα εξής δύο: η δυνατότητα αναπαραγωγής του πειραματισμού και η δυναμική μοντελοποίηση του περιβάλλοντος.

Τα εργαλεία που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας αποτελούν μια ενδεικτική επισκόπηση του συνόλου των προσομοιωτών που υπάρχουν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των δικτύων WSN. Καθένα από τα εργαλεία αυτά παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και το καθένα μπορεί να θεωρηθεί ως καταλληλότερο σε διαφορετικές καταστάσεις και περιπτώσεις. Τα βασικά χαρακτηριστικά των εργαλείων που παρουσιάστηκαν, αναλύθηκαν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου αυτού.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάποια από τα εργαλεία που παρουσιάστηκαν ως προσομοιωτές, κάλλιστα θα μπορούσαν να θεωρηθούν και ως εξομοιωτές. Σε γενικές γραμμές, ένας προσομοιωτής είναι πιο χρήσιμος όταν η ανάλυση ενός δικτύου γίνεται σε υψηλό επίπεδο. Η επίδραση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης, η τοπολογία και η συσσώρευση δεδομένων αποτελούν στοιχεία ενός δικτύου που μπορούν να αναλυθούν καλύτερα σε υψηλότερο επίπεδο και επομένως η προσομοίωσή τους θεωρείται καταλληλότερη. Αντίθετα, η εξομοίωση είναι πιο χρήσιμη για τη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων ενός δικτύου και την ανάλυση των αποτελεσμάτων σε χαμηλό επίπεδο. Οι εξομοιωτές είναι αποτελεσματικότεροι σε περιπτώσεις μέτρησης του χρόνου των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κόμβων και για τη ρύθμιση των παραμέτρων των αλγορίθμων σε επίπεδο δικτύου και αισθητήρων. Από τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επιλογή χρήσης του ενός ή του άλλου εργαλείου θα πρέπει να γίνεται πάντα ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο ανάλυσης και ελέγχου ενός δικτύου.

Μια ακόμα σημαντική επιλογή που θα πρέπει να γίνεται, αφορά το σχεδιασμό και τη δημιουργία ενός νέου εργαλείου προσομοίωσης. Σε πολλές περιπτώσεις είναι προτιμότερη η επιλογή δημιουργίας ενός εργαλείου προσομοίωσης δικτύων WSN χρησιμοποιώντας ως βάση έναν ήδη υπάρχοντα προσομοιωτή γενικής χρήσης. Αν ο χρόνος ανάπτυξης του εργαλείου είναι περιορισμένος ή εάν απαιτείται η χρήση κάποιου ιδιαίτερου χαρακτηριστικού το οποίο όμως δεν είναι διαθέσιμο, τότε η καλύτερη επιλογή θα ήταν η δημιουργία ενός εργαλείου πάνω σε έναν ήδη υπάρχοντα προσομοιωτή.

Ωστόσο, αν δεν υφίσταται θέμα χρόνου ανάπτυξης και κάποιο νέο σχέδιο θα μπορούσε να αποδειχθεί πιο αποτελεσματικό όσον αφορά την επεκτασιμότητα, την ταχύτητα εκτέλεσης, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, κλπ., τότε, ο σχεδιασμός και ανάπτυξη ενός προσομοιωτή από την αρχή θα μπορούσε να αποτελέσει την καλύτερη επιλογή.

Κατά τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός εργαλείου προσομοίωσης από την αρχή, απαιτείται η λήψη πολλών αποφάσεων μέσα από μια μεγάλη γκάμα επιλογών. Ορισμένα από τα στοιχεία που θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη είναι τα εξής:

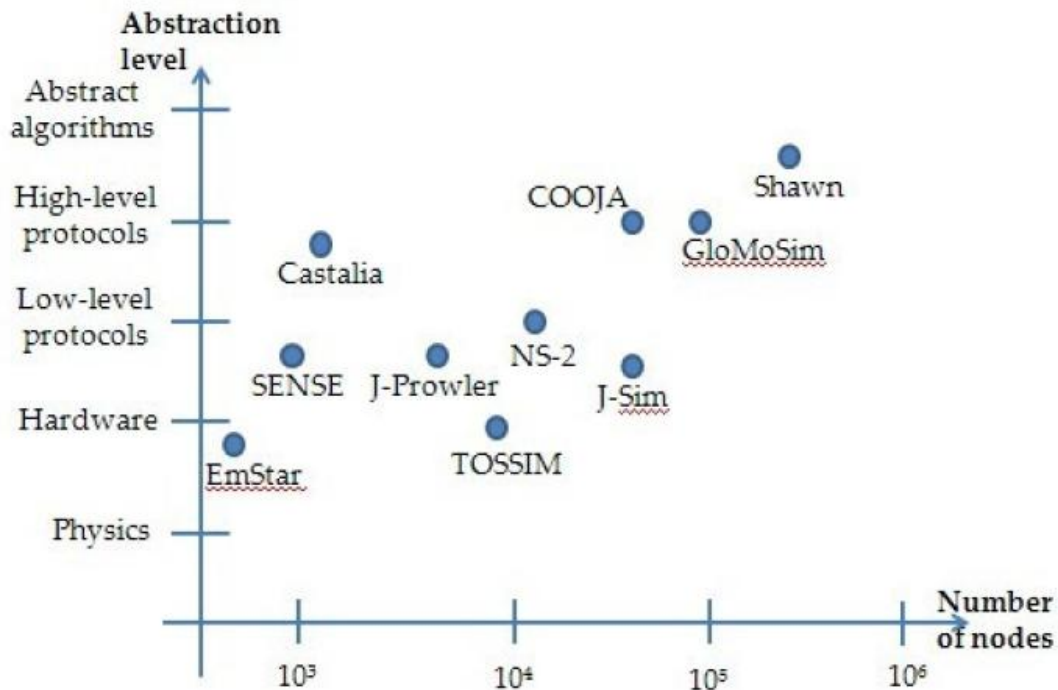
- τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφορετικών γλωσσών προγραμματισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθούν
- το μέσο οδήγησης της προσομοίωσης (event ή time based)
- η αρχιτεκτονική του εργαλείου (component-based ή object-oriented)
- το επίπεδο της πολυπλοκότητας του προσομοιωτή
- τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διαθέτει
- η δυνατότητα παράλληλης εκτέλεσης
- η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με πραγματικούς κόμβους

Η σπουδαιότητα όλων αυτών των στοιχείων μπορεί να αποδειχθεί μέσα από τη σύγκριση των ήδη υπαρχόντων εργαλείων προσομοίωσης για τα οποία έγινε επισκόπηση στο παρόν κεφάλαιο.

Τα περισσότερα εργαλεία διακριτών συμβάντων παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Οι αρχιτεκτονικές που βασίζονται στην έννοια της συνιστώσας παρουσιάζουν μεν μεγαλύτερη επεκτασιμότητα από τις αντικειμενοστρεφείς, αλλά μπορεί να είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις που απαιτείται τμηματοποίηση (modularization). Ο καθορισμός κάθε αισθητήρα ως διαφορετικό αντικείμενο διασφαλίζει την ανεξαρτησία μεταξύ των κόμβων. Η ευκολία εναλλαγής σε νέους αλγόριθμους για διαφορετικά πρωτόκολλα φαίνεται επίσης να είναι ευκολότερη στον αντικειμενοστρεφή σχεδιασμό. Ωστόσο, με προσεκτικό προγραμματισμό, οι αρχιτεκτονικές που βασίζονται στην έννοια της συνιστώσας παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα και είναι πιο αποτελεσματικές. Σε γενικές γραμμές, το επίπεδο πολυπλοκότητας ενός εργαλείου προσομοίωσης εξαρτάται από τον στόχο για τον οποίο σχεδιάστηκε το εκάστοτε εργαλείο και τους χρονικούς περιορισμούς που επιβάλλονται. Η χρήση ενός απλού MAC πρωτοκόλλου μπορεί να είναι αρκετή στις περισσότερες περιπτώσεις, γεγονός που επίσης εξοικονομεί πολύ χρόνο. Άλλες επιλογές σχεδιασμού εξαρτώνται από το σκοπό της προσομοίωσης, την ικανότητα του προγραμματιστή και το διαθέσιμο χρόνο σχεδιασμού. Η χρήση ενός πρότυπου αρχείου διαμόρφωσης μπορεί επίσης να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα σε πολλές περιπτώσεις.

Στην εικόνα 35 παρουσιάζεται ένα συγκριτικό γράφημα των εργαλείων προσομοίωσης που αναλύθηκαν στο παρόν κεφάλαιο με βάση τα κριτήρια της επεκτασιμότητας και του επιπέδου αφαιρετικότητας.

Στο γράφημα αυτό δεν εκφράζεται το μέγιστο εφικτό μέγεθος του δικτύου, αλλά αντανακλάται το τυπικό πεδίο εφαρμογής.



**ΕΙΚΟΝΑ 35: Συγκριτικό γράφημα εργαλείων προσομοίωσης συναρτήσει της επεκτασιμότητας και του επιπέδου αφαιρετικότητας**

Όσον αφορά τη διαθεσιμότητα μοντέλων, το GloMoSim παρουσιάζει έλλειψη διαθέσιμων μοντέλων πρωτοκόλλων σε σύγκριση με άλλα εργαλεία προσομοίωσης (ειδικά το NS-2), γεγονός που αυξάνει το χρόνο ανάπτυξης. Όσον αφορά την ικανότητα σύνθεσης μοντέλων από βασικά μέρη, τα πακέτα που δημιουργούνται βάσει συνιστωσών του J-Sim προσφέρουν τη μέγιστη ευελιξία. Εργαλεία, όπως το Shawn ή το J-Sim, επιτρέπουν οποιαδήποτε εφαρμογή, Linux ή Java αντίστοιχα, να χρησιμοποιηθεί σε μια προσομοίωση. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει σημαντικά τις δυνατότητες τους. Ειδικά εργαλεία, όπως το TOSSIM, είναι σε θέση να προσομοιώνουν πραγματικούς κώδικες αισθητήρων.

Εστιάζοντας στην απόδοση, τα εργαλεία που είναι γραμμένα σε γλώσσες C / C++ παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις από αυτά που κάνουν χρήση της Java. Προφανώς, οι παράλληλες προσομοιώσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα και επεκτασιμότητα από τις διαδοχικές.

Για παράδειγμα, παράλληλοι προσομοιωτές, όπως το GloMoSim (του οποίου στόχος είναι η απόδοση παρά η επεκτασιμότητα) μπορούν να προσομοιώσουν ταυτόχρονα μέχρι και 10.000 περίπου ασύρματους κόμβους.

Σχεδόν όλα τα εργαλεία προσομοίωσης παρέχουν γραφική υποστήριξη, γεγονός που καθιστά πραγματικά εύκολη την κατανόηση της όλης διαδικασίας για τους χρήστες. Το J-Sim, για παράδειγμα, παρέχει ισχυρές βιβλιοθήκες GUI που δίνουν τη δυνατότητα εύκολης παρακολούθησης της διαδικασίας, γεγονός που βοηθάει το χρήστη στον εντοπισμό σφαλμάτων. Το NS-2, περιέχει ένα ενσωματωμένο εργαλείο γραφικής απεικόνισης της κίνησης των πακέτων προς τους κόμβους, το NAM. Ειδικά εργαλεία παρέχουν επίσης εκπληκτικά πλούσια γραφικά περιβάλλοντα. Για παράδειγμα, το TinyViz είναι το εργαλείο οπτικοποίησης του TOSSIM, μια επεκτάσιμη Java εφαρμογή που παρέχει χρήσιμες πληροφορίες εντοπισμού σφαλμάτων. Εκτός αυτού, μπορεί να ελέγχει και να οδηγεί τα στοιχεία της προσομοίωσης. Οι χρήστες μπορούν να αναπτύσσουν δικά τους plugins για να παίρνουν πληροφορίες από συμβάντα του TOSSIM, που έχουν δημοσιευθεί από το TinyViz, και να εκτελούν κάποια επιθυμητή διεργασία.

## **Επίλογος**

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια προσπάθεια μιας όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωμένης επισκόπησης ενός σχετικά ενδεικτικού αριθμού εργαλείων προσομοίωσης δικτύων WSN. Εκτός από την περιγραφή των σημαντικότερων χαρακτηριστικών τους, παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε προσομοιωτή καθώς και μια γενικότερη σύγκρισή τους. Η σύγκριση των εργαλείων αυτών έγινε με γνώμονα τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα εργαλεία προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν μπορούν να βρεθούν στην αντίστοιχη βιβλιογραφία που αναφέρεται στο τέλος της πτυχιακής αυτής εργασίας.

Δεδομένου ότι κανείς από τους προσομοιωτές που εξετάστηκαν δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις περιπτώσεις δικτύων, στο κεφάλαιο αυτό περιελήφθησαν και κάποιες κατευθυντήριες γραμμές για την επιλογή του καλύτερου προσομοιωτή για κάποιο συγκεκριμένο περιβάλλον εφαρμογών. Η γνώση των δυνατών και αδύνατων σημείων αυτών των εργαλείων προσομοίωσης είναι πολύτιμη, διότι επιτρέπει στους χρήστες να επιλέξουν το πλέον κατάλληλο για την ανάλυση των δικτύων τους.

## Συμπεράσματα

---

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) αποτελούν τύπους δικτύων που διαμορφώνονται από έναν αριθμό αισθητήρων ή αισθητήριων στοιχείων. Κύρια χρήση αυτού του τύπου δικτύων είναι η ανάπτυξή τους σε ένα περιβάλλον και η παρακολούθηση και ανίχνευση ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών του εν λόγω περιβάλλοντος. Αυτή η συνεχής παρακολούθηση μικρών ή μεγάλων περιοχών έχει αποτελέσει μεγάλο και ενδιαφέρον θέμα έρευνας.

Τα δίκτυα «έξυπνης σκόνης» (smart dust) μπορούν να ταξινομηθούν στην κατηγορία των κατανεμημένων δικτύων και πιο συγκεκριμένα στην κατηγορία των δικτύων ad-hoc. Η τεχνολογία smart dust εστιάζει σε δίκτυα WSN μεγάλης κλίμακας που περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό μικρών υπολογιστικών στοιχείων χαμηλής ισχύος, τα επονομαζόμενα motes. Τα motes είναι αισθητήριες συσκευές που λόγω του κύριου χαρακτηριστικού τους, την αυτο-οργάνωση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δίκτυα smart dust σε ένα πλήθος εφαρμογών παρακολούθησης και επιτήρησης περιοχών. Αυτή τη στιγμή τα δίκτυα αυτά έχουν πολλές πιθανές εφαρμογές, οι περισσότερες εκ των οποίων τα κατατάσσουν ως το αποκορύφωμα του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT).

Οι τρόποι επικοινωνίας μεταξύ των motes (κόμβων) αποτελούν μια από τις πιο σημαντικές πτυχές ενός δικτύου smart dust. Όλα τα motes σε ένα τέτοιο δίκτυο θα πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά και με το σταθμό βάσης. Λαμβάνοντας πάντα υπόψη όλους τους περιορισμούς σχεδιασμού, λόγω των απαιτήσεων μεγέθους και ισχύος, τα δεδομένα που συλλέγονται ταυτόχρονα από όλα τα motes, θα πρέπει να αποστέλλονται στο σταθμό βάσης για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία. Ο βασικός αυτός σκοπός ενός δικτύου smart dust επιτυγχάνεται μέσω οπτικής επικοινωνίας ή επικοινωνίας ραδιοσυχνότητων.

Ουσιαστικά μέχρι στιγμής τα δίκτυα smart dust δεν χρησιμοποιούν κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας που να έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για να καλύπτει τις ανάγκες τους, αλλά χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 το οποίο έχει υιοθετηθεί ως επικοινωνιακό πρότυπο για όλες τις περιπτώσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και χαμηλού κόστους. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο είναι αρκετά ευέλικτο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, με την προϋπόθεση ότι πραγματοποιείται κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του.

Εκτός από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αποτελούν ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα στα δίκτυα WSN.



Η ανάλυση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης απέδειξε ότι μπορούν να ταξινομηθούν σε πολλές κατηγορίες ανάλογα με μετρικές σύγκρισης αλλά και τις εφαρμογές των εκάστοτε δικτύων.

Οι διάφορες προκλήσεις των δικτύων WSN έχουν αναδείξει και την παρουσία διαφόρων προσεγγίσεων σχεδιασμού ενδιάμεσου λογισμικού. Κύρια ευθύνη του ενδιάμεσου λογισμικού είναι να καθιστά τη διαχείριση των πόρων του συστήματος ευκολότερη, γεγονός που διευκολύνει τη συνολική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, που με τη σειρά του συνεπάγεται τη δυνατότητα μικρότερης κατανάλωσης ενέργειας, ένα ζήτημα ιδιαίτερα σημαντικό για τα δίκτυα smart dust αλλά και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων γενικότερα.

Αυτό που προκύπτει ως γενικό συμπέρασμα είναι ότι πολλά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων δεν έχουν τυποποιηθεί ακόμα. Για το λόγο αυτό, οι πειραματισμοί πάνω στα δίκτυα αυτά συνεχίζονται ακόμα και σήμερα. Η διεξαγωγή όμως πειραμάτων είναι αρκετά χρονοβόρα και δαπανηρή, ενώ η επαναληψιμότητα των ελέγχων μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες που μπορούν να αλλάζουν κάθε φορά τα πειραματικά αποτελέσματα.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, ως λύση υπάρχει η χρήση εργαλείων προσομοίωσης τα οποία έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά στη δοκιμή και ανάλυση της απόδοσης των πρωτοκόλλων και αλγορίθμων των υπό προσομοίωση δικτύων WSN. Με τη βοήθεια των εργαλείων προσομοίωσης, ένα οποιοδήποτε νέο πρωτόκολλο που αφορά δίκτυα αισθητήρων μπορεί εύκολα να αναπτυχθεί και να δοκιμαστεί. Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας προσέγγισης είναι πολλά, όπως εύκολη εφαρμογή, χαμηλό κόστος, ανάλυση αποτελεσμάτων πραγματικού χρόνου και εύκολη κατανόηση των όποιων προβλημάτων εφαρμογής του δικτύου που θα μπορούσαν να εμφανιστούν. Κανένα από τα υπάρχοντα εργαλεία προσομοίωσης δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις περιπτώσεις δικτύων και επομένως η γνώση των δυνατών και αδύνατων σημείων αυτών των εργαλείων είναι πολύτιμη, διότι επιτρέπει στους χρήστες να επιλέξουν το πλέον κατάλληλο για την ανάλυση των δικτύων τους.

## Βιβλιογραφία

---

Acs, G., & Buttyán, L. (2007), "A taxonomy of routing protocols for wireless sensor networks", BUTE Telecommunication department, <http://www.hit.bme.hu/~buttyan/publications/AcsB06ht-en.pdf>

Akyildiz, I. F., & Vuran, M. C. (2010), "Wireless sensor networks (Vol. 4)", John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-51519-8

Al-Omari, S. A. K., & Sumari, P. (2010), "An overview of mobile ad hoc networks for the existing protocols and applications", Journal on Applications of Graph Theory in Wireless Ad hoc Networks and Sensor Networks (J GRAPH-HOC), Vol. 2, No.1, pp: 87-110, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1003/1003.3565.pdf>

Bang, A. O., & Ramteke, P. L. (2013), "MANET: history, challenges and applications", International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM), Vol. 2, Issue 9, pp: 249-251, <http://ijaiem.org/volume2issue9/IJAIEM-2013-09-27-063.pdf>

Bannore, M., Rodge, A., Awari, A., Khande, N., & Ghatre, S. (2014), "Smart Dust", International Journal For Engineering Applications and Technology (IJFEAT), ISSN: 2321-8134, <http://ijfeat.org/papers/2-Issue-3-2014.pdf>

Bartz, R. J. (2015), "Mobile computing deployment and management", John Wiley & Sons, ISBN: 978-1-118-82466-5

Behmann, F., & Wu, K. (2015), "Collaborative Internet of Things (C-IoT): For Future Smart Connected Life and Business", John Wiley & Sons, ISBN: 978-1-118-91371-0

Bhuyan, B., Sarma, H. K. D., & Sarma, N. (2014), "A Survey on Middleware for Wireless Sensor Networks", Journal of Wireless Networking and Communications, Vol. 4, Issue 1, pp: 7-17, <http://article.sapub.org/pdf/10.5923.j.jwnc.20140401.02.pdf>

Boulis, A. (2011), "Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks", User's Manual, NICTA: National ICT Australia, <https://castalia.forge.nicta.com.au/index.php/en/documentation.html> (Πρόσβαση την 2 Ιούνη 2016)

Chen, G., Branch, J., Pflug, M., Zhu, L., & Szymanski, B. (2005), "SENSE: a wireless sensor network simulator", Advances in pervasive computing and networking, pp: 249-267, Springer US, <http://ahvaz.ist.unomaha.edu/azad/temp/sac/04-chen-wirless-snesor-network-simulation.pdf>

Dargie, W. W., & Poellabauer, C. (2010), "Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice", John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-97568-8

Demers, A., Gehrke, J., Rajaraman, R., Trigoni, N., & Yao, Y. (2003), "The cougar project: a work-in-progress report", ACM Sigmod Record, Vol. 32, Issue 4, pp: 53-59, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.447.6672&rep=rep1&type=pdf>

Eriksson, J., Österlind, F., Finne, N., Tsiftes, N., Dunkels, A., Voigt, T., ...& Marrón, P. J. (2009), "COOJA/MSPSim: interoperability testing for wireless sensor networks", ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques, pp: 27-34, <https://www.sics.se/~thiemo/eriksson09interoperability.pdf>

Girod, L., Ramanathan, N., Elson, J., Stathopoulos, T., Lukac, M., & Estrin, D. (2007), "Emstar: A Software Environment for Developing and Deploying Heterogeneous Sensor Actuator Networks", Center for Embedded Network Sensing, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.86.2436&rep=rep1&type=pdf>

Gartner (2013), "Gartner's 2013 Hype Cycle for Emerging Technologies Maps Out Evolving Relationship Between Humans and Machines", <http://www.gartner.com/newsroom/id/2575515> (Πρόσβαση την 4 Μάη 2016)

Gupta, R. (2011), "Mobile adhoc network (MANETS): Proposed solution to security related issues", Indian Journal of Computer Science and Engineering (IJCSE), Vol. 2, Issue 5, pp: 738-746, <http://www.ijcse.com/docs/INDJCSE11-02-05-159.pdf>

Hafner, K. (2011), "Paul Baran, Internet Pioneer, Dies at 84", Article, The New York Times, [http://www.nytimes.com/2011/03/28/technology/28baran.html?src=me&ref=technology&\\_r=0](http://www.nytimes.com/2011/03/28/technology/28baran.html?src=me&ref=technology&_r=0) (Πρόσβαση την 18 Απρίλη 2016)

Hart, M. S. (2015), "A Brief History of the Internet", CreateSpace Independent Publishing Platform, ISBN: 978-1-519-34278-2

Heinzelman, W. B., Murphy, A. L., Carvalho, H. S., & Perillo, M. A. (2004), "Middleware to support sensor network applications", IEEE Network, Vol. 18, No 1, pp: 6-14, [http://www.ece.rochester.edu/projects/wcng/papers/journal/ieee\\_network04.pdf](http://www.ece.rochester.edu/projects/wcng/papers/journal/ieee_network04.pdf)

IEC (2014), "Internet of Things: Wireless Sensor Networks", Whitepaper, International Electrotechnical Commission, <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-internetofthings-LR-en.pdf>

Jevtić, M., Zogović, N., & Dimić, G. (2009), "Evaluation of wireless sensor network simulators", 17th Telecommunications Forum (TELFOR 2009), Belgrade, Serbia, pp: 1303-1306, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.464.8524&rep=rep1&type=pdf>

Kahn, J. M., Katz, R. H., & Pister, K. S. (2000), "Emerging challenges: Mobile networking for "smart dust"", Communications and Networks, Journal of, Vol. 2, Issue 3, pp: 188-196, <https://www.cs.wmich.edu/wise/doc/dust/emerging.pdf>

Kröllner, A., Pfisterer, D., Buschmann, C., Fekete, S. P., & Fischer, S. (2005), "Shawn: A new approach to simulating wireless sensor networks", arXiv preprint cs/0502003, <http://arxiv.org/pdf/cs/0502003.pdf>

Kumar, S., & Singh, V. P. (2012), "Performance Analysis of ZigBee Protocol in Smart Dust Communication Network", International Journal of Computer Applications, Vol. 51, No. 8, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.258.8030&rep=rep1&type=pdf>

Lavric, A., & Popa, V. (2015), "Performance Evaluation of Large-Scale Wireless Sensor Networks Communication Protocols that can be Integrated in a Smart City", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 4, Issue 5, pp: 4136-4141, [http://www.ijareeie.com/upload/2015/may/57\\_Performance.pdf](http://www.ijareeie.com/upload/2015/may/57_Performance.pdf)

Leiner, B. M., Cerf, V. G., Clark, D. D., Kahn, R. E., Kleinrock, L., Lynch, D. C., ... & Wolff, S. (2009), "A brief history of the Internet", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 39, Issue 5, pp: 22-31, <http://ccr.sigcomm.org/online/files/p22-v39n5c2-cerf.pdf>

Lemstra, W., Hayes, V., & Groenewegen, J. (2010), "The innovation journey of Wi-Fi: The road to global success", Cambridge University Press, ISBN: 0-521-19971-9

Levis, P., & Culler, D. (2002), "Mate: A Tiny Virtual Machine for Sensor Networks", ACM Sigplan Notices, Vol. 37, No. 10, pp: 85-95, <http://compilers.cs.ucla.edu/emsoft05/LevisCuller02.pdf>

Levis, P., Lee, N., Welsh, M., & Culler, D. (2003), "TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications", ACM, 1st international

conference on Embedded networked sensor systems, pp: 126-137,  
<http://www.cs.harvard.edu/~mdw/papers/tossim-sensys03.pdf>

Liu, T., & Martonosi, M. (2003), "Impala: A middleware system for managing autonomic, parallel sensor systems", ACM SIGPLAN Notices, Vol. 38, No. 10, pp. 107-118,  
<http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s384030/k06/papers/ImpalaAMiddlewareSystem.pdf>

Madden, S. R., Franklin, M. J., Hellerstein, J. M., & Hong, W. (2005), "TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks", ACM Transactions on database systems (TODS), Vol. 30, Issue 1, pp: 122-173,  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.63.2473&rep=rep1&type=pdf>

Markert, J. (2015), "Smart Dust: How Swarms Of Tiny Computers Could Change The World", Curiousmatic, <https://curiousmatic.com/smart-dust-how-swarms-of-tiny-computers-could-change-the-world/> (Πρόσβαση την 4 Μάη 2016)

Mashalkar, Y. S., & Kazi, A. S. M. (2015), "Wireless Sensor Networks (MOTES): Smart Dust", IJ CER, Vol. 3, Issue 6, pp: 308-312,  
<http://ijcer.org/index.php/ojs/article/viewFile/668/291>

Mihajlov, B., & Bogdanoski, M. (2011), "Overview and analysis of the performances of ZigBee-based wireless sensor networks", International Journal of Computer Applications, Vol. 29, No. 12, pp: 28-35,  
[http://eprints.ugd.edu.mk/6461/1/\\_ugd.edu.mk\\_private\\_UserFiles\\_biljana.kosturanova\\_Desktop\\_Mitko%20Bogdanoski%20-%20Trudovi%20za%20UGD%20Repozitorium\\_Telekomunikacii%20-%20Kompjuterski%20Nauki\\_7.%20pxc3875138.pdf](http://eprints.ugd.edu.mk/6461/1/_ugd.edu.mk_private_UserFiles_biljana.kosturanova_Desktop_Mitko%20Bogdanoski%20-%20Trudovi%20za%20UGD%20Repozitorium_Telekomunikacii%20-%20Kompjuterski%20Nauki_7.%20pxc3875138.pdf)

Mishra, S., & Thakkar, H. (2012), "Features of WSN and Data Aggregation techniques in WSN: A Survey", International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Vol. 1, Issue 4, pp: 264-273,  
[http://www.ijeit.com/vol%201/Issue%204/IJEIT1412201204\\_48.pdf](http://www.ijeit.com/vol%201/Issue%204/IJEIT1412201204_48.pdf)

Nayyar, A., & Singh, R. (2015), "A Comprehensive Review of Simulation Tools for Wireless Sensor Networks (WSNs)", Journal of Wireless Networking and Communications, Vol. 5, Issue 1, pp: 19-47,  
<http://article.sapub.org/10.5923.j.jwnc.20150501.03.html> (Πρόσβαση την 30 Μάη 2016)

O'Brien, D. (2012), "Optical wireless communications and potential applications in space", International Conference on Space Optical Systems and Applications, France,

<http://www2.nict.go.jp/wireless/spacelab/lasersatellitetech/icsos/icsos2012/pdf/1569604873.pdf>

Österlind, F. (2006), "A sensor network simulator for the Contiki OS", SICS Research Report, <http://soda.swedish-ict.se/2296/1/SICS-T--2006-05--SE.pdf>

Osterlind, F., Dunkels, A., Eriksson, J., Finne, N., & Voigt, T. (2006), "Cross-level sensor network simulation with cooja", 31st IEEE conference on Local computer networks, pp: 641-648, <https://core.ac.uk/download/files/362/11433377.pdf>

Pister, K. "Smart Dust", BERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTER, <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/programs/smartdust.html> (Πρόσβαση την 22 Απρίλη 2016)

Presser, M., Barnaghi, P. M., Eurich, M., & Villalonga, C. (2009), "The SENSEI project: integrating the physical world with the digital world of the network of the future", Communications Magazine, IEEE, Vol. 47, Issue 4, pp: 1-4, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4907403>

Radhika, J., & Malarvizhi, S. (2012), "Middleware approaches for wireless sensor networks: An overview", IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 9, Issue 6, No 3, pp: 224-229, <http://ijcsi.org/papers/IJCSI-9-6-3-224-229.pdf>

RF Wireless World (2012), "Bluetooth vs Zigbee-difference between Bluetooth and zigbee", <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Bluetooth-vs-zigbee.html> (Πρόσβαση την 27 Απριλη 2016)

Römer, K. (2004), "Tracking real-world phenomena with smart dust", Wireless Sensor Networks, pp: 28-43, Springer, Berlin, Heidelberg, <https://vs.inf.ethz.ch/publ/papers/tracking.pdf>

Rohitha, P., Kumar, P. R., Adinarayana, N., Venkat, T., & Narayana, R. (2012), "Wireless networking through ZigBee technology", International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Vol. 2, Issue 7, pp: 49-54, [http://www.ijarcsse.com/docs/papers/July2012/Volume\\_2\\_issue\\_7/V2I700137.pdf](http://www.ijarcsse.com/docs/papers/July2012/Volume_2_issue_7/V2I700137.pdf)

Salman, H. M. (2014), "Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks", International Journal of Sensors and Sensor Networks, Vol. 2, No. 1, pp: 1-6, [http://www.uobabylon.edu.iq/uobColeges/fileshare/articles/repository1\\_publication12561\\_30\\_5236.pdf](http://www.uobabylon.edu.iq/uobColeges/fileshare/articles/repository1_publication12561_30_5236.pdf)

Sharma, C. (2013), "An Overview of Mobile Ad hoc Network: Application, Challenges and Comparison of Routing Protocols", OSR Journal of Computer Engineering (IOSR - JCE), Vol. 11, Issue 5, pp: 7-11, <http://www.iosrjournals.org/iosr-jce/papers/Vol11-issue5/B01150711.pdf?id=62>

Shen, C. C., Srisathapornphat, C., & Jaikaeo, C. (2001), "Sensor information networking architecture and applications", IEEE Personal communications, Vol. 8, Issue 4, pp: 52-59, <http://front.cc.nctu.edu.tw/Richfiles/8668-sensor-net-architecture.pdf>

Simon, G., Volgyesi, P., Maróti, M., & Lédeczi, Á. (2003), "Simulation-based optimization of communication protocols for large-scale wireless sensor networks", IEEE aerospace conference, Vol. 3, pp: 1339-1346, [http://qh.eng.ua.edu/classes/fall2008/ece593/index\\_files/hw/WSN\\_Simulation.pdf](http://qh.eng.ua.edu/classes/fall2008/ece593/index_files/hw/WSN_Simulation.pdf)

Singh, C. P., Vyas, O. P., & Tiwari, M. K. (2008), "A survey of simulation in sensor networks", IEEE International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control & Automation, pp: 867-872, [http://www.bvicam.ac.in/news/INDIACom%202009%20Proceedings/pdfs/papers/INDIACom09\\_65\\_Paper%20\(1\).pdf](http://www.bvicam.ac.in/news/INDIACom%202009%20Proceedings/pdfs/papers/INDIACom09_65_Paper%20(1).pdf)

Singh, K. K. (2014), "Smart Dust: Free Space Optical Network", Journal of Global Research Computer Science & Technology (JGRCST), Vol: I, Issue: II, <http://oaji.net/articles/2014/1407-1415422651.pdf>

Singh, S. K., Singh, M. P., & Singh, D. K. (2010), "Routing Protocols in Wireless Sensor Networks—A Survey", International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCES), Vol.1, No.2, pp: 63-83, [https://www.researchgate.net/profile/Adil\\_Khan13/publication/259752993\\_Routing\\_Protocols\\_in\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_A\\_Survey/links/0f31752d943b75a0fd000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Adil_Khan13/publication/259752993_Routing_Protocols_in_Wireless_Sensor_Networks_A_Survey/links/0f31752d943b75a0fd000000.pdf)

Sobeih, A., Chen, W. P., Hou, J. C., Kung, L. C., Li, N., Lim, H., ... & Zhang, H. (2005), "J-sim: A simulation environment for wireless sensor networks", IEEE Computer Society, 38th annual Symposium on Simulation, pp: 175-187, [https://www.researchgate.net/profile/Honghai\\_Zhang5/publication/4129170\\_J-Sim\\_A\\_simulation\\_environment\\_for\\_wireless\\_sensor\\_networks/links/5511f81e0cf270fd7e31afa6.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Honghai_Zhang5/publication/4129170_J-Sim_A_simulation_environment_for_wireless_sensor_networks/links/5511f81e0cf270fd7e31afa6.pdf)

Souto, E., Guimarães, G., Vasconcelos, G., Vieira, M., Rosa, N., Ferraz, C., & Kelner, J. (2006), "Mires: a publish/subscribe middleware for sensor networks", Personal and Ubiquitous Computing, Vol. 10, Issue 1, pp: 37-44, [https://www.researchgate.net/profile/Carlos\\_Ferraz2/publication/215619059\\_](https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Ferraz2/publication/215619059_)

Mires\_a\_publishsubscribe\_middleware\_for\_sensor\_networks/links/00463517ae756dc5d0000000.pdf

Steel, D. (2005), "Smartdust", UH ISRC Technology briefing, <https://gowthamivuppala.files.wordpress.com/2013/04/smart-dust.pdf>

Sundani, H., Li, H., Devabhaktuni, V., Alam, M., & Bhattacharya, P. (2011), "Wireless sensor network simulators a survey and comparisons", International Journal of Computer Networks, Vol. 2, Issue 5, pp: 249-265, <http://www.cscjournals.org/manuscript/Journals/IJCN/Volume2/Issue6/IJCN-72.pdf>

Sutter, J. D. (2010), "'Smart dust' aims to monitor everything", CNN Labs, <http://edition.cnn.com/2010/TECH/05/03/smart.dust.sensors/> (Πρόσβαση την 5 Μάη 2016)

Ullah, M., & Ahmad, W. (2009), "Evaluation of routing protocols in wireless sensor networks", Master Thesis in Computer Science, Department of School of Computing, Blekinge Institute of Technology, <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:829779/FULLTEXT01.pdf>

Veena, V., & Umar, S. (2013), "A Study on Smart Dust (MOTE) Technology", IJCSET, Vol 3, Issue 3, pp: 124-128, <http://ijcset.net/docs/Volumes/volume3issue3/ijcset2013030313.pdf>

Wang, M. M., Cao, J. N., Li, J., & Dasi, S. K. (2008), "Middleware for wireless sensor networks: A survey", Journal of computer science and technology, Vol: 23, Issue 3, pp: 305-326, <http://www.ccf.org.cn/web/resource/8301.pdf>

Warneke, B., Last, M., Liebowitz, B., & Pister, K. S. (2001), "Smart dust: Communicating with a cubic-millimeter computer", Computer, Vol. 34. Issue 1, pp: 44-51, [http://thefengs.com/wuchang/work/courses/cse5xx\\_OGI/cse525\\_winter2004/summaries/11/warneke01smart.pdf](http://thefengs.com/wuchang/work/courses/cse5xx_OGI/cse525_winter2004/summaries/11/warneke01smart.pdf)

Zanjireh, M. M., & Larijani, H. (2015), "A Survey on Centralized and Distributed Clustering Routing Algorithms for WSNs", Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2015 IEEE 81st, pp: 1-6, [https://www.researchgate.net/profile/Morteza\\_Mohammadi\\_Zanjireh/publication/274638337\\_A\\_Survey\\_on\\_Centralised\\_and\\_Distributed\\_Clustering\\_Routing\\_Algorithms\\_for\\_WSNs/links/552444b80cf2b123c5173968.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Morteza_Mohammadi_Zanjireh/publication/274638337_A_Survey_on_Centralised_and_Distributed_Clustering_Routing_Algorithms_for_WSNs/links/552444b80cf2b123c5173968.pdf)