



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

Διπλωματική Εργασία

**«ΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (“MESH”
PROTOCOLS) ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΠΛΟΙΟΥ – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ (CASE
STUDY): ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ “ZIGBEE”»**

Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας

Επιβλέπων: Χρήστος Ν. Βαζούρας

Πειραιάς

Απρίλιος 2026

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνεπειών αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΜΕΛΟΣ Α΄: Χρήστος Ν. Βαζούρας, Καθηγητής ΣΝΔ (Επιβλέπων)

ΜΕΛΟΣ Β΄: Μιχαήλ Φαφαλιός, Ομότιμος Καθηγητής ΣΝΔ

ΜΕΛΟΣ Γ΄: Γεώργιος Βαρδούλιας, Επίκουρος Καθηγητής ΣΝΔ



*“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”*

*“Ευχαριστώ την σύζυγό μου, Γεωργία, για την στήριξη που μου προσέφερε
καθώς και τον επιβλέποντα καθηγητή μου κο Χρήστο Βαζούρα
για την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση του σε εμένα.*

*Αφιερώνεται
στην σύζυγο μου Γεωργία και στα παιδιά μου, Θωμά, Μαρία και Ειρήνη”*



*“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”*

Περίληψη

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία θα παρουσιασθούν βασικές πληροφορίες για τα Πρωτόκολλα Μεταφοράς Δεδομένων. Συγκεκριμένα, θα αναφερθούν οι λειτουργίες που επιτελούν, οι βασικοί τρόποι / κριτήρια βάσει των οποίων κατηγοριοποιούνται καθώς και τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν. Στην συνέχεια, θα παρουσιασθεί μία από τις σύγχρονες βασικές κατηγορίες Πρωτοκόλλων Μεταφοράς Δεδομένων, τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (Mesh Protocols) και συγκεκριμένα θα γίνει αναφορά στον τρόπο, με τον οποίο κατηγοριοποιούνται, αλλά και στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Τέλος θα εξετασθεί και θα αναλυθεί μία Μελέτη Περίπτωσης (Case Study) μίας κατηγορίας Πρωτοκόλλου Πλέγματος, το “Zigbee”, βασισμένη σε ερευνητική εργασία και πειραματισμό.

Λέξεις – Κλειδιά

Ναυτιλία, Zigbee, Mesh, Δίκτυο Πλέγματος

This Postgraduate Thesis presents fundamental information regarding Data Transfer Protocols. Specifically, it discusses their core functions, the primary methods and criteria used for their classification, as well as their most significant advantages and disadvantages. Subsequently, the Thesis explores Mesh Protocols, one of the key modern categories of Data Transfer Protocols. Particular emphasis is placed on their classification methods and their main strengths and weaknesses. Finally, a Case Study of the 'Zigbee' mesh protocol is examined and analyzed, based on research and experimental data.

Key - Words

Shipping, Zigbee, Mesh, Mesh Network



Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	v
Πίνακας Περιεχομένων	vi
Πίνακας Σχημάτων – Εικόνων	viii
Συντημήσεις - Αρκτικόλεξα	ix
1 Γενικά – Πρωτόκολλα Μεταφοράς Δεδομένων.....	1
1.1 Ρόλος.....	1
1.2 Ιστορική Εξέλιξη.....	1
1.3 Λειτουργίες	1
1.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.....	2
1.4.1 Πλεονεκτήματα	3
1.4.2 Μειονεκτήματα	3
1.5 Εφαρμογές.....	3
2 Είδη Πρωτοκόλλων Μεταφοράς Δεδομένων.....	5
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Είδη Πρωτοκόλλων Μεταφοράς Δεδομένων με Βάση τα Κριτήρια Κατηγοριοποίησής τους	5
2.2.1 Τρόπος επικοινωνίας (Mode of Communication).....	5
2.2.2 Επίπεδο Λειτουργίας στο Δίκτυο	5
2.2.3 Δυνατότητα Διαχείρισης Ροής	6
2.2.4 Αξιοπιστία και Διαχείριση Σφαλμάτων	6
2.2.5 Περιβάλλον Χρήσης.....	6
3 Ασύρματα Δίκτυα Πλέγματος (Wireless Mesh Networks).....	7
3.1 Ορισμός και Αρχές Λειτουργίας	7
3.2 Κατηγορίες Κόμβων Πλέγματος.....	7
3.3 Χαρακτηριστικά Δικτύων Πλέγματος.....	8
3.4 Τύποι Δικτύων Πλέγματος (Mesh Networks).....	8
3.4.1 Κατηγορίες ΑΔΠ με Κριτήριο το Πρωτόκολλο Δρομολόγησης που Χρησιμοποιούν (Routing Protocol)	9
3.4.2 Κατηγορίες ΑΔΠ με Κριτήριο την Αρχιτεκτονική που Χρησιμοποιούν (Architecture)	9
3.5 Πλεονεκτήματα Δικτύων Πλέγματος.....	12



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

3.6	Μειονεκτήματα Δικτύων Πλέγματος.....	13
3.7	Εφαρμογές Δικτύων Πλέγματος	13
4	Λειτουργία του Πρωτοκόλλου «Πλέγματος» σε Δίκτυα Δεδομένων στην Ναυτιλία και στο Περιβάλλον της Θάλασσας	15
4.1	Ιδιαιτερότητες του Περιβάλλοντος της Θάλασσας και του Πλοίου	15
4.1.1	Περιβάλλον του Πλοίου – Μειονεκτήματα - Προκλήσεις Χρήσης ΑΔΠ... 16	
4.1.2	Περιβάλλον της Θάλασσας – Μειονεκτήματα - Προκλήσεις Χρήσης	
	ΑΔΠ	17
4.2	Χρήση Ασυρμάτων Δικτύων Πλέγματος στην Θάλασσα και σε Πλοία - Πλεονεκτήματα	18
4.2.1	Χρήση ΑΔΠ στα Πλοία - Πλεονεκτήματα	18
4.2.2	Χρήση ΑΔΠ στην Θάλασσα - Πλεονεκτήματα	19
4.3	Ενδεικτικές Εφαρμογές - Παραδείγματα	22
5	Παρουσίαση Μελέτης Περίπτωσης Μίας Κατηγορίας ΑΔΠ – “Zigbee”	23
5.1	Εισαγωγή.....	23
5.1.1	Γενικά για το “Zigbee”.....	23
5.1.2	Είδη Συσκευών και Λειτουργιών (Κόμβων).....	24
5.1.3	Χρήση ΑΔΠ στην Θάλασσα - Πλεονεκτήματα ... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
5.2	Μελέτη Περίπτωσης – Εκτέλεση των Δοκιμών.....	27
5.2.1	Πρώτη Δοκιμή (Πλοίο “Armorique”) - Συμπεράσματα	29
5.2.2	Δεύτερη Δοκιμή (Πλοίο “Acadie”) - Συμπεράσματα	30
5.3	Γενικό Συμπέρασμα Μελέτης Περίπτωσης	32
6	Επίλογος - Συμπεράσματα	33
	Βιβλιογραφία.....	34



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

Πίνακας Σχημάτων – Εικόνων

Εικόνες

- 1 Δίκτυο Κορμού
- 2 Δίκτυο Πελάτη
- 3α Δίκτυο Υβριδικής Αρχιτεκτονικής
- 3β Δίκτυο Υβριδικής Αρχιτεκτονικής
- 4 Ναυτικό Ασύρματο Δίκτυο Πλέγματος, Βασισμένο σε Δορυφόρους
- 5 Αρχιτεκτονική «Αστέρα»
- 6 Αρχιτεκτονική Ομότιμων
- 7 Αρχιτεκτονική «Δένδρου»
- 8 Ε/Γ – Ο/Γ “Armorique”
- 9 Ε/Γ – Ο/Γ “Acadie”



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

Συντμήσεις - Αρκτικόλεξα

Ελληνικά

ΑΔΠ	Ασύρματο Δίκτυο Πλέγματος
ΔτΠ	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
Ε/Γ	Επιβατηγό
ΕΔΣ	Επίγειος Δορυφορικός Σταθμός
Η/Μ	Ηλεκτρομαγνητικός
ΝΑΔΠ	Ναυτικό Ασύρματο Δίκτυο Πλέγματος
νμ	Ναυτικό Μίλι
Ο/Γ	Οχηματαγωγό
ΠΜΔ	Πρωτόκολλο Μεταφοράς Δεδομένων
ΣΜΛ	Συσκευές Μειωμένης Λειτουργικότητας
ΣΠΛ	Συσκευές Πλήρους Λειτουργικότητας
TN	Τεχνητή Νοημοσύνη
χλμ	Χιλιόμετρο

Αγγλικά

AP	Access Point
ARPANET	Advanced Research Projects Agency Network
BLOS	Beyond Line of Sight
BMS	Building Management System
CBS	Computer Based System
FFD	Full Function Device
GSS	Ground Satellite Station
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMO	International Maritime Organization
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
LOS	Line of Sight
MANET	Mobile Ad Hoc Network
MF	Medium Frequency
MWMN	Maritime Wireless Mesh Network



*“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”*

RFD	Reduced Function Device
RO/RO	Roll On / Roll Off
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
Wi Fi	Wire Free
WMN	Wireless Mesh Network



1 Γενικά – Πρωτόκολλα Μεταφοράς Δεδομένων

1.1 Ρόλος

Τα Πρωτόκολλα Μεταφοράς Δεδομένων (ΠΜΔ) (data transfer protocols) αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο των δικτύων τηλεπικοινωνιών, καθώς με αυτά καθορίζεται ο τρόπος μεταφοράς δεδομένων από έναν τηλεπικοινωνιακό κόμβο σε έναν άλλον. Ο σκοπός της χρήσης ενός ΠΜΔ είναι επίτευξη του βέλτιστου συνδυασμού ταχύτητας, αξιοπιστίας, ακεραιότητας και συνέπειας στην επικοινωνία ισορροπώντας τις ανάγκες μας με το κόστος που είμαστε διατιθέμενοι να καταβάλλουμε για να το υλοποιήσουμε.

1.2 Ιστορική Εξέλιξη

Τα ΠΜΔ αναπτύχθηκαν από τα πρώτα χρόνια του “ARPANET” (πρόγονος του διαδικτύου) για να εξυπηρετούν τις ανάγκες μεταφοράς δεδομένων (πακέτα δεδομένων) μεταξύ ετερογενών δικτύων. Η εμφάνιση του διαδικτύου, που βασίστηκε στην ανάπτυξη της οικογένειας πρωτοκόλλων TCP/IP. Και στην συνέχεια των ασύρματων δικτύων αύξησε τις ανάγκες/ απαιτήσεις για τα ακόλουθα:

- α. Χαμηλή καθυστέρηση (latency).
- β. Αξιοπιστία μετάδοσης.
- γ. Ευελιξία στην τοπολογία του δικτύου.
- δ. Ασφάλεια και διαχείριση συμφόρησης.

1.3 Λειτουργίες

Τα ΠΜΔ λειτουργούν σε όλα τα επίπεδα λειτουργίας ενός δικτύου, όπως θα εξηγηθεί στην συνέχεια. Επομένως, καλούνται, για την ικανοποίηση των προαναφερθέντων αναγκών, να παρέχουν, ανάλογα με το σχεδιασμό και το επίπεδο τους, όλες ή κάποιες από τις κάτωθι λειτουργίες: ¹

¹ “What Are Data Transmission Protocols”, (06 Φεβ 26).
“Transport Layer Protocols”, (24 Ιουλ 25)



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

α. **Εντοπισμός και Διόρθωση Λαθών (Error Detection and Correction):** Είναι οι μέθοδοι για τον εντοπισμό και διόρθωση σφαλμάτων στα πακέτα δεδομένων, διασφαλίζοντας ότι η πληροφορία που λαμβάνεται είναι ακριβής.

β. **Αναφορά Λήψεως (Acknowledgement):** Πρόκειται για λειτουργία στην οποία ο παραλήπτης στέλνει στον αποστολέα αναφορά λήψεως για κάθε πακέτο που λαμβάνει.

γ. **Επαναμετάδοση Πακέτων (Retransmission):** Η συγκεκριμένη λειτουργία, προϋποθέτει την δυνατότητα αναφορά λήψεως. Αφορά σε μηχανισμό, στον οποίο πακέτα που τελικώς χάθηκαν ή απορρίφθηκαν λόγω σφαλμάτων αποστέλλονται εκ νέου για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα των δεδομένων.

δ. **Έλεγχος Ροής (Flow Control):** Είναι ο μηχανισμός που ρυθμίζει την ροή των πληροφοριών για να διασφαλίσει ότι δεν θα υπερφορτωθεί ο παραλήπτης, λειτουργώντας αποτρεπτικά για την απώλεια δεδομένων.

ε. **Αρίθμηση Ακολουθίας (Sequence Numbering):** Καλούμε την ανάθεση διαδοχικής αρίθμησης σε κάθε τμήμα του πακέτου (segment) πριν την μετάδοση, ώστε να επανατοποθετηθούν εκ νέου στην σωστή σειρά στον παραλήπτη, στην περίπτωση που φτάσουν εκτός σειράς.

στ. **Ασφάλεια Δεδομένων (Security):** Ορίζεται ως οι λειτουργίες που ενισχύουν την ασφάλεια των δεδομένων, όπως κρυπτογράφηση και αυθεντικοποίηση, κατά την μεταφορά.

ζ. **Επιβεβαίωση Διεύθυνσης (Address Validation):** Πριν την αποστολή ενός πακέτου, ο αποστολέας επιβεβαιώνει την διεύθυνση του παραλήπτη, προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι θα εκπεμφθεί το πακέτο στην σωστή «διεύθυνση».

η. **Έλεγχος Συμφόρησης (Congestion Control):** Είναι η λειτουργία που ελέγχει τον ρυθμό αποστολής των δεδομένων ώστε να μην υπερβαίνει τη χωρητικότητα του υποκείμενου δικτύου (network layer capacity), αποτρέποντας την κατάρρευση των δικτυακών πόρων.

1.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Τα ΠΜΔ, ανάλογα με το είδος τους, έχουν διαφορετικές τεχνικές δυνατότητες και περιορισμούς που καθορίζουν την καταλληλότητά τους για διαφορετικές



εφαρμογές. Οπότε, κάθε ΠΜΔ διαθέτει διαφορετικά πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα που συγκεντρωτικά είναι τα ακόλουθα:²

1.4.1 Πλεονεκτήματα

- α. Ακεραιότητα.
- β. Σταθερότητα.
- γ. Ταχύτητα.
- δ. Απλότητα.
- ε. Ευελιξία.
- στ. Χαμηλό κόστος.
- ζ. Αυτό-οργάνωση.
- η. Ανθεκτικότητα.
- θ. Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

1.4.2 Μειονεκτήματα

- α. Καθυστέρηση.
- β. Απαίτηση για αυξημένους πόρους.
- γ. Απώλεια δεδομένων.
- δ. Παρεμβολές.
- ε. Χαμηλή ταχύτητα δεδομένων (bandwidth).
- στ. Πολυπλοκότητα.
- ζ. Καθυστέρηση (latency).

1.5 Εφαρμογές

Τα ΠΜΔ εφαρμόζονται σε ένα πλήθος περιβαλλόντων, όπως:

- α. Το διαδίκτυο.
- β. Βιομηχανικά δίκτυα
- γ. Ασύρματα δίκτυα

² J. Postel, “RFC 793”, (Σεπ 81), W. Eddy, “RFC 9293”, (Αυγ 22),
J. Postel, “RFC 768”, (28 Αυγ 80), J. Iyengar et al., “RFC 9000”, (Μαϊ 21),
M. Allman et al., “RFC 5681”, (Σεπ 09), M. Horowitz, M., “RFC 2228”, (Οκτ 97)



*“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”*

- δ. Δίκτυα αισθητήρων και Διαδίκτυο των Πραγμάτων - ΔτΠ (Internet of Things - IoT).
- ε. Δίκτυα κρίσιμων εφαρμογών (ναυτιλία, αεροναυτιλία, υγειονομική περίθαλψη).



2 Είδη Πρωτοκόλλων Μεταφοράς Δεδομένων

2.1 Γενικά

Τα ΠΜΔ κατηγοριοποιούνται με τα παρακάτω κριτήρια, ανάλογα με τα τεχνικά και λειτουργικά τους χαρακτηριστικά που καθορίζουν τον ρόλο και την συμπεριφορά τους εντός της αρχιτεκτονικής δικτύου:³

- α. Τρόπος επικοινωνίας (mode of communication)
- β. Επίπεδο λειτουργίας στο δίκτυο (layering)
- γ. Διαχείριση ροής (flow control)
- δ. Αξιοπιστία και Διαχείριση Σφαλμάτων (error function)
- ε. Περιβάλλον χρήσης.

2.2 Είδη Πρωτοκόλλων Μεταφοράς Δεδομένων με Βάση τα Κριτήρια Κατηγοριοποίησής τους⁴

2.2.1 Τρόπος επικοινωνίας (Mode of Communication)

- α. Πρωτόκολλα με Εγκατάσταση Σύνδεσης (connection mode):

Τα ΠΜΔ αυτής της κατηγορίας ενδείκνυται να χρησιμοποιούνται για συνδέσεις μεγάλης διάρκειας (long-lived), συνεχόμενης «ροής», με σταθερές παραμέτρους λειτουργίας. Επιπρόσθετα διαθέτουν λειτουργίες εγκατάστασης (establishment) και τερματισμού (release) σύνδεσης πριν και μετά την μεταφορά των πακέτων (π.χ. TCP).

- β. Πρωτόκολλα χωρίς Εγκατάσταση Σύνδεσης (connectionless mode): Λαμβάνει χώρα μεταφορά μεμονωμένων πακέτων προς έναν ή περισσότερους αποδέκτες, δεν έχει συγκεκριμένη διάρκεια και δεν προηγείται εγκατάσταση σύνδεσης (π.χ. UDP).

2.2.2 Επίπεδο Λειτουργίας στο Δίκτυο

- α. Επίπεδο Εφαρμογής (application layer): Ανταλλαγή δεδομένων χρηστών μέσω εφαρμογών .

³ ISO/IEC, “ISO/IEC 7498-1”, (1994),

A. Al-Fuqaha, “Network Models: OSI vs. TCP/IP.” (Όπως διαβάστηκε την 27 Ιαν 26)

⁴ J. Postel, “RFC 793”, (Σεπ 81), J. Iyengar et al., “RFC 9000”, (Μαϊ 21)

W. Steven Conner et al. “IEEE 802.11s Tutorial”, (Νοε 06)



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

- β. Επίπεδο Μεταφοράς (transport layer): Μεταφορά πακέτων δεδομένων από άκρη σε άκρη.
- γ. Επίπεδο Δικτύου (network layer): Δρομολόγηση μεταξύ κόμβων.
- δ. Επίπεδο Ζεύξης (link layer): Έλεγχος πρόσβασης στο φυσικό μέσο.

2.2.3 Δυνατότητα Διαχείρισης Ροής

- α. Πρωτόκολλα με Έλεγχο Ροής ή/ και Συμφόρησης (flow - congestion control): Διαχειρίζονται τον όγκο δεδομένων που μεταφέρεται ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτωση του δικτύου. Θεωρούνται ιδανικά για δίκτυα με μεταβαλλόμενες συνθήκες.
- β. Πρωτόκολλα χωρίς Έλεγχο Ροής ή Συμφόρησης: Συχνά εφαρμόζονται σε εφαρμογές όπου η καθυστέρηση πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ακόμη κι αν χαθούν πακέτα.

2.2.4 Αξιοπιστία και Διαχείριση Σφαλμάτων

- α. Αξιόπιστα Πρωτόκολλα με Λειτουργίες Ανίχνευσης Σφαλμάτων: Διαθέτουν μηχανισμούς ανίχνευσης και ειδοποίησης σφαλμάτων όπως μηχανισμό επιβεβαίωσης (Acknowledgement), αρίθμηση τμημάτων (sequence number) και επανεκπομπή (retransmission) πακέτων.
- β. Μη Αξιόπιστα Πρωτόκολλα χωρίς Λειτουργίες Ανίχνευσης Σφαλμάτων: Παραδίδουν τα δεδομένα χωρίς να εγγυώνται την λήψη τους. Προτιμώνται σε εφαρμογές (π.χ. μετάδοση εικόνας – φωνής σε πραγματικό χρόνο) που απαιτούν ταχύτητα και χαρακτηρίζονται από ανεκτικότητα στην απώλεια πακέτων (UDP).

2.2.5 Περιβάλλον Χρήσης

- α. Πρωτόκολλα για Ενσύρματα Δίκτυα: Παρουσιάζουν υψηλή αξιοπιστία, χαμηλό επίπεδο παρεμβολών και σταθερή ταχύτητα δεδομένων (bandwidth)
- β. Πρωτόκολλα για Ασύρματα Δίκτυα: Παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε απώλειες, χρήση μηχανισμών επανεκπομπής, προσαρμοστικότητα.



3 Ασύρματα Δίκτυα Πλέγματος (Wireless Mesh Networks)

Τα Ασύρματα Δίκτυα Πλέγματος - ΑΔΠ (Wireless Mesh Networks – WMN’s) αποτελούν έναν τύπο πρωτοκόλλου δρομολόγησης και μεταφοράς δεδομένων, σχεδιασμένο ειδικά για ασύρματα δίκτυα πολλαπλών κόμβων, όπου κάθε συσκευή (ή "κόμβος") μπορεί να επικοινωνεί άμεσα ή έμμεσα με οποιονδήποτε άλλο κόμβο στο δίκτυο.

3.1 Ορισμός και Αρχές Λειτουργίας

Ένα ΑΔΠ είναι ένας τρόπος τοπολογίας όπου οι κόμβοι είναι διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους, επιτρέποντας πολλαπλές οδούς για τη μεταφορά των δεδομένων. Δεν εξαρτάται από έναν κεντρικό κόμβο όπως τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα, αλλά υποστηρίζει Διαμοιραζόμενη Ευθύνη Δρομολόγησης, όπως θα εξηγηθεί στην συνέχεια.

3.2 Κατηγορίες Λειτουργιών Κόμβων Πλέγματος

Για την κατανόηση των κατηγοριών των ΑΔΠ, κρίνεται σκόπιμο να προηγηθεί μία σύντομη αναφορά στις κατηγορίες των λειτουργιών των κόμβων πλέγματος (mesh nodes) που υπάρχουν, οι οποίοι μπορούν να θεωρηθούν συστατικά στοιχεία του δικτύου (components):

α. Κόμβος - «Πελάτης» πλέγματος (mesh client/ end device): Είναι οποιαδήποτε συσκευή διαθέτει δυνατότητα ασύρματης πρόσβασης σε ένα ασύρματο δίκτυο (ηλεκτρονικός υπολογιστής, κινητό τηλέφωνο, ταμπλέτα, κλπ). Μπορεί να είναι στατικός ή κινούμενος. Το δίκτυο πλέγματος θα πρέπει να είναι «ορατό» στον κόμβο – πελάτη και αντίστοιχα η συσκευή θα πρέπει να είναι εμπορικά διαθέσιμη και ρυθμισμένη για σύνδεση, χωρίς ανάγκη για περαιτέρω ρύθμιση.

β. Κόμβος - Δρομολογητής πλέγματος (mesh router): Είναι συσκευή η οποία δεν είναι ο κόμβος απ’ όπου ξεκινά ή στον οποίο σταματάει η μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων, αλλά ένας ενδιάμεσος κόμβος που αναμεταδίδει το πακέτο μέχρι να φτάσει στον προορισμό του. Συνήθως διαθέτει πολλαπλές διεπαφές (multiple interfaces), ώστε να λειτουργεί επιπλέον και ως σημείο πρόσβασης (Access Point – AP) για έναν κόμβο «πελάτη». Το κύριο έργο του δρομολογητή είναι να εξερευνάει και να διατηρεί ενημερωμένους τους πίνακες δρομολόγησης μεταξύ των κόμβων του ΑΔΠ. Συνήθως είναι στατικός (stationary).



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

γ. Κόμβος - «Πύλη» πλέγματος (mesh gateway): Πρόκειται για δρομολογητή πλέγματος, ο οποίος διαθέτει επιπλέον την δυνατότητα σύνδεσης (ασύρματη ή ενσύρματη) του ΑΔΠ με άλλα δίκτυα (π.χ. ethernet, δίκτυο αισθητήρων, δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, διαδίκτυο, κλπ).

δ. Σταθμοί MANETs (Mobile Ad-hoc NETWORKs): Παρ’ ότι δεν θεωρούνται δίκτυο πλέγματος, μπορούν να συνυπάρξουν και να συνδεθούν με αυτό συμπληρώνοντας το. Μπορούν να θεωρηθούν κόμβοι – «πελάτες», να συνδεθούν με κόμβο δρομολογητή, να λάβουν πίνακες δρομολόγησης και να επεκτείνουν περαιτέρω την κάλυψη του ΑΔΠ.

3.3 Χαρακτηριστικά Δικτύων Πλέγματος⁵

α. Αναμετάδοση πακέτων μέσω πολλαπλών αλμάτων (multi-hop): Τα πακέτα μετακινούνται από κόμβο σε κόμβο μέχρι τον προορισμό.

β. Ανακάλυψη διαδρομής (route discovery): Οι διαδρομές ανακαλύπτονται και αξιολογούνται δυναμικά.

γ. Επανυπολογισμός διαδρομής (Route Maintenance/ Repair): Σε περίπτωση αποτυχίας, τα πακέτα επαναδρομολογούνται.

δ. Κατανεμημένος έλεγχος: Δεν υπάρχει κεντρικός διαχειριστής, η λήψη αποφάσεων είναι τοπική.

ε. Ανοχή σε αστοχίες (Fault Tolerance): Η επικοινωνία συνεχίζεται ακόμα και με αστοχία κόμβων.

3.4 Τύποι Δικτύων Πλέγματος (Mesh Networks)⁶

Τα ΑΔΠ κατηγοριοποιούνται, είτε ως προς το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιούν (routing protocol), είτε ως προς την λειτουργία – αρχιτεκτονική που έχουν.

⁵ W. Steven Conner et al. “IEEE 802.11s Tutorial”, (Νοε 06)

⁶ P. Owczarek et. al, “Routing Protocols - A Comparison And Classification”, (Σεπ 13),

J. Wang et. al, “Routing in Wireless Mesh Networks”, (07 Δεκ 06),

I. F. Akyildiz et al, “Wireless mesh networks: a survey”, (Ιαν 05),

C. Zachos et. al, “Wireless Mesh Network: Architecture and Protocols”, (Απρ 16)



3.4.1 Κατηγορίες ΑΔΠ με Κριτήριο το Πρωτόκολλο Δρομολόγησης που Χρησιμοποιούν (Routing Protocol)

α. Προληπτικό (Proactive): Οι κόμβοι πλέγματος (mesh nodes) του δικτύου διατηρούν συνεχώς πλήρεις πίνακες δρομολόγησης, ενημερωμένους ανά πάσα στιγμή. Κάθε αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου μεταδίδεται στους υπόλοιπους κόμβους, έτσι ώστε οι πίνακες δρομολόγησης να αποθηκεύονται ενημερωμένοι στο σύνολο των κόμβων που απαρτίζουν το ΑΔΠ. Αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχει καθυστέρηση μετάδοσης (latency), όμως οι κόμβοι λειτουργούν συνεχώς και διακινούν δεδομένα ακόμη και όταν δεν εκπέμπουν πακέτο επ’ ωφέλεια ενός χρήστη. Θεωρείται κατάλληλο για σταθερά δίκτυα με συχνή ανταλλαγή δεδομένων.

β. Άμεσης Απόκρισης (Reactive): Οι κόμβοι του δικτύου λειτουργούν και βρίσκουν στοιχεία διαδρομής ενός πακέτου την στιγμή που καλούνται να το δρομολογήσουν (on demand - κατ’ απαίτηση). Έχει το πλεονέκτημα του μειωμένου φόρτου διακίνησης, όμως παρουσιάζει επιπλέον καθυστέρηση (latency) ως προς τον χρόνο μετάδοσης, καθώς προηγείται ο χρόνος που απαιτείται για να συλλέξει τα δεδομένα της βέλτιστης διαδρομής.

γ. Υβριδικό (Hybrid): Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο ανωτέρω κατηγοριών. Οι κόμβοι του δικτύου χωρίζονται σε συστάδες (clusters). Οι κόμβοι εντός κάθε συστάδας λειτουργούν με προληπτική δρομολόγηση για την μεταξύ τους επικοινωνία, ενώ οι κόμβοι μεταξύ διαφορετικών συστάδων λειτουργούν με πρωτόκολλο άμεσης απόκρισης. Εναλλακτικά ή επιπρόσθετα, οι κόμβοι στις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διαδρομές (often used paths) λειτουργούν με προληπτική δρομολόγηση και οι υπόλοιποι λειτουργούν με δρομολόγηση άμεσης απόκρισης.

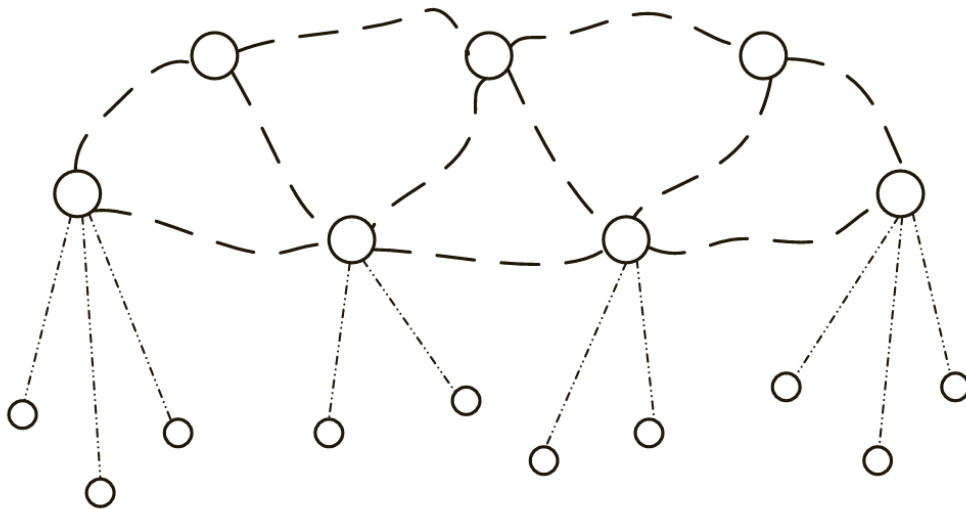
3.4.2 Κατηγορίες ΑΔΠ με Κριτήριο την Αρχιτεκτονική που Χρησιμοποιούν (Architecture)

α. Δίκτυο Υποδομής / Κορμού / Ιεραρχικό (Infrastructure/ Backbone / Hierarchical Network): Στο δίκτυο «κορμού» όλοι οι κόμβοι είναι δρομολογητές (mesh routers), μέρος των οποίων μπορεί να συνδέονται ενσύρματα μεταξύ τους. Το δίκτυο των δρομολογητών λειτουργεί επ’ ωφέλεια των κόμβων - «πελατών», στους οποίους παρέχουν πρόσβαση. Οι «πελάτες» συνδέονται με έναν δρομολογητή, ασύρματα ή ενσύρματα (ethernet) χωρίς να δρομολογούν οι ίδιοι δεδομένα. Κάποιοι εκ των



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

δρομολογητών μπορεί να είναι ταυτόχρονα και κόμβοι – πύλες (gateway) προς άλλα δίκτυα, όπως προαναφέρθηκε. Παράδειγμα ενός δικτύου κορμού είναι το ασύρματο δίκτυο σε μία κοινότητα ή συνοικία με πρόσβαση στο διαδίκτυο.



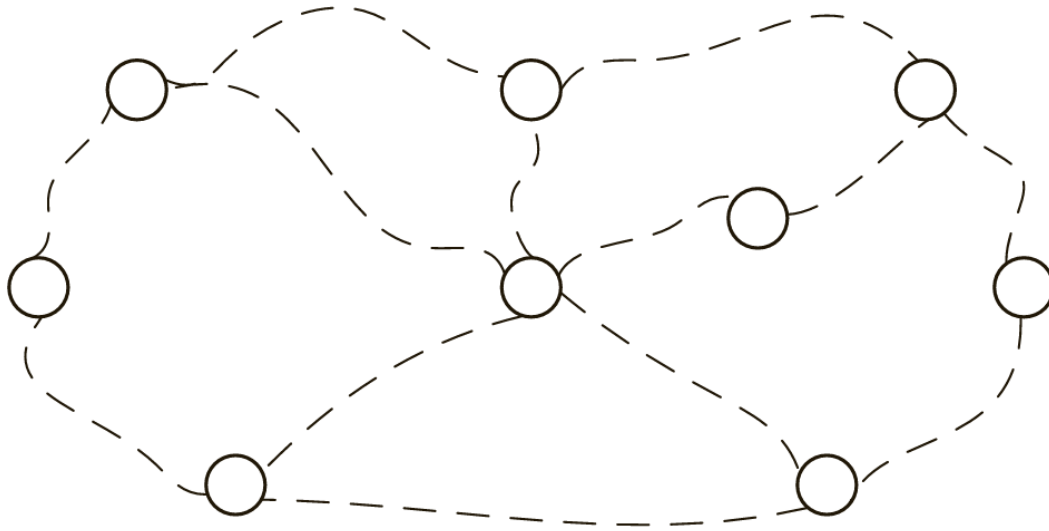
Εικόνα 1 - Δίκτυο Κορμού⁷

β. Δίκτυο «Πελάτη»/ Επίπεδης Αρχιτεκτονικής (Client/ Flat Network): Το εν λόγω δίκτυο δεν διαθέτει κόμβους – δρομολογητές, αλλά μόνο κόμβους – «πελάτες» (ομότιμο δίκτυο – peer to peer), οι οποίοι επικοινωνούν απ’ ευθείας μεταξύ τους, επ’ ωφέλεια των χρηστών. Οι κόμβοι «πελάτες» διαθέτουν, εκτός από τις εφαρμογές του χρήστη, επιπλέον δυνατότητες δρομολόγησης και αυτό-διαμόρφωσης, ώστε να προωθούν τα δεδομένα μεταξύ τους. Το εν λόγω δίκτυο δεν έχει δυνατότητα διεπαφής με άλλο δίκτυο, συνεπώς τα διακινούμενα δεδομένα παραμένουν εντός του δικτύου. Το δίκτυο πελάτη διακρίνεται για την απλότητά του.

⁷ C. Zachos et. al, “Wireless Mesh Network: Architecture and Protocols”, (Απρ 16)



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”



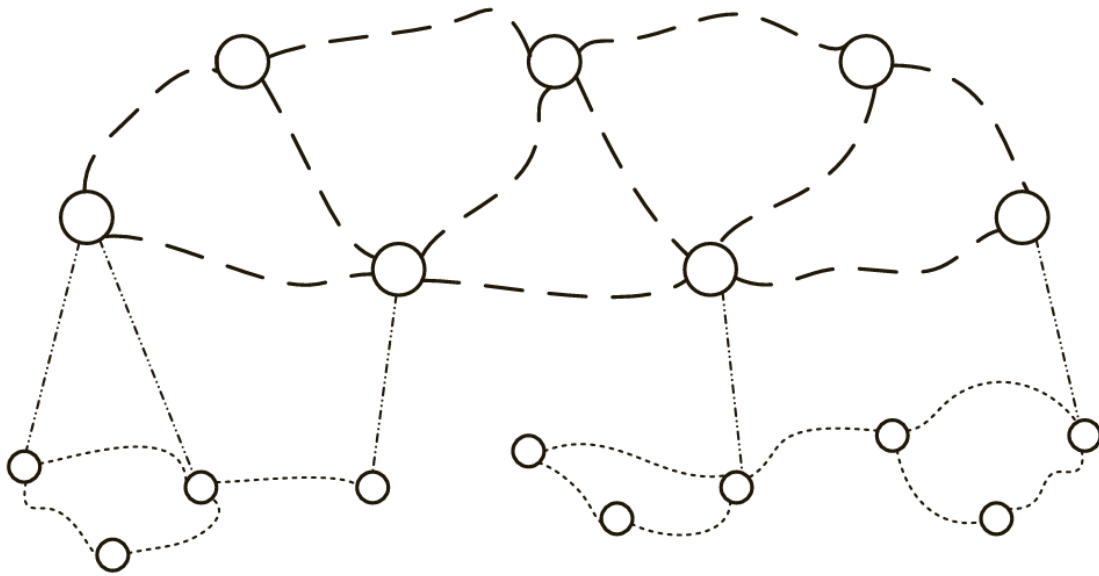
Εικόνα 2 - Δίκτυο Πελάτη⁸

γ. Δίκτυο Υβριδικής Αρχιτεκτονικής (Hybrid Architecture Network): Το υβριδικό δίκτυο συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των δύο ανωτέρω δικτύων. Οι δρομολογητές σχηματίζουν το δίκτυο κορμού, στο οποίο συνδέονται «πελάτες», είτε απ’ ευθείας, είτε μέσω ενός άλλου «πελάτη», ο οποίος θα προωθήσει το πακέτο δεδομένων στο δίκτυο κορμού.

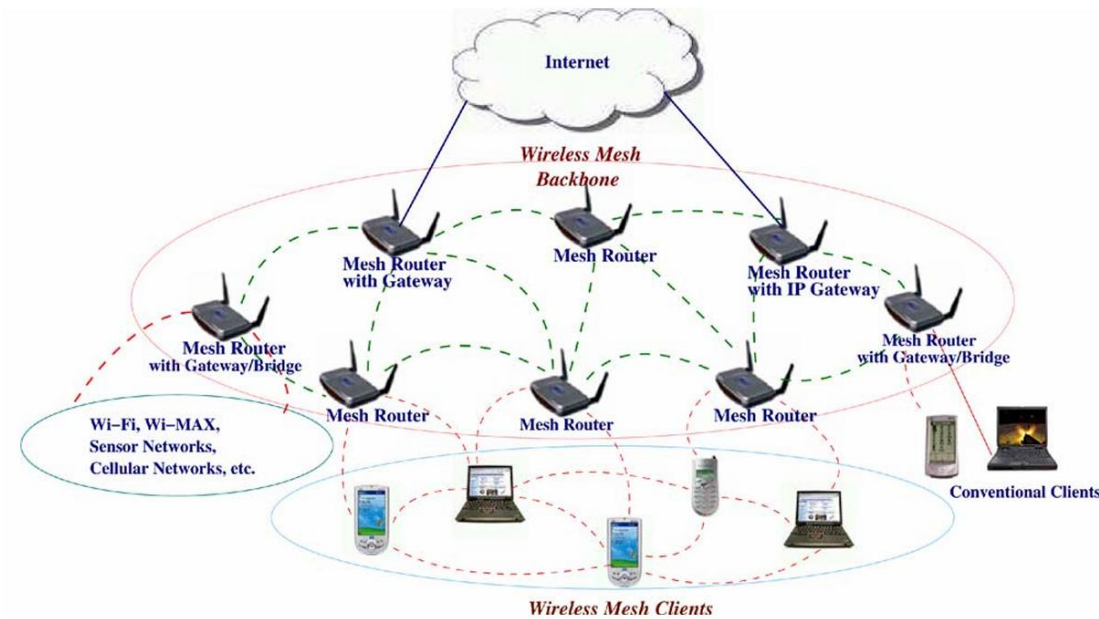
⁸ C. Zachos et. al, “Wireless Mesh Network: Architecture and Protocols”, (Απρ 16)



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”



Εικόνα 3α – Δίκτυο Υβριδικής Αρχιτεκτονικής⁹



Εικόνα 3β – Δίκτυο Υβριδικής Αρχιτεκτονικής¹⁰

3.5 Πλεονεκτήματα Δικτύων Πλέγματος

α. «Αυτοΐαση» (“self-healing”): Ανακατεύθυνση κυκλοφορίας σε περίπτωση αστοχίας ενός κόμβου. Το δίκτυο ανασυντάσσεται αυτόματα.

⁹ C. Zachos et. al, “Wireless Mesh Network: Architecture and Protocols”, (Απρ 16)

¹⁰ I. F. Akyildiz et al, “Wireless mesh networks: a survey”, (Ιαν 05)



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

- β. Αυτοδιαμόρφωση (self-forming): Οι νέοι κόμβοι ενσωματώνονται αυτόματα στο δίκτυο.
- γ. Κάλυψη μεγάλων περιοχών χωρίς ανάγκη ενίσχυσης σήματος.
- δ. Ευελιξία σε δύσκολα περιβάλλοντα (βιομηχανίες, πλοία, στρατιωτικά πεδία).
- ε. Χαμηλό κόστος εγκατάστασης, όσον αφορά τις υποδομές ενσύρματης διασύνδεσης, με λιγότερους σταθμούς βάσης.
- στ. Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που προσδίδει υψηλή αυτονομία σε κόμβους που λειτουργούν με στοιχεία συσσωρευτών.

3.6 Μειονεκτήματα Δικτύων Πλέγματος

- α. Αυξημένη πολυπλοκότητα στη διαχείριση και υλοποίηση.
- β. Καθυστερήση (latency) λόγω επικοινωνίας πολλαπλών αλμάτων (multi-hop).
- γ. Κατανάλωση ενέργειας σε ενεργούς κόμβους δρομολόγησης (routers) ακόμη και όταν είναι αδρανείς.
- δ. Δυσχερέστερη Ασφάλεια: Περισσότερα σημεία πιθανής παραβίασης.
- ε. Περιορισμός στην Επέκταση του Δικτύου (scalability): Πρέπει να υπάρχει προσεκτικός σχεδιασμός και ισορροπία μεταξύ της ανάγκης για επέκταση με μεγάλο αριθμό κόμβων και την υποβάθμιση του δικτύου που προκαλεί αυτή η επέκταση.

3.7 Εφαρμογές Δικτύων Πλέγματος

- α. Βιομηχανία (industry 4.0):¹¹ Ασύρματη επικοινωνία μεταξύ συστημάτων/ μηχανημάτων.
- β. Συστήματα «Εξυπνου Σπιτιού» (“Smart Home” / IoT): Για φωτισμό, αισθητήρες, ασφάλεια.
- γ. Στρατιωτικές επιχειρήσεις: (MANETs) για επικοινωνία χωρίς υποδομή.¹²

¹¹ Aeromesh Systems, “Industrial Wi-Fi Mesh”, (Όπως διαβάστηκε την 12 Φεβ 26)

¹² S. Corson et. al, “RFC 2501”, (Jan 99)



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

- δ. Αντιμετώπιση καταστροφών: Ταχεία ανάπτυξη προσωρινών δικτύων σε κρίσεις.
- ε. Ναυτιλία και Αεροναυτιλία: Ασύρματα δίκτυα πάνω σε πλοία και αεροσκάφη.
- στ. Δημοτικά Μητροπολιτικά Δίκτυα (Municipal Mesh Networks): Παροχή Wi-Fi σε ολόκληρες πόλεις (π.χ. δημόσια πάρκα).



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

4 Λειτουργία του Πρωτοκόλλου «Πλέγματος» σε Δίκτυα Δεδομένων στην Ναυτιλία και στο Περιβάλλον της Θάλασσας

1. Τα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα των ΑΔΠ, όπως παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, κατέστησαν ελκυστική την ενσωμάτωσή τους στην ναυτιλία ως ακόμη ένα βήμα προς την βελτίωση της ασφάλειας και της απόδοσης των πλοίων. Η ενσωμάτωση αυτή αφορά στην επικοινωνία υψηλής ταχύτητας (high data rate) και χαμηλής καθυστέρησης (low latency) μεταξύ πλοίων – παράκτιων εγκαταστάσεων (π.χ. λιμένες) ή την επικοινωνία εντός των εσωτερικών τους χώρων.

2. Η αναφορά στα πλοία περιλαμβάνει επιπλέον κάθε πλωτή κατασκευή που έχει κατασκευαστεί για να βρίσκεται στην θάλασσα, κινούμενη ή μη, όπως πλατφόρμες υδρογονανθράκων, πλωτοί σημαντήρες, κλπ.

3. Τα πλοία λειτουργούν πλέον ως πλωτές πλατφόρμες ανταλλαγής δεδομένων, χρησιμοποιώντας αξιόπιστα δίκτυα με τις ακόλουθες ενδεικτικές χρήσεις - εφαρμογές:

- α. Την συλλογή δεδομένων από αισθητήρες (sensors).
- β. Την επικοινωνία μεταξύ των μελών του πληρώματος.
- γ. Τον έλεγχο μηχανημάτων και αυτοματισμών (κατ’ αντιστοιχία με τα BMS – Building Management Systems).
- δ. Την παρακολούθηση της κατάστασης φορτίου και καυσίμου.
- ε. Την επικοινωνία με άλλα πλοία ή με σταθμούς στην ξηρά.

4. Στην συνέχεια θα εξετάσουμε τις ιδιαιτερότητες και τις λύσεις εντός του περιβάλλοντος του πλοίου αλλά και στο περιβάλλον της ναυτιλίας και της θάλασσας γενικότερα.¹³

4.1 Ιδιαιτερότητες του Περιβάλλοντος της Θάλασσας και του Πλοίου

Εκτιμάται χρήσιμο να επισημάνουμε τις ιδιαιτερότητες του περιβάλλοντος του πλοίου και της θάλασσας, που το καθιστούν ιδιαίτερα απαιτητικό για κάθε τεχνολογία

¹³ JMSE, J. Gu et al., “Evaluation of a Multi-Hop Wireless Internet-of-Things Network on Large Ships”, 27 Νοεμβρίου 2023,

JMSE, C. Pérez-Garrido et al., “Wireless Remote Monitoring of Toxic Gases in Shipbuilding”, 14 Φεβρουαρίου 2014,

M. Manoufali et al., “An Overview of Maritime Wireless Mesh”, (Γαν 16)



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

δικτύου. Από αυτές τις ιδιαιτερότητες απορρέουν και τα μειονεκτήματα - προκλήσεις χρήσης ΑΔΠ. Θα εξετάσουμε ξεχωριστά το περιβάλλον του πλοίου από αυτό της θάλασσας στις επόμενες παραγράφους.

4.1.1 Περιβάλλον του Πλοίου – Μειονεκτήματα - Προκλήσεις Χρήσης ΑΔΠ

α. Τα μεταλλικά τοιχώματα, κατασκευές, σωληνώσεις και φορτία ενός πλοίου προκαλούν, αφενός εξασθένηση (attenuation), αφετέρου παρεμβολές λόγω πολλαπλών ανακλάσεων - διαδρομών (multipath interference) με αποτέλεσμα την μείωση της ισχύος και της ποιότητας στο σήμα ενός ασύρματου δικτύου. Συνεπώς, η ασύρματη μετάδοση δεδομένων γίνεται δυσχερής και η εν λόγω δυσχέρεια οξύνεται όταν οι θύρες και τα στεγανά ανοίγματα είναι κλειστά.

β. Η παρουσία και οι μετακινήσεις του πληρώματος ή των επιβατών ενδεχομένως να επηρεάζουν την μείωση της ισχύος στο δίκτυο.

γ. Η κίνηση του πλοίου σε όλες τις διαστάσεις, είτε αυτή είναι ήπια, είτε απότομη, λόγω της πρόωσης, των καιρικών συνθηκών ή των κραδασμών των μηχανημάτων, καθιστά απαιτητική την στερέωση των μονάδων/ στοιχείων ενός ασύρματου δικτύου και μπορεί να επηρεάσουν δυσμενώς την σταθερότητα/ απόδοσή του.

δ. Ο συνδυασμός της υγρασίας, του θαλασσινού νερού, του κυματισμού και των λοιπών καιρικών συνθηκών δυσχεραίνει εξαιρετικά την τοποθέτηση συσκευών ενός ασύρματου δικτύου σε εξωτερικό χώρο του πλοίου.

ε. Το πλοίο είναι εκ του σχεδιασμού του κατασκευασμένο με οικονομία στην χωροταξία και το μέγεθος των διαμερισμάτων. Επομένως, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός για την τοποθέτηση, την προσβασιμότητα και την διάταξη των μονάδων/ στοιχείων ενός δικτύου.

στ. Μέρος των δεδομένων είναι ευαίσθητα ή κρίσιμα για την λειτουργία του πλοίου, όπως ενδεικτικά οι παράμετροι λειτουργίας συστημάτων πρόωσης - ενέργειας, δεδομένα ναυτιλίας, αισθητήρες καπνού/ θερμοκρασίας. Επομένως, το αντίστοιχο δίκτυο θα πρέπει να συμμορφώνεται με υψηλά πρότυπα για την ακεραιότητα και την ποιότητα των δεδομένων.

ζ. Η χρήση οποιουδήποτε συστήματος που βασίζεται σε υπολογιστή (Computer Based System – CBS) διαθέτει τρωτότητες κυβερνοασφάλειας.



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

Επομένως, η εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου, το οποίο συλλέγει δεδομένα σε έναν υπολογιστή/ θέση εργασίας, θα πρέπει να συμμορφώνεται με τα τελευταία πρότυπα κυβερνοασφάλειας, όπως έχουν θεσπισθεί από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization - IMO).¹⁴

Αποτελέσματα δοκιμών έδειξαν ότι ένα ασύρματο δίκτυο έχει καλύτερη απόδοση – μικρότερη εξασθένηση στην μπάντα συχνοτήτων κάτω του 1 GHz (sub 1 GHz) συγκριτικά με την μπάντα συχνοτήτων στα 2,4 GHz.

4.1.2 Περιβάλλον της Θάλασσας – Μειονεκτήματα - Προκλήσεις Χρήσης ΑΔΠ

Η ενσωμάτωση των ΑΔΠ στην θάλασσα (Ναυτικά ΑΔΠ - ΝΑΔΠ ή Maritime WMN – MWMN) καλείται επιπλέον να διαχειριστεί τις ακόλουθες ιδιαιτερότητες και μειονεκτήματα της χρησιμοποίησης των δορυφορικών επικοινωνιών, της κινητής τηλεφωνίας και των επίγειων επικοινωνιών προηγούμενης γενιάς (“legacy”) όπως MF/ HF/ VHF/ UHF σε σχέση με την εμβέλεια και την αναγκαιότητα χρήσης εφαρμογών πραγματικού χρόνου, με υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων (high data rate):

α. Τα πλοία που κινούνται μακράν της εμβέλειας των σταθμών ξηράς, δεν μπορούν να αξιοποιήσουν τα ασύρματα δίκτυα υψηλής ταχύτητας όπως το wifi ή τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η εν λόγω εμβέλεια δεν υπερβαίνει τα 15-20 νμ (~ 30 – 40 χλμ) αναλόγως των συνθηκών διάδοσης (εξασθένηση και πολλαπλές διαδρομές λόγω ανάκλασης στην επιφάνεια της θάλασσας) και το ύψος της κεραίας του πλοίου.

β. Η κάλυψη των επικοινωνιακών αναγκών υψηλής ταχύτητας σε αποστάσεις μεγαλύτερες από την εμβέλεια των σταθμών ξηράς δεν μπορεί να γίνει με τις επικοινωνίες και πρωτόκολλα προηγούμενης γενιάς (“legacy”). Επομένως, καθίσταται μονόδρομος η χρήση των δορυφορικών επικοινωνιών, οι οποίες όμως παρουσιάζουν υψηλό κόστος αξιοποίησης και καθυστέρηση μεταφοράς δεδομένων (latency). Επιπρόσθετα, ακόμη και οι κεραίες ζεύξης επί των πλοίων έχουν υψηλό σχετικά κόστος, λόγω ενσωμάτωσης λογισμικού και γυροσκοπικών μηχανισμών για την διατήρηση της λήψης. Το υψηλό συνολικό κόστος δεν επιτρέπει την αξιοποίησή τους από όλους, ενώ η καθυστέρηση που παρουσιάζουν δεν τις καθιστά πάντα κατάλληλες για εφαρμογές πραγματικού χρόνου (real time).

¹⁴ IMO, “MSC-FAL.1-Circ.3-Rev.3” (Ιουν 17)



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

γ. Τα πλοία, μαζί με τους σταθμούς ξηράς, συνθέτουν ένα δίκτυο σταθμών με συνεχώς μεταβαλλόμενη γεωμετρία/ τοπολογία καθώς τα πρώτα είναι διαρκώς εν κινήσει. Επιπρόσθετα, οι επικοινωνιακές τους ανάγκες είναι διαφορετικών κατηγοριών/ κλάσεων (φωνή, εικόνα, video, κλπ). Συνεπώς, είναι αναγκαία η δυναμική κατανομή και βελτιστοποίηση των πόρων ενός δικτύου (network resources allocation and optimization).

δ. Όπως αναφέρθηκε και για τους εσωτερικούς χώρους ενός πλοίου στην ανωτέρω παράγραφο 4.1.1, είναι σημαντική η ακεραιότητα, η εμπιστευτικότητα και η αυθεντικοποίηση των δεδομένων που διακινούνται, καθώς και η τήρηση προτύπων κυβερνοασφάλειας στο σύστημα διαχείρισης των ναυτιλιακών δικτύων. Τα δεδομένα είναι ευάλωτα σε απώλεια, υποκλοπή και υπονόμηση, ενώ το σύστημα διαχείρισης είναι ευάλωτο σε κυβερνοεπιθέσεις.

4.2 Χρήση Ασυρμάτων Δικτύων Πλέγματος στην Θάλασσα και σε Πλοία - Πλεονεκτήματα

Λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερθείσες ιδιαιτερότητες – μειονεκτήματα, θα αναφερθούμε στα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση ΑΔΠ στα πλοία και στην θάλασσα αντίστοιχα.

4.2.1 Χρήση ΑΔΠ στα Πλοία - Πλεονεκτήματα

α. Συλλογή και μεταφορά δεδομένων από αισθητήρες ακόμη και στα πιο απομακρυσμένα και δυσπρόσιτα σημεία του πλοίου προς μία κεντρική μονάδα μέσω διαδοχικών κόμβων.

β. Εναλλαξιμότητα επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση μη λειτουργίας ενός κόμβου, τα δεδομένα επαναδρομολογούνται μέσω άλλου.

γ. Συλλογή δεδομένων, η παρακολούθηση των οποίων επιτρέπει για το πλοίο, αφενός την ομαλή λειτουργία (δεδομένα μηχανημάτων, στάθμης δεξαμενών καυσίμου – ύδατος, κλπ), αφετέρου την ασφάλεια του (δεδομένα για άνοιγμα θυρών – στεγανών, κάμερες, ενδείξεις θερμοκρασίας, καπνού).

δ. Πλήρης κάλυψη του πλοίου χωρίς την αντίστοιχη επιβάρυνση σε χώρο, βάρος και κόστος λόγω της καλωδίωσης που θα απαιτούνταν εάν το εν λόγω δίκτυο ήταν ενσύρματο στο σύνολό του.



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

ε. Επικοινωνία μεταξύ των μελών του πληρώματος μέσω ασύρματων φορητών ατομικών συσκευών. (μικροφωνοακουστικά).

στ. Αμφίδρομη ροή δεδομένων και έλεγχος (ασύρματος τηλεχειρισμός) μηχανημάτων/ συσκευών/ συστημάτων.

4.2.2 Χρήση ΑΔΠ στην Θάλασσα - Πλεονεκτήματα

1. Το ΝΑΔΠ δεν μπορεί να υλοποιηθεί αμιγώς με ΑΔΠ στην θάλασσα, όπως μπορεί να συμβεί στους εσωτερικούς χώρους ενός πλοίου, λόγω της περιορισμένης εμβέλειας των κόμβων του. Το ΝΑΔΠ είναι ουσιαστικά ένα ανομοιογενές δίκτυο, ένα δίκτυο δικτύων, στο οποίο συνυπάρχουν πολλά διαφορετικής τεχνολογίας ασύρματα δίκτυα μαζί με την αντίστοιχη δυνατότητα πρόσβασης και πρωτόκολλα επικοινωνίας (διαδίκτυο, δορυφόροι, επικοινωνίες “legacy”, wi-fi, κινητή τηλεφωνία, MANETs). Οι κόμβοι πλέγματος χρησιμοποιούν το φάσμα των “legacy” επικοινωνιών, αλλά χρησιμοποιούν διαφορετικό πρωτόκολλο επικοινωνίας και τον κατάλληλο διαμορφωτή/ αποδιαμορφωτή (modem). Θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε το πρωτόκολλο δρομολόγησης καθώς και την αρχιτεκτονική του ΝΑΔΠ ως υβριδικού τύπου (ανωτέρω παράγραφοι 3.4.1 και 3.4.2).

Το ΝΑΔΠ μπορεί να περιλαμβάνει τις παρακάτω λειτουργίες:

α. Διαχείριση κινητικότητας (mobility management): Πρόκειται για την δυνατότητα να διασυνδέει χρήστες και να αξιοποιεί - συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δικτύων διαφορετικών τεχνολογιών. Επί της ουσίας οι κόμβοι είναι «πύλες» πλέγματος (mesh “gateways”, ως ανωτέρω παράγραφος 3.2).

β. «Παράδοση» (“handover”): Μηχανισμός στο εσωτερικό ενός κόμβου, όπου μεταφέρονται τα δεδομένα μεταξύ ακροδεκτών διαφορετικών δικτύων διατηρώντας σταθερή την ροή δεδομένων. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται αδιατάρακτη (seamless) επικοινωνία.

γ. Ταξινόμηση και ιεράρχηση πληροφοριών - Δεδομένων: Λειτουργία που έχει στόχο την βέλτιστη κατανομή του φάσματος (bandwidth) στους χρήστες του δικτύου.

δ. Κυκλοφοριακή μηχανική: Στόχο έχει να συγκεντρώνει τις θέσεις και την κίνηση των κόμβων, καθώς και τους μεταξύ τους



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

διαθέσιμους διαύλους επικοινωνίας, ώστε να διαχειρίζεται με τον βέλτιστο τρόπο την δρομολόγηση των δεδομένων στην μεταξύ τους επικοινωνία.

ε. Συμπίεση πακέτων: Σκοπός της εν λόγω λειτουργίας είναι να μειώσει το μέγεθος των πακέτων και να αυξήσει την ταχύτητα επικοινωνίας.

στ. Πρόγνωση συνθηκών διάδοσης Η/Μ ακτινοβολίας (prediction of radio propagation model): Με αυτήν την λειτουργία επιτυγχάνεται η εκτίμηση/ πρόγνωση για την αναμενόμενη εμβέλεια των κόμβων και επομένως υπολογίζονται οι διαθέσιμοι τρόποι επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών ανάλογα με την μεταξύ τους απόσταση και τις συνθήκες διάδοσης.

2. Στην βασική του διαμόρφωση, το ΝΑΔΠ αποτελείται από τα ακόλουθα:

α. Επίγειοι Δορυφορικοί Σταθμοί – ΕΔΣ (Ground Satellite Stations - GSS): Λειτουργούν όταν το ΝΑΔΠ αξιοποιεί δορυφορική ζεύξη. Πρόκειται για τους σταθμούς μετατροπής και αναδιαβίβασης των δορυφορικών επικοινωνιών σε επίγειες και αντίστροφα.

β. Αριθμός σταθμών - κόμβων στην ξηρά, στην θάλασσα και στον ουρανό. Κάθε κόμβος ενσωματώνει συνήθως συνδυασμό από 2 τουλάχιστον διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνίας.

γ. Οι ζεύξεις επικοινωνιών που διασυνδέουν τα ανωτέρω ως εξής:

(1) Δορυφορικές επικοινωνίες πλοίου – ξηράς.

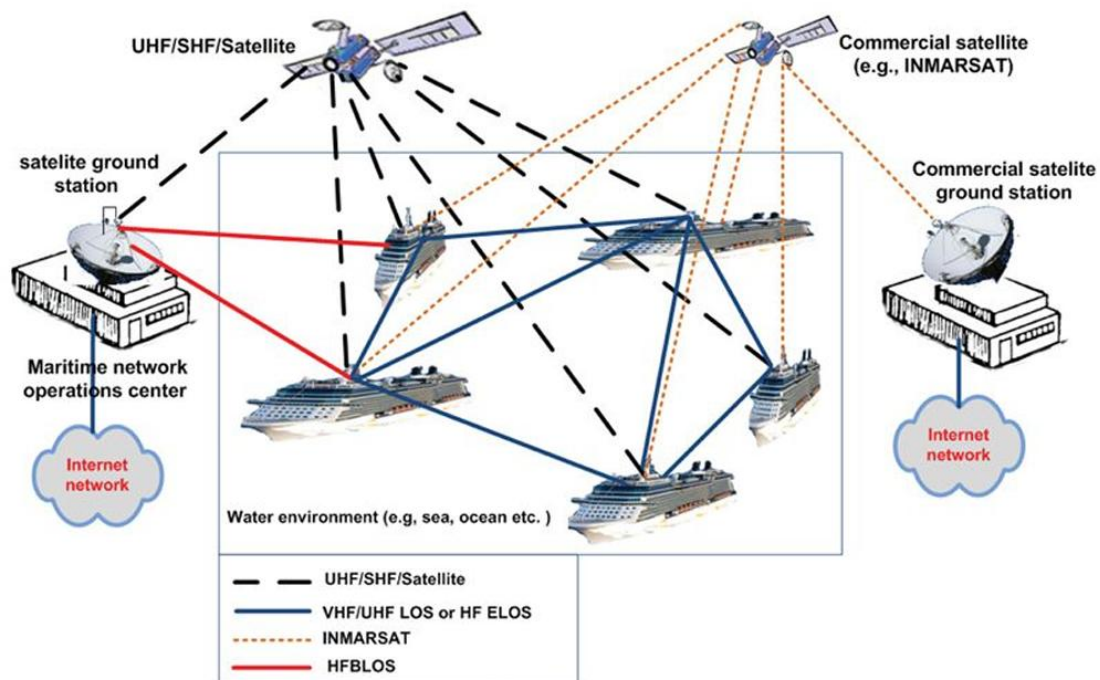
(2) Επίγειες επικοινωνίες “legacy” πέραν του ορίζοντα (Beyond Line of Sight – BLOS), όπως MF / HF.

(3) Επίγειες επικοινωνίες “legacy” ευθύγραμμης διάδοσης (Line of Sight – LOS), όπως VHF / UHF.

δ. Πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας (IEEE 802.11 και 802.16), με τα οποία λειτουργεί το δίκτυο ώστε να ενσωματώνει τα πλεονεκτήματα των ΑΔΠ.



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”



Εικόνα 4 - Ναυτικό Ασύρματο Δίκτυο Πλέγματος, Βασισμένο σε Δορυφόρους

3. Τα πλεονεκτήματα των ΝΑΔΠ, συνοψίζοντας τα προαναφερθέντα, είναι τα ακόλουθα:

α. Δυναμική επιλογή δικτύου επικοινωνίας. Ενδεικτικές εφαρμογές είναι οι εξής:

(1) Εάν ένα πλοίο θέλει να επικοινωνήσει με την ξηρά και ευρίσκεται στην εμβέλεια ευθύγραμμης διάδοσης (LOS) ενός σταθμού ξηράς, εκπέμπει κατευθείαν προς την ξηρά. Διαφορετικά, επικοινωνεί με την ξηρά μέσω πλοίων ή πλωτών σημαντήρων, που βρίσκονται στην εμβέλειά του και διαδοχικά καλύπτουν την εμβέλεια έως τον σταθμό ξηράς (multi – hop communication) από την συντομότερη διαδρομή. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει άλλος επίγειος κόμβος στην εμβέλειά LOS, τότε επικοινωνεί είτε μέσω HF, είτε μέσω δορυφόρων.

(2) Μία ομάδα πλοίων, τα οποία βρίσκονται μεταξύ τους στην εμβέλεια LOS, ανά δύο τουλάχιστον, επικοινωνούν σε «κλειστό» δίκτυο, μόνο με επικοινωνίες LOS.

β. Αύξηση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας.

γ. Αύξηση της εμβέλειας και της ταχύτητας (data rate).



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

4.3 Ενδεικτικές Εφαρμογές - Παραδείγματα

1. Υπάρχει αριθμός παραδειγμάτων εφαρμογής ΑΔΠ στην Ναυτιλία για τις εφαρμογές της ανωτέρω παραγράφου. Ενδεικτικά, αναφέρουμε τα κάτωθι:

α. Παραμετρική παρακολούθηση του εσωτερικού ενός πλοίου μέσω αισθητήρων καθώς και έλεγχος θέσης των μελών του πληρώματος για λόγους ασφαλείας.¹⁵

β. Επικοινωνία μεταξύ πλοίων σε κοντινές αποστάσεις κατά την διάρκεια συντονισμένων δραστηριοτήτων.¹⁶

γ. Λύσεις ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο για λόγους αναψυχής του πληρώματος.¹⁷

δ. Παρακολούθηση (tracking) και επικοινωνία μεταξύ των μελών του πληρώματος για λόγους ασφαλείας, όταν το πλοίο ευρίσκεται ελλιμενισμένο, όπου συνήθως απενεργοποιούνται τα συμβατικά εγκατεστημένα συστήματα εσωτερικής επικοινωνίας (μελέτη περίπτωσης επί πολεμικού πλοίου των ΗΠΑ).¹⁸

ε. Επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων, μεταξύ ναυτικών μονάδων, με σκοπό την επίγνωση τακτικής κατάστασης (tactical situational awareness).¹⁹

2. Στο σημείο κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ότι η Ελληνική Ναυτιλία είναι πρωτοπόρος στην εγκατάσταση ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε πλοία με σκοπό, είτε την έρευνα, είτε την πρακτική εφαρμογή. Τα εν λόγω δίκτυα έχουν ενσωματωθεί σε σύστημα ΔτΠ για την παραμετρική παρακολούθηση μηχανημάτων και την αξιοποίηση των μετρήσεων με Τεχνητή Νοημοσύνη (TN). Εν τούτοις, δεν έχει κοινοποιηθεί ποίο είδος δικτύου/ πρωτοκόλλου έχουν χρησιμοποιήσει για την υλοποίησή αυτών των δικτύων.²⁰

¹⁵ ScanReach, (Όπως διαβάστηκε στις 27 Ιαν 26)

¹⁶ Seatronics SeaMESH, (Όπως διαβάστηκε στις 27 Ιαν 26)

¹⁷ GMTS Group, (Όπως διαβάστηκε στις 27 Ιαν 26)

¹⁸ In-Port Shipboard Communications, (Όπως διαβάστηκε στις 03 Φεβ 26)

¹⁹ L3Harris, “MANTAWARE”, (Όπως διαβάστηκε στις 03 Φεβ 26)

²⁰ ΝΑΥΤΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ, «Τριμερής Σύμπραξη», (01 Δεκ 23), ΝΑΥΤΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ, «METIS Ship Connect», (02 Δεκ 20), I. Filippopoulos et al., "Live Vessels' Monitoring", (2022), R. O. Dwyer, «Thenamaris Adds Starlink to Vessel Fleet», (14 Μαΐ 24)



5 Παρουσίαση Μελέτης Περίπτωσης Μίας Κατηγορίας ΑΔΠ – “Zigbee”

5.1 Εισαγωγή²¹

1. Το “Zigbee” είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα είδη των ΑΔΠ, που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του, όπως αναφέρθηκαν στο 3^ο και 4^ο Κεφάλαιο, με έμφαση στην ευκολία εγκατάστασης - επέκτασης, στην αυτοδιαμόρφωση -αυτοϊαση, στο χαμηλό κόστος εγκατάστασης, στην χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και στην αξιόπιστη λειτουργία σε εφαρμογές αυτοματισμού, ΔτΠ και αισθητήρων. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας καθιστά το Zigbee επίσης κατάλληλο για χρήση συσκευών με συσσωρευτές και για εφαρμογές στις οποίες ο κόμβος λειτουργεί για περιορισμένα χρονικά διαστήματα. Όταν η συσκευή δεν εκτελεί κάποια λειτουργία, μεταπίπτει σε κατάσταση «ύπνου» εξοικονομώντας ενέργεια.

5.1.1 Γενικά για το “Zigbee”

Κάποια βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του Zigbee, είναι τα ακόλουθα:²²

α. Φάσμα Συχνοτήτων:

- (1) 2.4 GHz (παγκόσμια χρήση),
- (2) 868 MHz (μόνο στην Ευρώπη)
- (3) 915 MHz (χρήση κυρίως στην Β. Αμερική και Ν.

Αμερική αλλά γενικά στις περιοχές εκτός Ευρώπης)

β. Μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης (bitrate): ~250 kbps

γ. Δύο κατηγορίες ταυτοποίησης κόμβων- συσκευών: Με διεύθυνση μήκους 16-bit (σύντομη) ή 64-bit.

δ. Ο μέγιστος αριθμός κόμβων σε ένα δίκτυο εξαρτάται από το μήκος της διεύθυνσης ταυτοποίησης κάθε κόμβου:

²¹ Wang C. et al., “Zigbee Network Protocols and Applications” 2014,

Farahani S., “Zigbee Wireless Networks and Transceivers”, 2008

²² A. Tomar, “Introduction to Zigbee Technology”, (Ιουλ 11),



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

- (1) Έως 64.000 συσκευές περίπου με σύντομη διεύθυνση (μήκος 16-bit) κόμβων - συσκευών²³,
- (2) Αριθμός κόμβων ουσιαστικά χωρίς περιορισμό όταν χρησιμοποιούν διεύθυνση μήκους 64-bit (περίπου $1,8 * 10^{19}$ κόμβοι),
 - ε. Ισχύς εκπομπής: ~ 1 mWatt.
 - στ. Ονομαστική εμβέλεια: 10 – 100 μ.

5.1.2 Είδη Συσκευών και Λειτουργιών (Κόμβων)

1. Το “Zigbee”, υιοθέτησε το πρότυπο IEEE 802.15.4. Τα είδη συσκευών – κόμβων που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την «συνεργασία» ακολουθούν την κατηγοριοποίηση των κόμβων πλέγματος (παρά.3.2) με διαφορετική όμως ονομασία. Επιπρόσθετα, στο δίκτυο Zigbee, ο πρώτος κόμβος- δρομολογητής που θα ενεργοποιηθεί, αναλαμβάνει αυτόματα καθήκοντα «συντονιστή» του δικτύου.

2. Τα είδη των συσκευών που χρησιμοποιούνται στο IEEE 802.15.4 - Zigbee είναι τα εξής:

α. Συσκευές Πλήρους Λειτουργικότητας - ΣΠΛ (Full Function Device- FFD): Είναι συσκευές που μπορούν να εκτελέσουν όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες σε ένα δίκτυο, όπως θα εξηγηθεί στην συνέχεια.

β. Συσκευές Μειωμένης Λειτουργικότητας - ΣΜΛ (Reduced Function Device - RFD): Συσκευές μειωμένων δυνατοτήτων, συγκριτικά με τις ΣΠΛ, οι οποίες προορίζονται για περιορισμένες λειτουργίες.

3. Μία ΣΠΛ σε ένα δίκτυο “Zigbee” μπορεί να έχει μία από τις τρεις (3) παρακάτω λειτουργίες:

α. Συντονιστής δικτύου (Zigbee coordinator). Σε κάθε δίκτυο Zigbee πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον μία (1) ΣΠΛ, η οποία θα επωμιστεί αυτήν την λειτουργία. Ο συντονιστής εκτελεί τα κάτωθι έργα:

(1) Αναθέτει την διεύθυνση - ταυτότητα σε κάθε κόμβο- συσκευή του δικτύου.

(2) Ξεκινάει, τερματίζει και αναδιαβιβάζει τα δεδομένα στο δίκτυο.

²³ Μήκος διεύθυνσης μίας συσκευής εννοούμε το πλήθος των χαρακτήρων που συνθέτουν έναν μοναδικό αριθμό, ο οποίος θα αντιστοιχεί σε αυτήν, ώστε να εντοπίζεται στο δίκτυο.



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

(3) Καθορίζει την διεύθυνση – ταυτότητα του δικτύου για την επικοινωνία με άλλα δίκτυα.

β. Δρομολογητής (Zigbee router). Σε αυτήν την λειτουργία, η ΣΠΛ επικοινωνεί με άλλους κόμβους με σκοπό την δρομολόγηση - αναδιαβίβαση πακέτων.

γ. Τερματική Συσκευή (Zigbee end-device). Όσες ΣΠΛ δεν έχουν την λειτουργία του συντονιστή ή του δρομολογητή, εκτελούν την λειτουργία της τερματικής συσκευής. Μία ΣΜΛ μπορεί να εκτελέσει μόνο την λειτουργία Τερματικής Συσκευής (Zigbee end device) και επικοινωνεί μόνο με μία ΣΠΛ. Η τερματική συσκευή δεν κάνει αναδιαβίβαση - δρομολόγηση, μόνο εκπομπή - λήψη πακέτων.

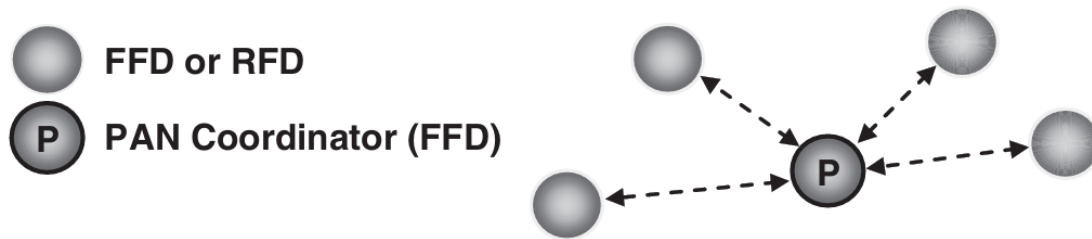
4. Η λειτουργία του συντονιστή δικτύου δεν υφίσταται στις γενικές λειτουργίες των δικτύων πλέγματος, ενώ οι υπόλοιπες λειτουργίες του Zigbee (δρομολογητής, τερματική συσκευή) αντιστοιχούν σε λειτουργίες δικτύων πλέγματος (δρομολογητής και πελάτης πλέγματος).

5.1.3 Είδη Τοπολογίας - Αρχιτεκτονικής

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 λειτουργεί με τις ακόλουθες τρεις (3) παραλλαγές της αρχιτεκτονικής κορμού (παρά.3.4.2):

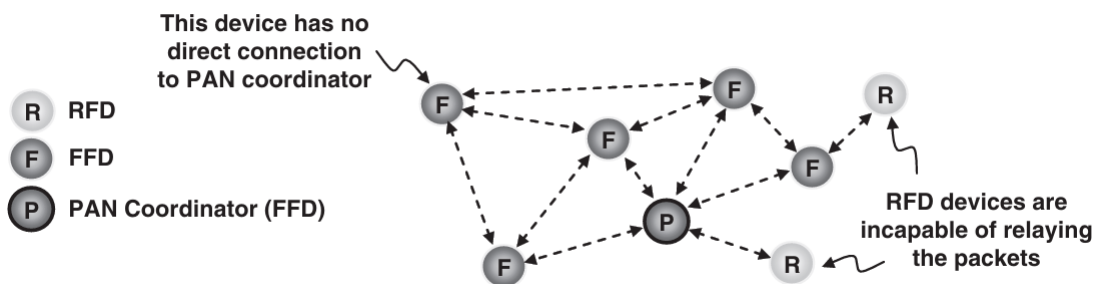
α. «Αστέρας»: Το σύνολο των κόμβων ενός δικτύου με αυτήν την διάταξη επικοινωνούν μόνο με τον κόμβο – ΣΠΛ που έχει την λειτουργία του συντονιστή δικτύου. Οι υπόλοιποι κόμβοι, πλην του συντονιστή, μπορεί να είναι ΣΠΛ ή ΣΜΛ και επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του συντονιστή. Το πλεονέκτημα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η απλότητα, αλλά το μειονέκτημα της είναι ότι σε περίπτωση αστοχίας του κόμβου – συντονιστή, εάν δεν υφίσταται άλλη ΣΠΛ, καταρρέει το δίκτυο.²⁴

²⁴ Στην περίπτωση αστοχίας του κόμβου – Συντονιστή δικτύου σε δίκτυο όπου υπάρχουν κι άλλες ΣΠΛ, η επιλογή της ΣΠΛ, που θα αναλάβει αυτήν την λειτουργία καθορίζεται σύμφωνα με αλγόριθμο που πρέπει να έχει προτοποθετηθεί στο δίκτυο.



Εικόνα 5 - Αρχιτεκτονική Αστέρα²⁵

β. «Ομότιμων» (peer-to-peer): Οι κόμβοι – ΣΠΛ μπορούν να επικοινωνούν χωρίς περιορισμό με όποιον κόμβο είναι στην εμβέλειά τους. Οποιαδήποτε εκ των ΣΠΛ μπορεί να καθορισθεί συντονιστής δικτύου, η πρώτη που θα ενεργοποιηθεί. Εάν υπάρχει ΣΜΛ, αυτή μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο και να επικοινωνεί μόνο με μία ΣΠΛ (συντονιστής ή δρομολογητής). Το πλεονέκτημα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η ευελιξία, η εναλλαξιμότητα και η δυνατότητα επέκτασης της εμβέλειας του δικτύου. Το μειονέκτημα είναι ότι η επέκταση του δικτύου επηρεάζει αρνητικά την καθυστέρηση λήψης (latency).



Εικόνα 6 - Αρχιτεκτονική Ομότιμων²⁶

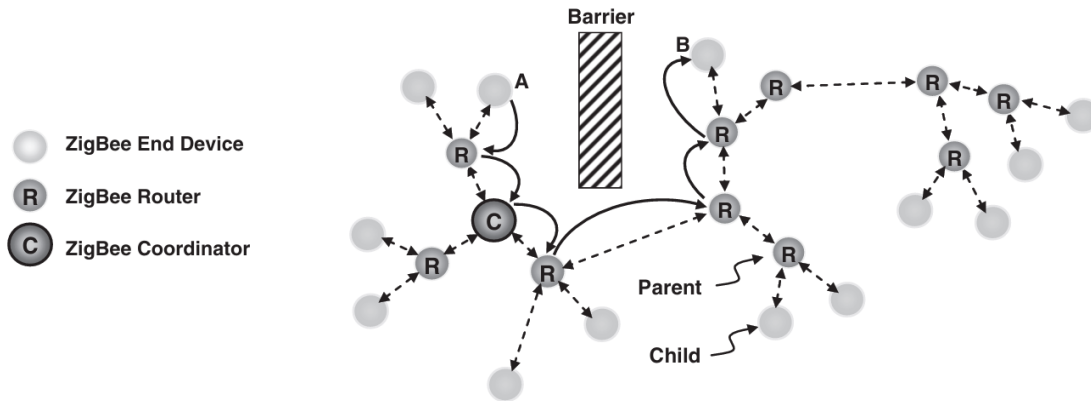
γ. «Δένδρου» / Συστάδων (tree/ cluster): Το δίκτυο συνδυάζει τα χαρακτηριστικά της ομότιμης αρχιτεκτονικής με αυτά του «αστέρα». Συγκεκριμένα, ο κόμβος – συντονιστής, συνδέεται με μία σειρά ΣΠΛ - δρομολογητές («κλαδιά» του δένδρου), σε κάποιους εκ των οποίων συνδέεται αριθμός ΣΜΛ («φύλλα» του δένδρου). Το πλεονέκτημα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η δυνατότητα υπερκέρρασης

²⁵ Farahani S., “Zigbee Wireless Networks and Transceivers”, ISBN: 978-0-7506-8393-7, Newnes, Elsevier, USA, 2008

²⁶ Farahani S., “Zigbee Wireless Networks and Transceivers”, 2008



εμποδίων, ιδιαίτερα ωφέλιμη στην ναυτιλία. Το μειονέκτημα είναι όμοιο με αυτό της αρχιτεκτονικής ομοτίμων.



Εικόνα 7 - Αρχιτεκτονική «Δένδρου»

5.2 Μελέτη Περίπτωσης – Εκτέλεση των Δοκιμών

1. Θα ακολουθήσει η εξέταση μίας μελέτης περίπτωσης (case study), κατά την οποία έγινε διαδοχικά εγκατάσταση ΑΔΠ “Zigbee” σε δύο ξεχωριστά Ε/Γ – Ο/Γ (ferry).²⁷ Σε αμφότερες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο IEEE 802.15.4/ Zigbee για την υλοποίηση του δικτύου. Ακολουθούν κάποια βασικά στοιχεία για τα εν λόγω πλοία.²⁸

α. Armorique:

- (1) Τύπος: Ε/Γ – Ο/Γ (Ro-Ro/ Passenger)
- (2) Διαστάσεις: Μήκος 165 μ – πλάτος 26.8μ

²⁷ H. Kdouh et al. “ZigBee-Based Sensor Network for Shipboard Environments”, (Αυγ 11)

²⁸ “Armorique Overview”, (Όπως διαβάστηκε την 05 Φεβ 26),
“Acadie Overview”, (Όπως διαβάστηκε την 05 Φεβ 26),



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”



Εικόνα 8 – Ε/Γ – Ο/Γ “Armorique”²⁹

β. Acadie:

- (1) Τύπος: Ε/Γ – Ο/Γ (Ro-Ro/ Passenger)
- (2) Διαστάσεις: Μήκος 45 μ – πλάτος 10.12μ



Εικόνα 9 – Ε/Γ – Ο/Γ “Acadie”³⁰

2. Ο σκοπός της μελέτης ήταν να εξετασθεί η εφικτότητα της λειτουργίας του εν λόγω προτύπου στους εσωτερικούς χώρους ενός πλοίου μετρώντας ταυτόχρονα την επίδραση περισσότερων συγκριτικά με προγενέστερες μελέτες παραγόντων όπως:

²⁹ “Armorique Overview”, (Όπως διαβάστηκε την 05 Φεβ 26)

³⁰ “Acadie Overview”, (Όπως διαβάστηκε την 05 Φεβ 26)



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

- α. Καιρικές συνθήκες
- β. Κίνηση του πλοίου στην ανοιχτή θάλασσα
- γ. Συνδυασμός οριζόντιων – κατακόρυφων στεγανών
- δ. Μηχανήματα σε λειτουργία
- ε. Παρουσία – μετακινήσεις μεγάλου αριθμού επιβατών
- στ. Παρουσία - κίνηση οχημάτων
- ζ. Ασύρματο δίκτυο (wi-fi) για σκοπούς αναψυχής των επιβατών (πρόσβαση στο διαδίκτυο).

3. Το αντικείμενο των δοκιμών σε κάθε πλοίο ήταν διαφορετικό, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών στο πρώτο πλοίο (“Armorique”) αξιοποιήθηκαν για την υλοποίηση των δοκιμών στο δεύτερο (“Acadie”). Οι μετρήσεις και οι δοκιμές εκτελέστηκαν ως εξής:

α. Στο πρώτο πλοίο (“Armorique”): Κατά την διάρκεια δρομολογίων αναψυχής διασχίζοντας την θαλάσσια περιοχή μεταξύ βόρειας Γαλλίας (Roscoff) και νότιας Αγγλίας (Plymouth).

β. Στο δεύτερο πλοίο (“Acadie”): Κατά την διάρκεια ελλιμενισμού.

5.2.1 Πρώτη Δοκιμή (Πλοίο “Armorique”) - Συμπεράσματα

1. Οι δοκιμές στο πρώτο πλοίο αφορούσαν στην μέτρηση και ανάλυση μετρήσεων ισχύος σήματος, ανά ζεύγη (πομπός – δέκτης), στους εσωτερικούς χώρους του πλοίου διαδοχικά. Συνολικά έγιναν μετρήσεις σε 110 σημεία σε όλα τα καταστρώματα. Στην συνέχεια, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με ένα εμπειρικό μοντέλο πρόγνωσης απώλειας ισχύος, που έχει υιοθετηθεί για μετρήσεις σε εσωτερικούς χώρους σε προγενέστερες μελέτες.

2. Αρχικά, έγιναν μετρήσεις σε κάθε κατηγορία καταστρώματος ξεχωριστά (μηχανοστάσιο, χώροι στάθμευσης, χώροι αναψυχής επιβατών, διαμερίσματα ανάπαυσης επιβατών), όπου η θέση του πομπού ήταν σταθερή, ενώ άλλαζε η θέση του δέκτη. Στην συνέχεια έγιναν μετρήσεις μεταξύ διαδοχικών καταστρωμάτων, όπου άλλαζε η θέση του πομπού και του δέκτη.

3. Τα συμπεράσματα της ανάλυσης των μετρήσεων συνοψίζονται στα ακόλουθα:



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

α. Η επικοινωνία μεταξύ δύο διαμερισμάτων είναι ικανοποιητική όταν η ενδιάμεση στεγανή θύρα είναι ανοικτή. Όταν η θύρα όμως ασφαλίζει, παρουσιάζεται σημαντική εξασθένηση. Συνεπώς, για να εξασφαλισθεί η επικοινωνία σε κάθε περίπτωση, προτείνεται η τοποθέτηση επιπλέον κόμβων εκατέρωθεν της θύρας.

β. Στον χώρο στάθμευσης οχημάτων η επικοινωνία ήταν ικανοποιητική, είτε τα οχήματα ήταν ακίνητα (σταθμευμένα) είτε εν κινήσει (κατά την είσοδο – έξοδο οχημάτων). Στην δεύτερη περίπτωση διαπιστώθηκε μεγαλύτερη διακύμανση στην εξασθένηση, λόγω της μεταβαλλόμενης επίδρασης των κινούμενων οχημάτων στην άμεση ορατότητα μεταξύ πομπού – δέκτη.

γ. Στους χώρους διασκέδασης, με ταυτόχρονη παρουσία μεγάλου αριθμού επιβατών και χρήση δικτύου wi-fi, διαπιστώθηκε ότι η ισχύς του σήματος δεν επηρεάζεται από τις μετακινήσεις των επιβατών, όμως επηρεάζεται από το wi-fi όταν ο δέκτης τοποθετείται σε απομακρυσμένες από τον πομπό θέσεις. Επομένως, το wi-fi επηρεάζει την εμβέλεια του Zigbee.

δ. Στους χώρους ανάπαυσης (καμπίνες) διαπιστώθηκε ικανοποιητική ισχύς σε όλο το μήκος του διαδρόμου, παρ' ότι η θύρα του δωματίου, στο οποίο τοποθετήθηκε ο πομπός, ήταν κλειστή. Η ισχύς του σήματος δεν επηρεάστηκε από την μετακίνηση των επιβατών, ενώ διαπιστώθηκε πως τα τοιχώματα των διαδρόμων λειτουργούσαν ως «κυματοδηγού» του σήματος. Θα απαιτηθεί αριθμός κόμβων ανάλογα με την αναμενόμενη εμβέλειά τους και τις διαστάσεις του καταστρώματος.

ε. Στις μετρήσεις μεταξύ διαδοχικών καταστρωμάτων, προτείνεται η τοποθέτηση επιπλέον κόμβων στα κλιμακοστάσια, καθώς είναι το σημείο του καταστρώματος απ' όπου η ισχύς του σήματος «διέρχεται» με την μικρότερη εξασθένηση.

στ. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης των μετρήσεων με το εμπειρικό μοντέλο πρόγνωσης απώλειας ισχύος παρουσίασε μικρές αποκλίσεις.

5.2.2 Δεύτερη Δοκιμή (Πλοίο “Acadie”) - Συμπεράσματα

1. Οι δοκιμές στο δεύτερο πλοίο αφορά στην εγκατάσταση εκτεταμένου δικτύου αισθητήρων στους εσωτερικούς χώρους στο σύνολο των καταστρωμάτων. Είναι σημαντικό το γεγονός ότι το δεύτερο πλοίο είναι αρκετά μικρότερο συγκριτικά με το πρώτο, συγκεκριμένα έχει μήκος 45μ., πλάτος ~10μ., με 4 καταστρώματα έναντι μήκους 165μ., πλάτους~27μ., με 10 καταστρώματα. Λαμβάνοντας υπόψη το



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

ανωτέρω, το εν λόγω δίκτυο κάλυψε τους εσωτερικούς χώρους του πλοίου με 12 κόμβους – αισθητήρες (sensor nodes)³¹ και συνέλλεξε, σε πραγματικό χρόνο, στοιχεία θερμοκρασίας, υγρασίας, έντασης φωτισμού (ambient light), επιτάχυνσης και πίεσης από διαφορετικά διαμερίσματα και καταστρώματα. Τα εν λόγω δεδομένα συγκεντρώθηκαν σε έναν σταθμό βάσης, που συνδέθηκαν στο δίκτυο μέσω ενός επιπλέον κόμβου mesh router με λειτουργία access point (“sink” node). Ο εν λόγω σταθμός βάσης βρισκόταν εντός του διαμερίσματος ελέγχου στο χαμηλότερο κατάστρωμα κοντά στο μηχανοστάσιο.

2. Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα των μετρήσεων στο πρώτο πλοίο, επιλέχθηκε η εγκατάσταση 4 κόμβων στα κλιμακοστάσια, προκειμένου να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα μεταξύ των καταστρωμάτων, ενώ οι στεγανές θύρες παρέμειναν κλειστές.

3. Κάθε κόμβος, εξέπεμπε πακέτα δεδομένων προς τον σταθμό βάσης σε τακτά χρονικά διαστήματα. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι είχαν περισσότερο έργο καθώς δρομολογούσαν τα λαμβανόμενα από τους απομακρυσμένους κόμβους πακέτα και επιπλέον εξέπεμπαν το δικό τους.

4. Τα αποτελέσματα της μέτρησης απόδοσης του δικτύου αφορούν στο ποσοστό των πακέτων που δρομολόγησε ή απέρριψε κάθε κόμβος ανάλογα με την ποιότητα της επικοινωνίας με τους γειτνιάζοντες κόμβους.

5. Τα συμπεράσματα των μετρήσεων συνοψίζονται στα ακόλουθα:

α. Το ποσοστό των απορριφθέντων πακέτων κάθε κόμβου είναι πολύ χαμηλό, εξαιρουμένου του κόμβου στο πιο ψηλό κατάστρωμα (διαμέρισμα πηδαλιούχησης). Ο τελευταίος κόμβος έχει αποδεκτό ποσοστό μεν, υψηλότερο δε, λόγω ιδιαιτερότητας στην επικοινωνία της γέφυρας με το υποκείμενο κατάστρωμα (χωρίς κλιμακοστάσιο).

β. Οι κεντρικοί κόμβοι, οι οποίοι δρομολογούν υψηλό ποσοστό πακέτων, προτείνεται όπως τοποθετούνται εις διπλούν ώστε, σε περίπτωση αστοχίας ενός, να μην αποσυνδεθεί απομακρυσμένο μέρος του δικτύου.

³¹ Το συγκεκριμένο sensor – node πρόκειται για «πύλη» πλέγματος (mesh gateway), τύπου “MicaZ Mote” της εταιρείας “Crossbow Technology”, η οποία συνδέεται ταυτόχρονα με ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (client nodes/ end devices). Τα δεδομένα, που συλλέγονται από τους αισθητήρες, δρομολογούνται στην συνέχεια μέσω του κόμβου προς το δίκτυο. Περισσότερα στοιχεία για την εν λόγω συσκευή βρέθηκαν στις ακόλουθες μελέτες: P. C. Baker et. al, “Data Management of On-Line Partial Discharge Monitoring”, (Νοε 07), H. Sharma et. al, “Online Monitoring”, (Νοε 19)



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

γ. Οι μετακινήσεις του πληρώματος, στα ανώτερα καταστρώματα κυρίως, επηρέασαν την ποιότητα επικοινωνίας μεταξύ των εγγύς κόμβων, γεγονός που προκαλούσε αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου.

5.3 Γενικό Συμπέρασμα Μελέτης Περίπτωσης

Κάνοντας μια γενική αποτίμηση, τα συμπεράσματα κάθε μέτρησης δείχνουν ότι το πρότυπο Zigbee μπορεί να είναι μία καλή επιλογή για την μελλοντική ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου, σε αντικατάσταση του αντίστοιχου ενσύρματου. Επιβεβαιώθηκαν επίσης οι ιδιαιτερότητες και τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης ΑΔΠ επί πλοίου για εφαρμογές, όπως αναλύθηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο.



6 Επίλογος - Συμπεράσματα

1. Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια παρουσίασης των Πρωτοκόλλων Μεταφοράς Δεδομένων, με διαδοχική κλιμάκωση ανάλυσης από το γενικό προς το ειδικό. Συγκεκριμένα, έγινε αναφορά σε βασικά στοιχεία σχετικά με τα Πρωτόκολλα Μεταφοράς Δεδομένων, στην συνέχεια ακολούθησε παρουσίαση μίας κατηγορίας αυτών που αφορούν στα Δίκτυα Πλέγματος και τέλος εξετάστηκε μία μελέτη περίπτωσης σχετικά με ένα είδος δικτύου πλέγματος, το “Zigbee”.

2. Η διαρκής εξέλιξη της τεχνολογίας είναι αποτέλεσμα της δέσμευσης της ερευνητικής και επιστημονικής κοινότητας να υλοποιούν νέες εφαρμογές οι οποίες θα καλύπτουν περισσότερες ανάγκες, με λιγότερη ανθρώπινη παρέμβαση, σε συντομότερο χρόνο και σε χαμηλότερο κόστος. Η αδιάκοπη εξέλιξη των δικτύων μεταφοράς δεδομένων παρουσιάζει συνεχώς νέες λύσεις, με απώτερο στόχο κάθε λύση να συνδυάζει τα επιθυμητά πλεονεκτήματα ανάλογα με την ανάγκη που καλείται να ικανοποιήσει. Είναι μία ατέρμονη διαδικασία που βασίζεται στην ανθρώπινη επιθυμία να αναζητεί πάντα κάτι καλύτερο.

3. Είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει μία λύση που να συνδυάζει όλα τα πλεονεκτήματα, αλλά κάθε κατηγορία δικτύου είναι μία ισορροπία θετικών και αρνητικών στοιχείων έτσι ώστε να ικανοποιεί μία συγκεκριμένη ανάγκη με αποδεκτές και λελογισμένες «απώλειες».

4. Η ενσωμάτωση των Ασυρμάτων Δικτύων Πλέγματος και ειδικά του “Zigbee” στο τομέα της Ναυτιλίας, αντικατοπτρίζει την μετάβαση σε μία εποχή όπου προσωπικό και μέσα πρέπει να λειτουργήσουν με μεγαλύτερη απόδοση και ασφάλεια ισορροπώντας την μεγιστοποίηση του κέρδους, την ελαχιστοποίηση των ανθρωπίνων απωλειών και την προστασία του περιβάλλοντος. Το πλαίσιο και το όριο σε αυτήν την μετάβαση είναι σεβασμός στην ανθρώπινη ζωή και στην φύση.



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

Βιβλιογραφία

1. Aeromesh Systems, “*Industrial Wi-Fi Mesh*”, όπως διαβάστηκε την 12 Φεβρουαρίου 2026,
<https://aeromeshsystems.com/industrial-wifi-mesh-enabling-industry-4-0/>
2. Al-Fuqaha, A. “*Network Models: OSI vs. TCP/IP.*” Western Michigan University, Department of Computer Science, όπως διαβάστηκε την 27 Ιανουαρίου 26,
<https://cs.wmich.edu/alfuqaha/cs5550/lectures/saved/layering.pdf>
3. Communication Technologies - Data Transmission Protocols “*What Are Data Transmission Protocols*”, όπως διαβάστηκε την 06 Φεβρουαρίου 2026,
<https://www.computersciencecafe.com/25-data-transmission-protocols.html>
4. Farahani S., “*Zigbee Wireless Networks and Transceivers*”, ISBN: 978-0-7506-8393-7, Newnes, Elsevier, USA, 2008
5. Global Technology Centre, A. Tomar, “*Introduction to Zigbee Technology*”, Ιούλιος 2011,
<https://community.element14.com/products/devtools/technicallibrary/m/files/9635>
6. GMTS Group, όπως διαβάστηκε στις 27 Ιανουαρίου 2026,
<https://gmts.io/mobile/wifi/>
7. IEEE 802 LMSC, W. Steven Conner et al. “*IEEE 802.11s Tutorial - Overview of the Amendment for Wireless Local Area Mesh Networking*”, Νοέμβριος 2006,
https://www.ieee802.org/802_tutorials/06-November/802.11s_Tutorial_r5.pdf
8. IETF, J. Postel, “*RFC 768: User Datagram Protocol*”, 28 Αυγούστου, 1980,
<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc768>,
9. IETF, J. Iyengar et al., “*RFC 9000: QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport*”, Μάιος 2021,
<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9000>
10. IETF, M. Allman et al., “*RFC 5681: TCP Congestion Control*”, Σεπτέμβριος 2009,
<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5681>
11. IETF, Horowitz, M., & Lunt, S, “*RFC 2228: FTP Security Extensions*”, Οκτώβριος 1997,
<https://www.ietf.org/rfc/rfc2228.txt>
12. IETF, J. Postel, “*RFC 793: Transmission Control Protocol*”, Σεπτέμβριος 1981,



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

- <https://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt>,
13. IETF, S. Corson, J. Macker, “*RFC 2501: Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*”, Ιανουάριος 1999,
<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2501>
 14. IISA, 13th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications, I. Filippopoulos et al., “*Live Vessels’ Monitoring Using Geographic Information and Internet of Things*”, Corfu, Greece, 2022,
<https://www.computer.org/csdl/proceedings-article/iisa/2022/09904408/1H5KuQ8Acec>
 15. IMO, “*Guidelines on Maritime Cyber Risk Management - MSC-FAL.1-Circ.3-Rev.3*” Ιούνιος 2017,
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/MSC-FAL.1-Circ.3-Rev.3.pdf>
 16. In-Port Shipboard Communications, όπως διαβάστηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026,
<https://www.iwtwireless.com/case-studies/in-port-shipboard-communications/>
 17. ISO/IEC, “*ISO/IEC 7498-1: Information Technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model*”. ” International Organization for Standardization, 1994,
<https://www.ecma-international.org/wp-content/uploads/s020269e.pdf>
 18. JMSE, J. Gu et al., “*Evaluation of a Multi-Hop Wireless Internet-of-Things Network on Large Ships*”, 27 Νοεμβρίου 2023,
<https://www.mdpi.com/2077-1312/11/12/2243>
 19. JMSE, C. Pérez-Garrido et al., “*Wireless Remote Monitoring of Toxic Gases in Shipbuilding*”, 14 Φεβρουαρίου 2014,
<https://www.mdpi.com/1424-8220/14/2/2981>
 20. L3Harris, “*MANTAWARE*”, όπως διαβάστηκε στις 3 Φεβρουαρίου 2026,
<https://www.l3harris.com/all-capabilities/mantaware>
 21. MarineTraffic, “*Armorique Overview*”, όπως διαβάστηκε την 5 Φεβρουαρίου 2026,
<https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:50>
 22. MarineTraffic, “*Acadie Overview*”, όπως διαβάστηκε την 5 Φεβρουαρίου 2026,
<https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:172421>



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

23. PyNetLabs, “*Transport Layer Protocols*”, 24 Ιουλίου, 2025,
<https://www.pynetlabs.com/transport-layer-protocols/>,
24. ResearchGate, P. Owczarek, P. Zwierzykowski, “*Routing Protocols In Wireless Mesh Networks - A Comparison and Classification*”, Σεπτέμβριος 2013,
https://www.researchgate.net/publication/257030009_ROUTING_PROTOCOLS_IN_WIRELESS_MESH_NETWORKS_-_A_COMPARISON_AND_CLASSIFICATION
25. ResearchGate, J. Wang, X. Jia, and M. Bahr, “*Routing in Wireless Mesh Networks*”, 07 Δεκεμβρίου 2006,
https://www.researchgate.net/profile/Sundararaj-Iyengar/publication/226601114_Scalability_in_Wireless_Mesh_Networks/links/56bea0308ae24f050990bb9/Scalability-in-Wireless-Mesh-Networks.pdf#page=130
26. ResearchGate, C. Zachos, J. Loo and S. Khan, “*Wireless Mesh Network: Architecture and Protocols*”, Απρίλιος 2016,
https://www.researchgate.net/publication/344845859_Wireless_Mesh_Network_Architecture_and_Protocols
27. ResearchGate, M. Manoufali et al., “*An Overview of Maritime Wireless Mesh Communication Technologies and Protocols*”, Ιανουάριος 2016,
[\(PDF\) An Overview of Maritime Wireless Mesh Communication Technologies and Protocols](#)
28. ResearchGate, H. Kdouh et al. “*ZigBee-Based Sensor Network for Shipboard Environments*”, Αύγουστος 2011,
https://www.researchgate.net/publication/224252094_ZigBee-Based_Sensor_Network_for_Shipboard_Environments
29. ResearchGate, P. C. Baker, S. D. J. McArthur, M. Judd, “*Data Management of On-Line Partial Discharge Monitoring Using Wireless Sensor Nodes Integrated with a Multi-Agent System*”, Νοέμβριος 2007,
https://www.researchgate.net/publication/4315620_Data_Management_of_On-Line_Partial_Discharge_Monitoring_Using_Wireless_Sensor_Nodes_Integrated_with_a_Multi-Agent_System,
30. ResearchGate, H. Sharma and V. K. Sachan, “*Online Monitoring Inside a Building Based on Energy Efficient Wireless Sensor Network*”, Νοέμβριος 2019,



“Αλέξανδρος Θ. Πρωτόπαπας”,
“Τα Πρωτόκολλα Πλέγματος (“Mesh” Protocols) για Δίκτυα Δεδομένων
Πλοίου – Μελέτη Περίπτωσης (Case Study): Το Πρωτόκολλο Zigbee”

- https://www.researchgate.net/publication/337487237_Online_Monitoring_Inside_a_Building_Based_on_Energy_Efficient_Wireless_Sensor_Network
31. Rfc-editor, W. Eddy, “RFC 9293: Transmission Control Protocol (TCP)”,
Αύγουστος 2022,
<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9293.html>
 32. ScanReach, όπως διαβάστηκε στις 27 Ιανουαρίου 2026,
<https://scanreach.com/about>
 33. ScienceDirect, I. F. Akyildiz et al, “Wireless Mesh Networks: a Survey”, Ιανουάριος
2005,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128604003457>
 34. Seatronics SeaMESH, όπως διαβάστηκε στις 27 Ιανουαρίου 2026,
<https://rts.as/product/seatronics-seamesh/>
 35. Smart Maritime Network, R. O. Dwyer , «Thenamaris Adds Starlink to Vessel
Fleet», 14 Μαΐου 2024,
<https://smartmaritimenetwork.com/2024/05/14/thenamaris-adds-starlink-to-vessel-fleet/>
 36. Wang C. et al., “Zigbee Network Protocols and Applications”, ISBN: 978-1-4398-
1602-8 (eBook - PDF), AUERBACH, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014
 37. NAYTIKA ΧΡΟΝΙΚΑ, Ελληνική Ναυτιλία, «Τριμερής Σύμπραξη Ανοίγει τον
Δρόμο για την Προώθηση της Έξυπνης Ναυτιλίας», 01 Δεκεμβρίου 2023,
<https://www.naftikachronika.gr/2023/12/01/trimeris-sympraxi-anoigei-ton-dromo-gia-tin-proothisi-tis-exypnis-naftilias/>,
 38. NAYTIKA ΧΡΟΝΙΚΑ, Ναυτιλιακή Αγορά, Τεχνολογία, «METIS Ship Connect:
Αυτοματοποιημένη Επίβλεψη της Λειτουργίας Πλοίων», 02 Δεκεμβρίου 2020,
<https://www.naftikachronika.gr/2020/12/02/metis-ship-connect-aftomatopoiimeni-epivlepsi-tis-leitourgias-ploion/>