



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ: ΕΥΦΥΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ

**Αποδοτική Μετάδοση Μεγάλων Δεδομένων σε Ασύρματα
Δίκτυα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Κωνσταντινιάς Καρυδάκη

Επιβλέπων : Επ. Καθηγητής Σκούτας Δημήτριος

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Αν. Καθηγητής Γκουμόπουλος Χρήστος
Καθηγητής Κορμέντζας Γεώργιος

Σάμος, Ιούνιος 2023

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

«ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ»

“Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και δηλώνω ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω αναφέρει τις πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία.”

Όνομα και επώνυμο συγγραφέα

Κωνσταντινιά Καρυδάκη

Ημερομηνία

17/07/2023

Υπογραφή



Πρόλογος και ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο ΠΜΣ «Διαδίκτυο των Πραγμάτων: Ευφυή Δίκτυα σε Περιβάλλοντα Νέας Γενιάς» του τμήματος Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου του Αιγαίου.

Κατά την διάρκεια των σπουδών μου καθοριστική ήταν η συμβολή των καθηγητών μου στα γνωστικά αντικείμενα του ΠΜΣ και οφείλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για τις γνώσεις, την υπομονή και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Δημήτριο Σκούτα, για την επιστημονική και συμβουλευτική του καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες στον αγαπητό μου φίλο και κυρίως πρότυπο ζωής Νικολή, στους συνοδοιπόρους αυτού του ΠΜΣ και πλέον αγαπητούς φίλους Γιώργο Π., Δημήτρη Τ. και Θάνο Α., αλλά και στην οικογένεια μου επί γης και ουρανού για την υποστήριξη, τη συμπαράσταση και την υπομονή που υπέδειξαν όλο αυτό το διάστημα.

*Αφιερωμένη στον μπαμπά μου Κωνσταντίνο και στον αδερφό μου Κύριλλο που
έφυγαν νωρίς...*

© 2023

της

Κωνσταντινιά Καρυδάκη

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Τα Μεγάλα Δεδομένα στην σύγχρονη εποχή και τα προβλήματα μετάδοσης τους στα Ασύρματα Δίκτυα	1
1.2	Αντικείμενο διπλωματικής	2
1.3	Δομή της διπλωματικής	2
2	Μεγάλα Δεδομένα	4
2.1	Ιστορική αναδρομή ΜΔ	4
2.2	Ορισμοί ΜΔ	6
2.3	Χαρακτηριστικά ΜΔ	7
2.4	Τύποι ΜΔ	7
2.5	Τεχνολογίες	12
2.6	Εφαρμογές	20
2.7	Ανάλυση ΜΔ	21
2.8	ΜΔ και Υπολογιστικό Νέφος	26
3	Ασύρματα Δίκτυα	28
3.1	Ιστορική Αναδρομή Ασύρματων Δικτύων	28
3.2	Βασικές Αρχές Ασύρματων Επικοινωνιών	30
3.3	Ασύρματες Τεχνολογίες	31
3.4	Κυψελωτά Δίκτυα	38
3.5	Εφαρμογές	47
3.6	Ad Hoc	49
4	Προβλήματα Ασύρματης Μετάδοσης	51
4.1	Περιορισμοί εύρους ζώνης	52
4.2	Παρεμβολές και ποιότητα σήματος	54
4.3	Προβλήματα ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής	56
4.4	Επεκτασιμότητα και ετερογένεια του δικτύου	59
4.5	Ενεργειακή απόδοση	62
4.6	Επίδραση ΜΔ στην ασύρματη μετάδοση	65
5	Αποδοτική μετάδοση	67
5.1	Τμηματοποίηση ΜΔ και παράλληλη μετάδοση	67
5.2	Τεχνικές συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων	72
5.3	Στρατηγικές καταναεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης	77

5.4	Υβριδικές λύσεις ενσύρματου-ασύρματου δικτύου	83
5.5	Δικτύωση καθορισμένη από λογισμικό	87
6	Συγκρίσεις Απόδοσης	92
6.1	Κριτήρια αξιολόγησης αποδοτικής μετάδοσης ΜΔ	92
6.2	Συγκριτική ανάλυση των μεθοδολογιών - αλγορίθμων.....	94
6.3	Συζήτηση των ευρημάτων	106
7	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις	110
7.1	Συμπεράσματα.....	110
7.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	111
	Βιβλιογραφία	113

Λίστα Σχημάτων

Εικόνα 2.1 Τύποι Μεγάλων Δεδομένων [10]	8
Εικόνα 2.2 Αρχιτεκτονική Hadoop [16]	13
Εικόνα 2.3 Τρόπος λειτουργίας Apache MapReduce [18]	15
Εικόνα 2.4 Αρχιτεκτονική Apache Hive [21]	17
Εικόνα 2.5 Αρχιτεκτονική Zookeeper [25]	19
Εικόνα 2.6 Βήματα ανάλυσης ΜΔ [27]	22
Εικόνα 3.1 Ιστορική ανασκόπηση Ασύρματων Δικτύων [30]	29
Εικόνα 3.2 Μοντέλο ασύρματης επικοινωνίας [31]	30
Εικόνα 3.3 Τύποι ασύρματων δικτύων [32]	32
Εικόνα 3.4 Δίκτυο WPAN [34]	34
Εικόνα 3.5 Δίκτυο WLAN [36]	35
Εικόνα 3.6 Δίκτυο WMAN [36]	36
Εικόνα 3.7 Δίκτυο WWAN [39]	37
Εικόνα 3.8 Κυψελωτό Δίκτυο [41]	39
Εικόνα 3.9 Αρχιτεκτονική 2G, 2.5G, 3G και 4G δικτύων [43]	41
Εικόνα 3.10 Δίκτυο 4G [46]	44
Εικόνα 3.11 Δίκτυο 5G [48]	45
Εικόνα 3.12 Δίκτυο Ad hoc [51]	50
Εικόνα 4.4.1 Περιορισμοί και προβλήματα ασύρματης μετάδοσης	51
Εικόνα 5.1 Αρχιτεκτονική αλγορίθμων κατακερματισμού [55]	68
Εικόνα 5.2 Τρόπος δρομολόγησης με Round-Robin τμηματοποίηση [57]	72
Εικόνα 5.3 Διαφορές συμπίεσης δεδομένων με και χωρίς απώλειες [59]	73
Εικόνα 5.4 Ανίχνευση bit σφάλματος με τους κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων [62]	75
Εικόνα 5.5 Προσωρινή αποθήκευση δεδομένων σε Edge συσκευές [65]	78
Εικόνα 5.6 Αρχιτεκτονική προσωρινής αποθήκευσης με βάση το περιεχόμενο (CDN) [67]	80
Εικόνα 5.7 Αρχιτεκτονική συνεργατικής προσωρινής αποθήκευσης σε ένα δίκτυο τηλεφώνου [69]	81
Εικόνα 5.8 Υβριδική δρομολόγηση για μεταφορά δεδομένων [70]	83
Εικόνα 5.9 Τρόπος λειτουργίας του HARQ [71]	85
Εικόνα 5.10 Δυναμική επιλογή δικτύου στα ασύρματα δίκτυα [73]	86
Εικόνα 5.11 Μετάδοση πολλαπλών διαδρομών [74]	87
Εικόνα 5.12 Αρχιτεκτονική SDN [76]	87
Εικόνα 5.13 Διαφορές εφαρμογής QoS και μη για μεταφορά δεδομένων [77]	89
Εικόνα 5.14 Επιλογή τύπου διαμόρφωσης με την μέθοδο AMC [80]	91

Ακρωνύμια

ΜΔ	Μεγάλα Δεδομένα
IoT	Internet-of-Things
NLP	Natural Language Processing
XML	eXtensible Markup Language
JSON	JavaScript Object Notation
HTML	Hypertext Markup Language
HDFS	Hadoop Distributed File System
YARN	Yet Another Resource Negotiator
API	Advanced Programming Interface
AP	Access Point
NIC	Network Interface Card
RF	Radio Frequency
QoS	Quality of Service
SDN	Software-Defined Network
CDN	Content Delivery Network
DHT	Dynamic Hash Table
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
DNS	Dynamic Network Selection
AMC	Adaptive Modulation and Coding
TE	Traffic Engineering
CCN	Content-Centric Networking
BWT	Burrows-Wheeler
LZW	Lempel-Ziv-Welch
RLE	Run-Length Encoding

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην αποτελεσματική μετάδοση μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Η έρευνα διερευνά βασικές πτυχές που σχετίζονται με αυτό το θέμα, συμπεριλαμβανομένων των προκλήσεων και των χαρακτηριστικών των μεγάλων δεδομένων, της ανάλυσης των ασύρματων δικτύων και του εντοπισμού των προβλημάτων που σχετίζονται με την ασύρματη μετάδοση. Η διατριβή παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση μεθοδολογιών και αλγορίθμων για την αποτελεσματική μετάδοση σε ασύρματα δίκτυα. Τα θέματα που εξετάζονται περιλαμβάνουν μεθόδους τμηματοποίησης και παράλληλης μετάδοσης δεδομένων, τεχνικές συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων, στρατηγικές κατανομής αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης, υβριδικές λύσεις ενσύρματων-ασύρματων δικτύων και δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό. Οι προσεγγίσεις αυτές αξιολογούνται και συγκρίνονται με βάση επιλεγμένα κριτήρια, όπως η χρήση του εύρους ζώνης, η καθυστέρηση, ο ρυθμός σφάλματος πακέτων, η κατανάλωση ενέργειας, η επεκτασιμότητα, η προσαρμοστικότητα και η ανθεκτικότητα. Τα ευρήματα της διατριβής αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες κάθε μεθοδολογίας, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητές τους για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της μετάδοσης μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Με την συγκεκριμένη ανάλυση γίνεται πλήρως αντιληπτή η σημασία των εφαρμογών μεθόδων και αλγορίθμων για να επιτευχθεί η αποδοτική μετάδοση των δεδομένων. Τέλος, η έρευνα υπογραμμίζει τη σημασία του συνδυασμού αυτών των τεχνικών για την ενίσχυση της αποδοτικότητας της μετάδοσης δεδομένων και παρουσιάζει μελλοντικές επεκτάσεις πάνω στο αντικείμενο μελέτης.

Λέξεις Κλειδιά: *Μεγάλα Δεδομένα, Υπολογιστικό Νέφος, Ασύρματα Δίκτυα, Κυψελωτά Δίκτυα, Μεταφορά Δεδομένων, Αποδοτική μετάδοση, Συγκριτική Μελέτη Απόδοσης*

Abstract

This thesis focuses on the efficient transmission of big data in wireless networks. The research explores key aspects related to this topic, including the challenges and characteristics of big data, analysis of wireless networks and identification of problems associated with wireless transmission. The thesis presents a comprehensive evaluation of methodologies and algorithms for efficient transmission in wireless networks. Topics addressed include methods for segmentation and parallel data transmission, data compression and coding techniques, distributed storage and caching strategies, hybrid wired-wireless network solutions, and software-defined networking. These approaches are evaluated and compared based on the selected criteria such as bandwidth utilization, latency, packet error rate, power consumption, scalability, adaptability and resilience. The findings of the thesis highlight the strengths and weaknesses of each methodology, providing insights into their potential to address the challenges of big data transmission in wireless networks. With this analysis, the importance of applying methods and algorithms to achieve efficient data transmission is fully understood. Finally, the research highlights the importance of combining these techniques to enhance the efficiency of data transmission and presents future extensions about the proposed study.

Keywords: *Big Data, Cloud Computing, Wireless Networks, Cellular Networks, Data Transmission, Efficient Transmission, Comparative Performance Study*

1

Εισαγωγή

1.1 Τα Μεγάλα Δεδομένα στην σύγχρονη εποχή και τα προβλήματα μετάδοσης τους στα Ασύρματα Δίκτυα

Τα τελευταία χρόνια, η έκρηξη των Μεγάλων Δεδομένων (ΜΔ) έχει φέρει επανάσταση σε διάφορους τομείς, από την υγειονομική περίθαλψη και τη χρηματοδότηση έως τις μεταφορές και την ψυχαγωγία. Τα ΜΔ αναφέρονται στους τεράστιους όγκους δομημένων, ημιδομημένων και αδόμητων δεδομένων που παράγονται από διάφορες πηγές, όπως τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, οι συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet-of-Things - IoT), οι αισθητήρες και οι διαδικτυακές συναλλαγές. Η αξιοποίηση αυτού του τεράστιου όγκου δεδομένων έχει τη δυνατότητα να ξεκλειδώσει πολύτιμες πληροφορίες, να προωθήσει την καινοτομία και να βελτιώσει τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Ωστόσο, η αποτελεσματική μετάδοση μεγάλων συνόλων δεδομένων έχει αναδειχθεί σε σημαντική πρόκληση, ιδίως στο πλαίσιο των ασύρματων δικτύων.

Τα ασύρματα δίκτυα αξιοποιούνται και εξελίσσονται συνεχώς τις τελευταίες δεκαετίες, συνδέοντας ολοένα και μεγαλύτερο αριθμό συσκευών και επιτρέποντας την απρόσκοπτη επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων. Ο πολλαπλασιασμός των smartphones, των tablet, των wearables και των συσκευών IoT έχει εντείνει τη ζήτηση για ασύρματη συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας. Τα ασύρματα δίκτυα διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διευκόλυνση της μετάδοσης μεγάλων δεδομένων, καθώς παρέχουν τα μέσα για τη μετάδοση πληροφοριών χωρίς την ανάγκη φυσικών συνδέσεων.

Ωστόσο, η μετάδοση μεγάλων συνόλων δεδομένων μέσω ασύρματων δικτύων δημιουργεί διάφορα προβλήματα που κρίνεται απαραίτητο να διορθωθούν για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Πρώτα απ' όλα, τα ασύρματα δίκτυα έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης, το οποίο μπορεί να αποτελέσει σημείο συμφόρησης όταν πρόκειται για

σημαντικό όγκο δεδομένων. Η αποδοτική κατανομή αυτού του εύρους ζώνης είναι ζωτικής σημασίας για την ομαλή μετάδοση δεδομένων και την αποφυγή συμφόρησης. Επιπλέον, τα ασύρματα δίκτυα είναι ευάλωτα σε παρεμβολές, εξασθένηση του σήματος και εξασθένηση, τα οποία μπορούν να υποβαθμίσουν περαιτέρω την ποιότητα και την αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων.

Επιπλέον, τα ασύρματα δίκτυα λειτουργούν συχνά σε κοινόχρηστες ζώνες φάσματος, με αποτέλεσμα τη σπανιότητα του φάσματος και τον ανταγωνισμό για τις διαθέσιμες συχνότητες. Καθώς η ζήτηση για ασύρματες υπηρεσίες συνεχίζει να αυξάνεται, η αποτελεσματική αξιοποίηση του περιορισμένου φάσματος καθίσταται ζωτικής σημασίας. Απαιτούνται αποτελεσματικές τεχνικές διαχείρισης του φάσματος και στρατηγικές κατανομής για τον μετριασμό των παρεμβολών και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης των μεγάλων μεταδόσεων δεδομένων.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται κυρίως στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την αποτελεσματική μετάδοση μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Η έρευνα στοχεύει στην αναφορά μεθόδων και πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας που βελτιστοποιούν τη διαδικασία μετάδοσης δεδομένων, εξασφαλίζοντας έτσι υψηλή απόδοση, χαμηλή καθυστέρηση και αξιόπιστη παράδοση μεγάλων δεδομένων. Παράλληλα, θα διερευνήσει και θα προτείνει λύσεις στα προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά τη μετάδοση μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα, ώστε η επικοινωνία να είναι αποδοτική υπό το πρίσμα της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό θα περιλαμβάνει τη διερεύνηση νέων προσεγγίσεων για την κατανομή του εύρους ζώνης, τον μετριασμό των παρεμβολών και τη διαχείριση του φάσματος για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας μετάδοσης. Επιπλέον, η μελέτη θα εξετάσει την επίδραση διαφόρων παραγόντων, όπως η τοπολογία του δικτύου, τα πρότυπα κίνησης και οι τεχνικές συμπίεσης δεδομένων, στην αποδοτικότητα της μετάδοσης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Για να υλοποιηθεί η παραπάνω έρευνα κρίνεται πρωταρχικά απαραίτητο να αναλυθούν πλήρως οι ασύρματες τεχνολογίες μεταφοράς δεδομένων, καθώς και τα χαρακτηριστικά των ΜΔ και τους περιορισμούς που εισάγουν στα συστήματα διαχείρισής τους.

Τα ευρήματα και οι γνώσεις που προκύπτουν από αυτή την ερευνητική προσπάθεια έχουν τη δυνατότητα να διαμορφώσουν το μέλλον των ασύρματων δικτύων και να επιτρέψουν την απρόσκοπτη ενσωμάτωση της ανάλυσης ΜΔ σε διάφορους τομείς. Οι λύσεις και οι συστάσεις που θα προταθούν θα συμβάλουν στην προώθηση αποτελεσματικών μηχανισμών μετάδοσης δεδομένων, διασφαλίζοντας ότι τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις των εφαρμογών μεγάλων δεδομένων επιτυγχάνοντας όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό ενεργητικής απόδοσης.

1.3 Δομή της διπλωματικής

Η παρούσα εργασία απαρτίζεται από επτά κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας εισαγωγικής ενότητας. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα ΜΔ, οι τύποι και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και τεχνολογίες που δύναται να επεξεργαστούν τον μεγάλο όγκο των ΜΔ σε διάφορες εφαρμογές στην καθημερινότητα και σε συνδυασμό με το υπολογιστικό νέφος. Στο Κεφάλαιο 3 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά ασύρματων δικτύων και οι μέθοδοι που αξιοποιούν για την

επικοινωνία, καθώς και αναλύονται τα διάφορα δίκτυα που αξιοποιούν την ασύρματη μετάδοση για την αποστολή δεδομένων. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και αναλύονται εκτενώς τα διάφορα προβλήματα που εντοπίζονται στην ασύρματη μετάδοση και πως επηρεάζουν την αποστολή μεγάλου όγκου δεδομένων. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι διάφοροι μέθοδοι και αλγόριθμοι που συμβάλλουν στην αποδοτική μετάδοση ΜΔ στα ασύρματα δίκτυα. Στο Κεφάλαιο 6 υλοποιείται μια συγκριτική μελέτη απόδοσης αξιολογώντας της τεχνικές που διατυπώθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται η σύνοψη των ευρημάτων και εξάγονται τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης, αναφέροντας παράλληλα μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας, αλλά και μελλοντικές έρευνες που δύναται να εκπονηθούν πάνω στο αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής.

2

Μεγάλα Δεδομένα

Τα μεγάλα δεδομένα (ΜΔ) ή αλλιώς Big Data αναφέρονται στη συλλογή τεράστιων και πολύπλοκων συνόλων δεδομένων που το συνήθη λογισμικά και εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων δεν είναι σε θέση να επεξεργαστούν. Αυτά τα σύνολα δεδομένων μπορούν να ληφθούν μέσω ποικίλων μεθόδων, συμπεριλαμβανομένων των μέσων κοινωνικής δικτύωσης, των συσκευών IoT, των συναλλαγών ηλεκτρονικού εμπορίου και πολλών άλλων. Οι τεχνολογίες ΜΔ δημιουργούνται για την αποθήκευση και την ανάλυση του τεράστιου αυτού όγκου δεδομένων, προκειμένου να συγκεντρωθούν σχετικές γνώσεις πάνω στο αντικείμενο μελέτης, να υλοποιηθεί κατάλληλη επεξεργασία αυτών των δεδομένων και να βελτιωθεί η λήψη αποφάσεων σε ένα ευρύ φάσμα επιχειρήσεων. Η αγορά μεγάλων δεδομένων αυξάνεται γρήγορα και αναμένεται να φτάσει σε παγκόσμια αξία άνω των 273 δισεκατομμυρίων δολαρίων έως το τέλος του 2023 [1]. Το Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing), η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) και η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) είναι παραδείγματα σύγχρονων τεχνολογιών που έχουν επιταχύνει την επεξεργασία και ανάλυση των μεγάλων δεδομένων. Οι πληροφορίες για τα ΜΔ μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές προόδους σε διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της υγειονομικής περίθαλψης, των οικονομικών, του μάρκετινγκ και των μεταφορών.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα υλοποιηθεί μια συνοπτική παρουσίαση της ιστορικής αναδρομής των ΜΔ, και των διάφορων ορισμών τους και θα παρουσιαστούν οι τεχνολογίες που αξιοποιούνται για την ανάλυσή τους, καθώς και εφαρμογές που έχουν στην σύγχρονη εποχή αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα του υπολογιστικού νέφους.

2.1 Ιστορική αναδρομή ΜΔ

Η γένεση της ιδέας των μεγάλων δεδομένων μπορεί να εντοπιστεί στις πρώτες ημέρες της πληροφορικής, όταν πρωτοεμφανίστηκε η επεξεργασία δεδομένων. Ωστόσο, ο ίδιος ο όρος "ΜΔ" απέκτησε δημοτικότητα στις αρχές της δεκαετίας του 2000, καθώς τα δεδομένα άρχισαν να αυξάνονται με εκθετικό ρυθμό και οι παραδοσιακές τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων εντοπίστηκαν ανεπαρκείς [2].

Μια από τις βασικές κινητήριες δυνάμεις της ιδέας των μεγάλων δεδομένων ήταν η ανάπτυξη του διαδικτύου και η αυξανόμενη χρήση ψηφιακών τεχνολογιών. Καθώς όλο και περισσότεροι άνθρωποι άρχισαν να χρησιμοποιούν το διαδίκτυο και τις ψηφιακές συσκευές, ο όγκος των

δεδομένων που παράγονται και συλλέγονται άρχισε να αυξάνεται ραγδαία. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη για νέες τεχνολογίες και τεχνικές διαχείρισης και ανάλυσης των δεδομένων. Μια άλλη κινητήρια δύναμη της ιδέας των μεγάλων δεδομένων ήταν η ανάπτυξη της λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων στις επιχειρήσεις και σε άλλους τομείς. Καθώς τα δεδομένα γίνονταν όλο και πιο σημαντικά για τη λήψη αποφάσεων, υπήρχε ανάγκη για καλύτερα εργαλεία και τεχνικές ανάλυσης και ερμηνείας των δεδομένων.

Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, ο όρος "ΜΔ" άρχισε να κερδίζει έδαφος, εν μέρει χάρη στο έργο του Doug Laney, ο οποίος δημοσίευσε το 2001 ένα έγγραφο με τίτλο "3D Data Management: Data Volume, Velocity, and Variety" [3]. Στο έγγραφο αυτό, ο Laney υποστήριξε ότι τα τρία Vs (Volume - Όγκος, Velocity – Ταχύτητα, Variety - Ποικιλία) ήταν τα βασικά χαρακτηριστικά των μεγάλων δεδομένων και ότι χρειαζόνταν νέα εργαλεία και τεχνικές για τη διαχείριση και την ανάλυση των δεδομένων.

Έκτοτε, η ιδέα των μεγάλων δεδομένων συνέχισε να εξελίσσεται, καθώς αναπτύχθηκαν νέες τεχνολογίες και τεχνικές για τη διαχείριση και ανάλυση ολοένα και μεγαλύτερων ποσοτήτων δεδομένων. Σήμερα, τα ΜΔ αποτελούν κρίσιμο συστατικό πολλών τομέων, από τις επιχειρήσεις και τα χρηματοοικονομικά μέχρι την υγειονομική περίθαλψη και την επιστήμη [4]. Πιο συγκεκριμένα, τα ΜΔ χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς και εφαρμογές, όπως οι επιχειρήσεις, η υγειονομική περίθαλψη, τα οικονομικά, η κυβέρνηση και η επιστημονική έρευνα. Ορισμένοι τομείς που αξιοποιούνται τα ΜΔ είναι οι κάτωθι:

- Στην **επιχειρηματική ευφυΐα** για την εξέταση της συμπεριφοράς των πελατών και των τάσεων της αγοράς.
- Στο **μάρκετινγκ και τη διαφήμιση** για τη στόχευση διαφημίσεων και προωθητικών ενεργειών σε συγκεκριμένες ομάδες ατόμων με βάση τα ενδιαφέροντά τους, τα δημογραφικά τους στοιχεία και άλλα κριτήρια.
- **Υγειονομική περίθαλψη:** Ανάλυση δεδομένων ασθενών, την πρόβλεψη της εκδήλωσης ασθενειών και τον εντοπισμό νέων φαρμάκων, τα ΜΔ χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων των ασθενών.
- **Χρηματοοικονομικά:** Ανάλυση χρηματοοικονομικών συναλλαγών για την αξιολόγησή τους, τον εντοπισμό απάτης και τη λήψη επενδυτικών αποφάσεων.
- **Κυβέρνηση:** Βελτίωση των δημόσιων υπηρεσιών, παρακολούθηση της εγκληματικότητας και αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.
- **Επιστημονική έρευνα:** Ανάλυση και την ερμηνεία τεράστιων συνόλων δεδομένων σε πολλούς τομείς της επιστημονικής έρευνας, όπως η γενετική, η κλιματική επιστήμη και η αστρονομία.

2.2 Ορισμοί ΜΔ

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για τα ΜΔ σύμφωνα με τους επίσημους τεχνολογικούς φορείς με τους κυριότερους να παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Gartner:** Τα ΜΔ είναι περιουσιακά στοιχεία πληροφοριών μεγάλου όγκου, υψηλής ταχύτητας και/ή υψηλής ποικιλίας που απαιτούν οικονομικά αποδοτικές, καινοτόμες μορφές επεξεργασίας πληροφοριών που καθιστούν δυνατή τη βελτίωση της διορατικότητας, τη λήψη αποφάσεων και την αυτοματοποίηση των διαδικασιών” [5].
- **Oracle:** Τα μεγάλα δεδομένα ορίζονται ως δεδομένα με μεγαλύτερη ποικιλομορφία, που έρχονται σε μεγαλύτερο όγκο και με ταχύτερο ρυθμό. Αυτό αναφέρεται μερικές φορές ως τα τρία Vs (Volume, Velocity και Variety). Επιπλέον, τα ΜΔ είναι μεγαλύτερα, πιο περίπλοκα σύνολα δεδομένων, ιδίως από νέες πηγές δεδομένων. Τα παραδοσιακά εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων απλά δεν μπορούν να χειριστούν αυτές τις τεράστιες ποσότητες [6].
- **Intel:** Τα ΜΔ είναι μια έννοια που περιγράφει την πληθώρα μη δομημένων δεδομένων που δημιουργούνται από κάθε πηγή παραγωγής πληροφοριών, από τις αναρτήσεις στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης και την κυκλοφορία του δικτύου μέχρι το IoT, τις κάμερες δημόσιας ασφάλειας και τα παγκόσμια μετεωρολογικά δεδομένα. Τα ΜΔ, σε αντίθεση με τα μικρά δεδομένα που μπορούν να μορφοποιηθούν, να αποθηκευτούν και να αναλυθούν σε μια σχεσιακή βάση δεδομένων, ξεπερνούν τις δυνατότητες των πινάκων, των γραμμών και των στηλών όσον αφορά την πολυπλοκότητα και την επεξεργασία [7].
- **Microsoft:** Οι μεθοδολογίες, τα εργαλεία και οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή, την ερμηνεία και την εξαγωγή συμπερασμάτων από μια σειρά συνόλων δεδομένων μεγάλου όγκου και υψηλής ταχύτητας αναφέρονται ως ανάλυση μεγάλων δεδομένων. Αυτά τα σύνολα δεδομένων μπορούν να προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως ο ιστός, τα κινητά, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης και οι δικτυωμένες έξυπνες συσκευές. Συχνά περιέχουν δεδομένα που δημιουργήθηκαν με ταχύ ρυθμό και σε διάφορες μορφές, από οργανωμένες (πίνακες βάσεων δεδομένων, υπολογιστικά φύλλα Excel) έως ημιδομημένες (αρχεία XML, ιστοσελίδες) και μη δομημένες (εικόνες, αρχεία ήχου). [8].
- **Google:** Τα "ΜΔ" είναι ο τεράστιος όγκος δεδομένων που έχουν στη διάθεσή τους οι οργανισμοί, τα οποία λόγω του όγκου και της πολυπλοκότητάς τους, δεν είναι εύκολο να διαχειριστούν ή να αναλυθούν από πολλά εργαλεία επιχειρηματικής ευφυΐας [9].

2.3 Χαρακτηριστικά ΜΔ

Πέρα από την διατύπωση των ορισμών των ΜΔ, είναι σημαντικά και να αναφερθούν και να αναλυθούν συνοπτικά τα χαρακτηριστικά τους, ώστε να γίνουν περισσότερο κατανοητοί οι ορισμοί της προηγούμενης ενότητας. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά των μεγάλων δεδομένων είναι τα κάτωθι:

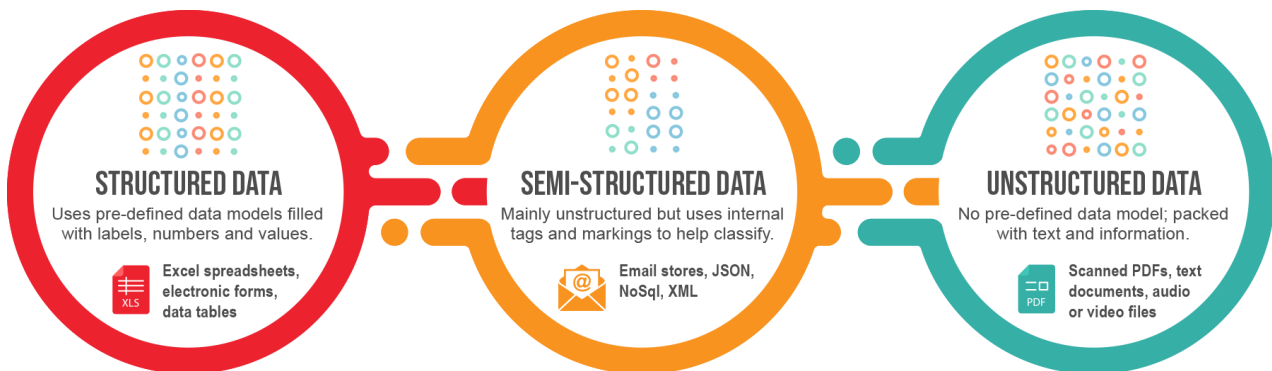
- **Όγκος δεδομένων:** Τα ΜΔ χαρακτηρίζονται από μεγάλο όγκο δεδομένων, ο οποίος συχνά μετράται σε terabytes, petabytes ή ακόμη και exabytes.
- **Ταχύτητα:** Τα ΜΔ παράγονται και συλλέγονται με πολύ υψηλή ταχύτητα, συχνά σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο, γεγονός που μπορεί να καταστήσει δύσκολη την επεξεργασία και την ανάλυσή τους.
- **Ποικιλομορφία δεδομένων:** Τα ΜΔ παράγονται σε πολλές διαφορετικές μορφές, συμπεριλαμβανομένων δομημένων δεδομένων (όπως τα δεδομένα σε μια σχεσιακή βάση δεδομένων), μη δομημένων δεδομένων (όπως κείμενο, εικόνες και βίντεο) και ημι-δομημένων δεδομένων (όπως αρχεία XML και JSON).
- **Πολυπλοκότητα:** Τα ΜΔ συχνά χαρακτηρίζονται από πολύπλοκες σχέσεις και μοτίβα που είναι δύσκολο να εντοπιστούν με τη χρήση παραδοσιακών τεχνικών επεξεργασίας δεδομένων.
- **Μεταβλητότητα:** Τα ΜΔ μπορεί να είναι εξαιρετικά μεταβλητά, πράγμα που σημαίνει ότι τα δεδομένα μπορεί να αλλάζουν συχνά ή να υπόκεινται σε εποχιακές διακυμάνσεις, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ανάλυση και την ερμηνεία τους σε βάθος χρόνου.
- **Σημαντικότητα:** Τα ΜΔ μπορούν να προσφέρουν σημαντική αξία στους οργανισμούς και τις επιχειρήσεις, αλλά απαιτούνται τα κατάλληλα εργαλεία, τεχνολογίες και δεξιότητες για την εξαγωγή πληροφοριών και την άντληση αξίας από τα δεδομένα.
- **Συνέπεια – Ακρίβεια:** Τα ΜΔ είναι συχνά ελλιπή, ανακριβή ή ασυνεπή, γεγονός που μπορεί να καταστήσει δύσκολη τη χρήση τους για τη λήψη αποφάσεων ή την ανάλυση τους.

2.4 Τύποι ΜΔ

Από την περιγραφή των χαρακτηριστικών των ΜΔ γίνεται αντιληπτό ότι η επεξεργασία τέτοιων δεδομένων καθίσταται μια χρονοβόρα διαδικασία και απαιτεί ειδική επεξεργασία και κατάλληλα εργαλεία για την αποτελεσματική ανάλυση τους. Ωστόσο, η επεξεργασία των δεδομένων εξαρτάται από την κατηγορία αυτών. Πιο συγκεκριμένα στα ΜΔ εντοπίζονται τρεις κύριες κατηγορίες δεδομένων, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω και περιγράφονται στις

επόμενες ενότητες. Οι κατηγορίες των ΜΔ, οι οποίες παρουσιάζονται και στην Εικόνα 2.1 είναι οι κάτωθι:

- Δομημένα δεδομένα
- Μη-δομημένα δεδομένα
- Ημι-δομημένα δεδομένα



Εικόνα 2.1 Τύποι Μεγάλων Δεδομένων [10]

2.4.1 Δομημένα δεδομένα

Τα δομημένα δεδομένα αναφέρονται σε δεδομένα που είναι οργανωμένα και αποθηκευμένα σε μια συγκεκριμένη μορφή ή δομή, καθιστώντας εύκολη την αναζήτηση, την ανάλυση και τη χρήση τους. Τα δομημένα δεδομένα βρίσκονται συχνά σε σχεσιακές βάσεις δεδομένων, λογιστικά φύλλα και άλλες δομημένες μορφές δεδομένων. Τα δομημένα δεδομένα αποθηκεύονται συνήθως σε μορφή πίνακα, με κάθε γραμμή να αντιπροσωπεύει μία εγγραφή και κάθε στήλη να αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ή σημείο δεδομένων. Αυτό καθιστά εύκολη την αναζήτηση και ανάλυση των δεδομένων με τη χρήση ερωτημάτων SQL ή άλλων εργαλείων ανάλυσης δεδομένων [11]. Εντοπίζονται συχνά σε σχεσιακές βάσεις δεδομένων, λογιστικά φύλλα και άλλες μορφές δομημένων δεδομένων. Οι σχεσιακές βάσεις δεδομένων έχουν σχεδιαστεί για την αποθήκευση δομημένων δεδομένων και είναι οργανωμένες γύρω από ένα σύνολο πινάκων, με κάθε πίνακα να αντιπροσωπεύει έναν διαφορετικό τύπο δεδομένων. Κάθε πίνακας περιέχει γραμμές που αντιπροσωπεύουν μεμονωμένες εγγραφές και στήλες που αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Τα δομημένα δεδομένα είναι σημαντικά για την ανάλυση ΜΔ, επειδή παρέχουν μια σταθερή βάση για την ανάλυση δεδομένων και επιτρέπουν στους οργανισμούς να αποκτούν γνώσεις και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις με βάση τα δεδομένα. Χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των επιχειρήσεων, των οικονομικών, της υγειονομικής περίθαλψης και της κυβέρνησης, λόγω της ευκολίας αναζήτησης πληροφοριών εντός των συλλεγόμενων δεδομένων, αλλά και ευκολία ανάλυσής τους, καθώς μπορούν εύκολα να ταξινομηθούν, να φιλτραριστούν και να δώσουν απαντήσεις σε συγκεκριμένες ερωτήσεις που θέτει ο κάθε χρήστης. Επίσης, έχουν μεγάλη χρήση και αξιοποιούνται εύκολα από αλγορίθμους

μηχανικής μάθησης και νευρωνικών δικτύων. Ωστόσο, η επεξεργασία δομημένων δεδομένων μπορεί να προκύψει αρκετά δαπανηρή και απαιτητική σε πόρους, καθώς μεταβάλλεται ο όγκος των δεδομένων.

Τα χαρακτηριστικά των δομημένων δεδομένων σύμφωνα με την Amazon [11] είναι τα κάτωθι:

- **Ευκολία χρήσης:** Η κατανόηση και απόκτηση πρόσβασης σε δομημένα δεδομένα είναι πολύ γρήγορη λόγω της δομής τους. Λειτουργίες όπως η ενημέρωση και η τροποποίηση δομημένων δεδομένων είναι απλές. Η αποθήκευση κρίνεται αποτελεσματική, καθώς μπορούν να διατεθούν μονάδες αποθήκευσης σταθερού μήκους για τις τιμές δεδομένων.
- **Επεκτασιμότητα:** Τα δομημένα δεδομένα κλιμακώνονται αλγοριθμικά. Μπορεί να προστεθεί αποθηκευτικός χώρος και επεξεργαστική ισχύ καθώς αυξάνεται ο όγκος των δεδομένων.
- **Ανάλυση δεδομένων:** Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να αναλύουν δομημένα δεδομένα και να εντοπίζουν κοινά μοτίβα για επιχειρηματική ευφυΐα. Με κατάλληλα δομημένη γλώσσα ερωτημάτων (SQL) μπορούν να δημιουργηθούν αναφορές, καθώς και να τροποποιηθούν τα δεδομένα.

2.4.2 Μη-Δομημένα δεδομένα

Τα μη δομημένα δεδομένα είναι δεδομένα που δεν έχουν προκαθορισμένη ή οργανωμένη μορφή, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αναζήτηση, την ανάλυση και τη χρήση τους. Μπορούν να λάβουν πολλαπλές μορφές, όπως έγγραφα κειμένου, μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, αναρτήσεις στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, εικόνες, βίντεο, ηχογραφήσεις και δεδομένα αισθητήρων [12]. Τα μη δομημένα δεδομένα αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στη σημερινή ψηφιακή εποχή, καθώς ο όγκος των μη δομημένων δεδομένων που παράγονται συνεχίζει να αυξάνεται εκθετικά. Οι πλατφόρμες μέσων κοινωνικής δικτύωσης παράγουν τεράστιες ποσότητες μη δομημένων δεδομένων με τη μορφή αναρτήσεων, σχολίων και μηνυμάτων, ενώ οι αισθητήρες IoT παράγουν μη δομημένα δεδομένα για κάθε είδους μέτρησης, από τη θερμοκρασία και την υγρασία έως τα πρότυπα κυκλοφορίας και την κατανάλωση ενέργειας.

Τα μη δομημένα δεδομένα είναι καλύτερο να διατηρούνται σε μη σχεσιακές (NoSQL) βάσεις δεδομένων, καθώς δεν διαθέτουν ένα καθορισμένο μοντέλο δεδομένων ή σε ακατέργαστη μορφή σε λίμνες δεδομένων (Data Lakes). Γνωστά και ως ποιοτικά δεδομένα, τα μη-δομημένα δεδομένα δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ή να αξιολογηθούν με τη χρήση παραδοσιακών εργαλείων και διαδικασιών δεδομένων [10].

Ορισμένες από τις εφαρμογές της ανάλυσης μη δομημένων δεδομένων περιλαμβάνουν την ανάλυση συναισθήματος για την κατανόηση του κλίματος και των απόψεων των πελατών, την ανάλυση εικόνας και βίντεο για τον εντοπισμό αντικειμένων και μοτίβων και την αναγνώριση ομιλίας για την απομαγνητοφώνηση ηχογραφήσεων. Η ανάλυση μη δομημένων δεδομένων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση απάτης, τον εντοπισμό μοτίβων και ανωμαλιών και τη

βελτίωση της λήψης αποφάσεων σε διάφορους κλάδους, όπως η υγειονομική περίθαλψη, η χρηματοδότηση, το μάρκετινγκ και άλλοι.

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- **Έλλειψη οργάνωσης:** Τα μη δομημένα δεδομένα δεν έχουν καθορισμένη δομή ή οργάνωση, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ανάλυσή τους με τη χρήση παραδοσιακών μεθόδων.
- **Μεγάλος όγκος:** Εντοπίζονται συχνά σε μεγάλους όγκους, όπως αναρτήσεις στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, εικόνες, βίντεο και δεδομένα αισθητήρων.
- **Ποικίλες μορφές:** Εμφανίζονται σε διάφορες μορφές, όπως κείμενο, ήχος, βίντεο και εικόνες.
- **Περιορισμένα μεταδεδομένα (metadata):** Στερούνται μεταδεδομένων ή περιγραφικών πληροφοριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση του νοήματος ή του πλαισίου τους.
- **Πολύπλοκες σχέσεις:** Περιέχουν πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ διαφορετικών στοιχείων, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ανάλυση και την κατανόησή τους.
- **Σύνθετη επεξεργασία:** Η ανάλυση μη δομημένων δεδομένων απαιτεί τη χρήση εξελιγμένων εργαλείων και τεχνικών, όπως η μηχανική μάθηση, η επεξεργασία φυσικής γλώσσας (Natural Language Processing - NLP) και η όραση υπολογιστών.

2.4.3 Ημι-Δομημένα δεδομένα

Τα ημιδομημένα δεδομένα είναι ένας τύπος δεδομένων που περιέχουν τόσο δομημένα όσο και μη δομημένα στοιχεία δεδομένων και έχουν κάποια καθορισμένη μορφή ή δομή, αλλά δεν συμμορφώνονται με τους αυστηρούς κανόνες μιας σχεσιακής βάσης δεδομένων [10][12]. Τα ημιδομημένα δεδομένα χαρακτηρίζονται από την παρουσία ετικετών ή μεταδεδομένων που παρέχουν κάποια δομή στα δεδομένα, αλλά όχι αρκετή για να τα καταστήσει πλήρως δομημένα. Θεωρούνται μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ δομημένων και μη δομημένων δεδομένων. Έχουν κάποια στοιχεία δομής, αλλά επιτρέπουν επίσης μεγαλύτερη ευελιξία και μεταβλητότητα από τα δομημένα δεδομένα. Τα ημιδομημένα δεδομένα συναντώνται συνήθως σε αρχεία XML (eXtensible Markup Language), JSON (JavaScript Object Notation) και HTML (Hypertext Markup Language), καθώς και σε αναρτήσεις στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και άλλους τύπους εγγράφων.

Ένα από τα πλεονεκτήματα των ημιδομημένων δεδομένων είναι ότι παρέχουν έναν ευέλικτο και προσαρμόσιμο τρόπο αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων. Τα ημιδομημένα δεδομένα μπορούν να ενημερώνονται και να τροποποιούνται εύκολα, καθιστώντας τα ιδανικά για καταστάσεις όπου τα δεδομένα μεταβάλλονται ή εξελίσσονται συνεχώς. Επιπλέον, τα ημιδομημένα

δεδομένα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία με τη χρήση ποικίλων εργαλείων και τεχνικών ανάλυσης δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας φυσικής γλώσσας, της μηχανικής μάθησης και της ανάλυσης γραφημάτων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα ημιδομημένα δεδομένα χρησιμοποιούν μεταδεδομένα για να προσδιορίσουν ορισμένες ιδιότητες των δεδομένων και για να τα κατηγοριοποιήσουν.

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Ευέλικτη δομή:** Τα ημιδομημένα δεδομένα επιτρέπουν κάποιο επίπεδο ευελιξίας στη δομή τους, πράγμα που σημαίνει ότι τα στοιχεία των δεδομένων μπορούν να διαφέρουν ως προς τη μορφή, την οργάνωση και τα μεταδεδομένα τους.
- **Περιέχουν ετικέτες:** Περιέχουν ετικέτες που παρέχουν κάποια δομή και οργάνωση στα δεδομένα, όπως ετικέτες XML, αντικείμενα JSON ή ετικέτες HTML.
- **Υποστηρίζει εμφωλιασμένα (Nested) δεδομένα:** Μπορούν να υποστηρίξουν nested στοιχεία δεδομένων, προσφέροντας καλύτερη ομαδοποίηση και ιεράρχηση των δεδομένων με την μορφή δέντρου.
- **Επικύρωση:** Μπορούν να επικυρωθούν βάσει ενός συνόλου κανόνων ή περιορισμών, αλλά οι κανόνες αυτοί είναι συχνά ευέλικτοι και επιτρεπτοί.
- **Εκτενής χρήση σε υπηρεσίες ιστού (Web):** Χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές ιστού, όπως πλατφόρμες μέσων κοινωνικής δικτύωσης, ιστότοποι ηλεκτρονικού εμπορίου και συστήματα διαχείρισης περιεχομένου.

2.4.4 Μεταδεδομένα (Metadata)

Τα μεταδεδομένα είναι συμπληρωματικά δεδομένα που παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τα κύρια δεδομένα που εξετάζονται [13]. Τα μεταδεδομένα μπορούν να περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα πληροφοριών, όπως την ημερομηνία και την ώρα δημιουργίας ή τροποποίησης ενός αρχείου, τον συγγραφέα ενός εγγράφου, την μορφή ενός αρχείου, το μέγεθος ενός αρχείου και πολλά άλλα [14]. Καθίστανται σημαντικά επειδή βοηθούν τους χρήστες και τα συστήματα να κατανοήσουν και να διαχειριστούν τα δεδομένα που περιγράφουν. Τα μεταδεδομένα μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα αρχείο ή έγγραφο από μόνα τους ή να αποθηκευτούν ξεχωριστά σε μια βάση δεδομένων ή σε ένα άλλο σύστημα. Μπορούν να αποθηκευτούν και να διαχειριστούν σε μια βάση δεδομένων, που συχνά ονομάζεται μητρώο μεταδεδομένων ή αποθετήριο μεταδεδομένων. Επιπρόσθετα, μπορούν να προστίθενται χειροκίνητα από τους χρήστες ή να παράγονται αυτόματα από λογισμικό ή συστήματα. Αποθηκεύονται συχνά σε μορφή αναγνώσιμη από μηχανήματα, όπως XML ή JSON, ώστε να είναι δυνατή η αυτοματοποιημένη επεξεργασία και ανάλυση.

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι μεταδεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των περιγραφικών μεταδεδομένων, των δομικών μεταδεδομένων, των διοικητικών μεταδεδομένων και των μεταδεδομένων διατήρησης.

- **Περιγραφικά μεταδεδομένα:** Τα περιγραφικά μεταδεδομένα παρέχουν πληροφορίες που βοηθούν τους χρήστες να κατανοήσουν το περιεχόμενο ενός αρχείου ή εγγράφου. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν πληροφορίες όπως ο τίτλος, ο συγγραφέας, το θέμα, οι λέξεις-κλειδιά και άλλες περιγραφικές πληροφορίες.
- **Δομικά μεταδεδομένα:** Τα δομικά μεταδεδομένα περιγράφουν την οργάνωση των δεδομένων σε ένα αρχείο ή έγγραφο. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο τα διάφορα τμήματα ενός εγγράφου σχετίζονται μεταξύ τους ή με τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται διαφορετικά στοιχεία δεδομένων σε μια βάση δεδομένων.
- **Διοικητικά μεταδεδομένα:** Τα διοικητικά μεταδεδομένα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη διαχείριση των δεδομένων, όπως ποιος είναι ο ιδιοκτήτης των δεδομένων, ποιος έχει πρόσβαση σε αυτά και πώς πρέπει να αποθηκεύονται και να δημιουργούνται αντίγραφα ασφαλείας.
- **Μεταδεδομένα διατήρησης:** Τα μεταδεδομένα διατήρησης περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα θα πρέπει να διατηρούνται με την πάροδο του χρόνου, συμπεριλαμβανομένων πληροφοριών σχετικά με μορφές αρχείων, σχήματα μεταδεδομένων και άλλες τεχνικές λεπτομέρειες που μπορεί να επηρεάσουν τη μακροπρόθεσμη διατήρηση.

2.5 Τεχνολογίες

2.5.1 Hadoop

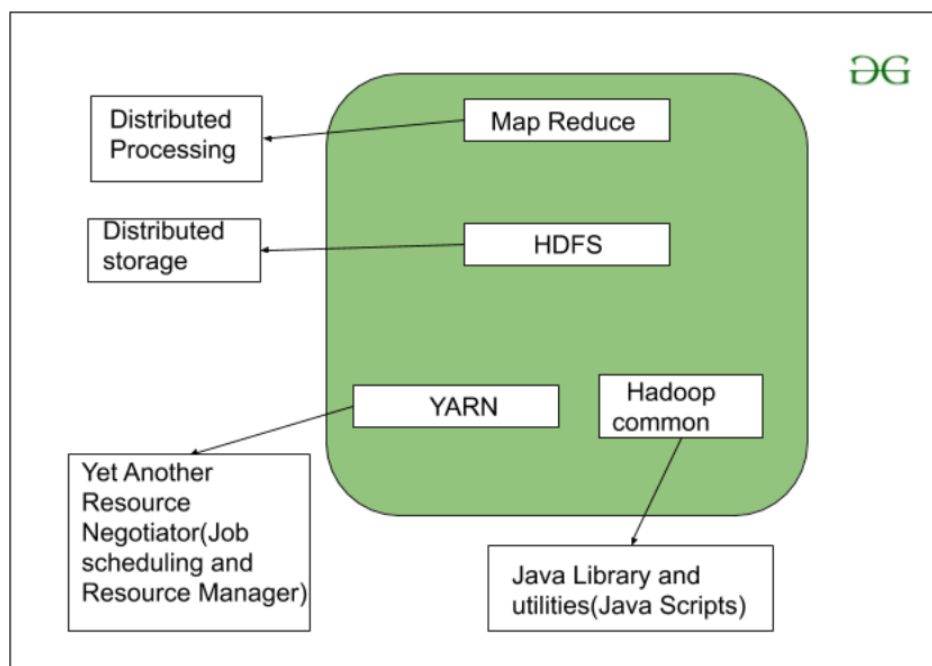
Το Hadoop είναι ένα πλαίσιο λογισμικού ανοικτού κώδικα που χρησιμοποιείται για την κατανομημένη αποθήκευση και επεξεργασία μεγάλων συνόλων δεδομένων σε συστάδες υλικού. Το Hadoop έχει σχεδιαστεί για να διαχειρίζεται ΜΔ, τα οποία αναφέρονται σε σύνολα δεδομένων που είναι πολύ μεγάλα και πολύπλοκα για να επεξεργαστούν από τα παραδοσιακά εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων, για αυτό άλλωστε χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση ΜΔ [15]. Το Hadoop επιτρέπει την κατανομημένη επεξεργασία μεγάλων συνόλων δεδομένων σε μια συστάδα υπολογιστών, γεγονός που επιτρέπει στους οργανισμούς να αποθηκεύουν και να αναλύουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Η βιβλιοθήκη του Apache Hadoop αντί να βασίζεται στο υλικό για να προσφέρει υψηλή διαθεσιμότητα, η βιβλιοθήκη έχει σχεδιαστεί για να εντοπίζει και να χειρίζεται προβλήματα στο επίπεδο εφαρμογής, παρέχοντας υψηλή διαθεσιμότητα σε μια συστάδα υπολογιστών, καθένας από τους οποίους μπορεί να αποτύχει.

Το Hadoop περιλαμβάνει διάφορα βασικά στοιχεία [16], όπως:

- Το κατανομημένο σύστημα αρχείων **Hadoop (Hadoop Distributed File System - HDFS)**: Πρόκειται για ένα κατανομημένο σύστημα αρχείων που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση μεγάλων συνόλων δεδομένων σε ένα σύμπλεγμα υπολογιστών.

- **Yet Another Resource Negotiator (YARN):** Πρόκειται για ένα σύστημα διαχείρισης πόρων που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των πόρων σε μια συστάδα Hadoop, όπως CPU, μνήμη και χώρος στο δίσκο.
- **MapReduce:** Πρόκειται για ένα μοντέλο προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για την παράλληλη επεξεργασία μεγάλων συνόλων δεδομένων σε μια συστάδα Hadoop.
- **Hadoop common:** Περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες βιβλιοθήκες για την λειτουργία του Hadoop.

Η αρχιτεκτονική του Hadoop παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2 Αρχιτεκτονική Hadoop [16]

Το Hadoop είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την επεξεργασία αδόμητων και ημιδομημένων δεδομένων, όπως αρχεία καταγραφής, δεδομένα από μέσα κοινωνικής δικτύωσης και δεδομένα αισθητήρων. Αυτοί οι τύποι δεδομένων είναι συχνά πολύ μεγάλοι και πολύπλοκοι για να επεξεργαστούν από τα παραδοσιακά εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων, αλλά οι δυνατότητες κατανεμημένης επεξεργασίας του Hadoop καθιστούν δυνατή την αποτελεσματική ανάλυσή τους. Εκτός από τα βασικά συστατικά του, το Hadoop διαθέτει επίσης ένα μεγάλο οικοσύστημα συναφών εργαλείων και τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση των δυνατοτήτων του για επεξεργασία και ανάλυση μεγάλων δεδομένων. Σε αυτά περιλαμβάνονται εργαλεία όπως τα Pig, Hive και Spark, τα οποία παρέχουν αφαιρέσεις υψηλότερου επιπέδου για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων, καθώς και εργαλεία για την οπτικοποίηση δεδομένων και τη μηχανική μάθηση.

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα του Hadoop είναι:

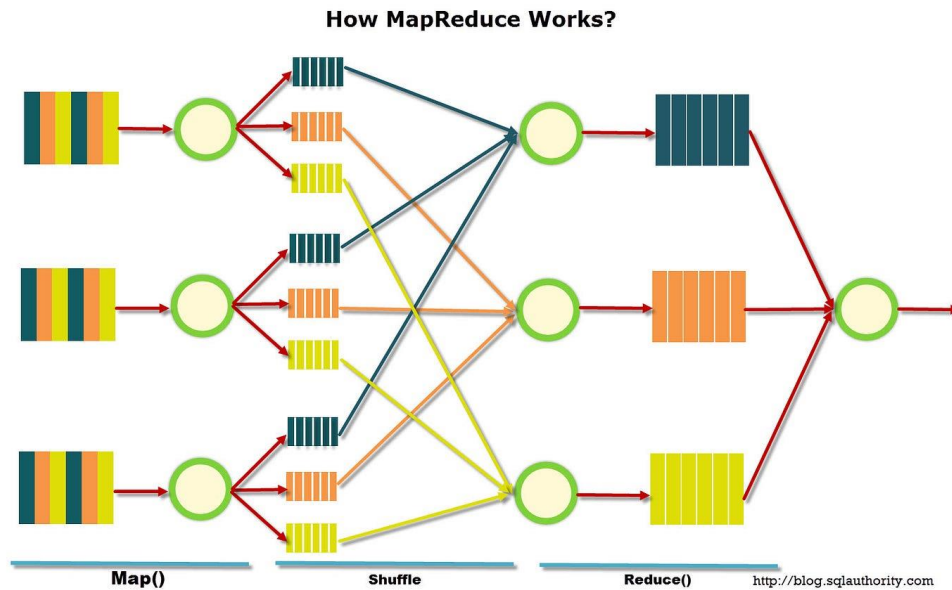
- **Επεκτασιμότητα:** Το Hadoop έχει σχεδιαστεί για οριζόντια κλιμάκωση, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί εύκολα να φιλοξενήσει πρόσθετα δεδομένα και ικανότητα επεξεργασίας με την προσθήκη περισσότερων κόμβων στη συστάδα. Αυτό το καθιστά μια ευέλικτη και κλιμακούμενη λύση για την αποθήκευση και την επεξεργασία μεγάλων δεδομένων.
- **Οικονομική αποδοτικότητα:** Έχει σχεδιαστεί για να εκτελείται σε βασικό υλικό, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να εκτελεστεί σε φθηνό, έτοιμο υλικό, μειώνοντας το κόστος υλοποίησης και συντήρησης.
- **Ανοχή σε σφάλματα:** Μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί ακόμη και αν ένας ή περισσότεροι κόμβοι της συστάδας αποτύχουν. Αυτό συμβάλλει στη διασφάλιση ότι τα δεδομένα είναι πάντα διαθέσιμα και ότι η επεξεργασία μπορεί να συνεχιστεί αδιάλειπτα.
- **Ευελιξία:** Μπορεί να χειριστεί διάφορους τύπους δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των αδόμητων και ημιδομημένων δεδομένων. Αυτό το καθιστά ένα ευέλικτο εργαλείο για την ανάλυση ενός ευρέος φάσματος πηγών δεδομένων.

2.5.2 MapReduce

Το MapReduce είναι ένα μοντέλο προγραμματισμού και ένα πλαίσιο για την επεξεργασία μεγάλων συνόλων δεδομένων σε ένα κατανεμημένο υπολογιστικό περιβάλλον. Παρουσιάστηκε από την Google το 2004 και έκτοτε αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του οικοσυστήματος Hadoop [17]. Το μοντέλο MapReduce λειτουργεί με τη διάσπαση μιας μεγάλης εργασίας επεξεργασίας δεδομένων σε μικρότερες, πιο διαχειρίσιμες επιμέρους εργασίες που μπορούν να υποστούν παράλληλη επεξεργασία σε μια συστάδα υπολογιστών. Αποτελείται από δύο κύριες φάσεις: τη φάση Map και τη φάση Reduce [18] όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3.

Στη φάση χαρτογράφησης (Map), τα δεδομένα εισόδου χωρίζονται σε μικρότερα κομμάτια και υποβάλλονται σε παράλληλη επεξεργασία σε πολυάριθμους κόμβους συστάδας. Κάθε κόμβος εφαρμόζει μια συνάρτηση αντιστοίχισης στα δεδομένα που του δίνονται, μετατρέποντάς τα σε μια συλλογή ζευγών κλειδιών-τιμών. Αυτά τα ενδιάμεσα ζεύγη κλειδιών-τιμών ταξινομούνται, ανακατεύονται (Shuffle) και διαμερίζονται με βάση τα κλειδιά τους και αποστέλλονται στη φάση μείωσης.

Στη φάση μείωσης (Reduce), τα ταξινομημένα και διαμερισμένα ζεύγη κλειδιών-τιμών υποβάλλονται σε παράλληλη επεξεργασία σε πολλαπλούς κόμβους της συστάδας. Κάθε κόμβος εφαρμόζει μια συνάρτηση μείωσης στο σύνολο ζευγών κλειδιών-τιμών που του έχει ανατεθεί, συνδυάζοντάς τα σε ένα τελικό σύνολο ζευγών κλειδιών-τιμών εξόδου.



Εικόνα 2.3 Τρόπος λειτουργίας Apache MapReduce [18]

Το MapReduce παρέχει ανοχή σε σφάλματα, αυτόματη κατάτμηση δεδομένων και εξισορρόπηση φορτίου. Είναι εξαιρετικά κλιμακούμενο, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων σε ένα σύμπλεγμα υλικού βασικής χρήσης [19]. Είναι ένα ιδιαίτερα κατάλληλο για την επεξεργασία αδόμητων και ημι-δομημένων δεδομένων, όπως αρχεία καταγραφής και δεδομένα κοινωνικής δικτύωσης. Χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με το Hadoop, το οποίο παρέχει ένα κατανεμημένο σύστημα αρχείων και άλλα εργαλεία για τη διαχείριση μεγάλων δεδομένων. Το MapReduce αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την επεξεργασία μεγάλων συνόλων δεδομένων σε ένα κατανεμημένο υπολογιστικό περιβάλλον. Επιτρέπει την αποτελεσματική και κλιμακούμενη επεξεργασία αδόμητων και ημιδομημένων δεδομένων και αποτελεί βασικό συστατικό του τοπίου των μεγάλων δεδομένων.

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα του είναι:

- **Επεκτασιμότητα:** Μπορεί εύκολα να χειριστεί μεγάλα σύνολα δεδομένων προσθέτοντας περισσότερους κόμβους στη συστάδα. Αυτό το καθιστά μια ευέλικτη και κλιμακούμενη λύση για την επεξεργασία μεγάλων δεδομένων.
- **Ανοχή σφαλμάτων:** Το MapReduce έχει σχεδιαστεί για να είναι ανεκτικό σε σφάλματα, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί ακόμη και αν ένας ή περισσότεροι κόμβοι της συστάδας αποτύχουν. Αυτό συμβάλλει στη διασφάλιση ότι η επεξεργασία μπορεί να συνεχιστεί απρόσκοπτα.
- **Ευελιξία:** Μπορεί να χειριστεί διάφορους τύπους δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των αδόμητων και ημιδομημένων δεδομένων. Αυτό το καθιστά ένα ευέλικτο εργαλείο για την ανάλυση μεγάλου εύρους πηγών δεδομένων.

- **Εύκολο στον προγραμματισμό:** Το MapReduce παρέχει μια διεπαφή προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, καθιστώντας εύκολη τη συγγραφή εργασιών MapReduce χρησιμοποιώντας γλώσσες όπως η Java, η Python ή η Scala.

2.5.3 Hive

Το Hive είναι ένα σύστημα αποθήκης δεδομένων ανοικτού κώδικα που βασίζεται στο Hadoop. Αναπτύχθηκε αρχικά από το Facebook και έκτοτε έχει γίνει ένα δημοφιλές εργαλείο για τη διαχείριση και την αναζήτηση μεγάλων δεδομένων [20]. Το Hive παρέχει μια διεπαφή, η οποία διευκολύνει τους χρήστες να αναλύουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων χρησιμοποιώντας οικεία ερωτήματα SQL. Υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα μορφών δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων δομημένων, ημιδομημένων και μη δομημένων δεδομένων. Χρησιμοποιεί μια γλώσσα που ονομάζεται HiveQL (HQL) για τον ορισμό και την εκτέλεση ερωτημάτων. Η HiveQL είναι παρόμοια με την SQL, αλλά είναι βελτιστοποιημένη για την υποβολή ερωτημάτων σε μεγάλα σύνολα δεδομένων που είναι αποθηκευμένα στο Hadoop.

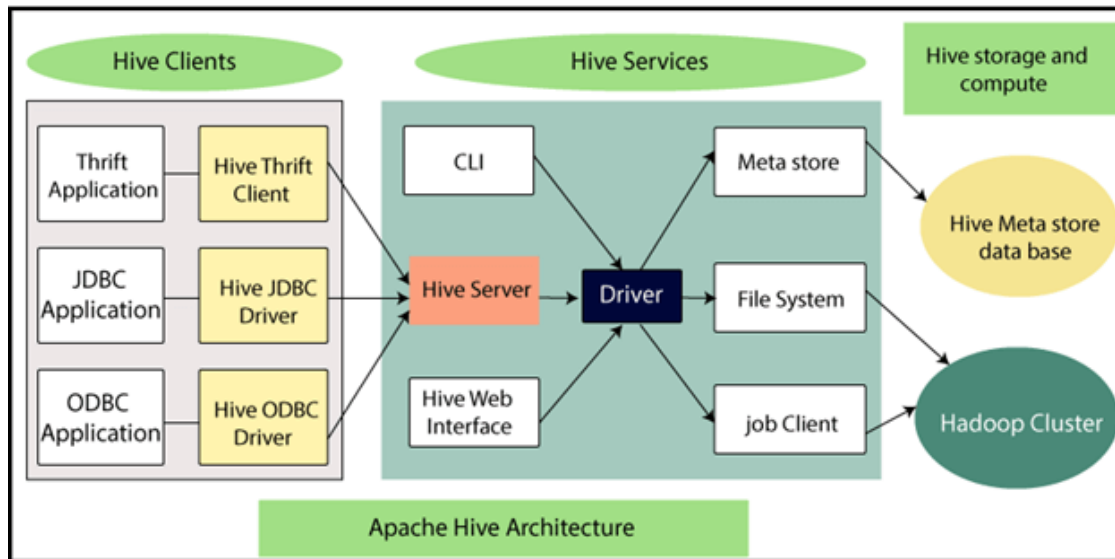
Το Hive περιλαμβάνει διάφορα βασικά στοιχεία που το καθιστούν ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση μεγάλων δεδομένων, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 2.4:

- **Metastore:** Το Hive περιλαμβάνει ένα metastore, το οποίο είναι ένα κεντρικό αποθετήριο για την αποθήκευση μεταδεδομένων σχετικά με τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στο Hadoop. Αυτό διευκολύνει τους χρήστες στη διαχείριση και την αναζήτηση δεδομένων σε διαφορετικές συστάδες Hadoop.
- **Μηχανή ερωτημάτων:** Το Hive περιλαμβάνει μια μηχανή ερωτημάτων που μεταφράζει τα ερωτήματα HiveQL σε εργασίες MapReduce ή Tez, οι οποίες μπορούν να εκτελεστούν σε μια συστάδα Hadoop. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να αναλύουν παράλληλα μεγάλα σύνολα δεδομένων σε πολλούς κόμβους της συστάδας.
- **Διεπαφή χρήστη:** Το Hive παρέχει μια διεπαφή χρήστη που επιτρέπει στους χρήστες να αλληλοεπιδρούν με το Hadoop χρησιμοποιώντας μια διαδικτυακή διεπαφή ή μια διεπαφή γραμμής εντολών. Αυτό διευκολύνει τους χρήστες να δημιουργούν και να διαχειρίζονται πίνακες, να εκτελούν ερωτήματα και να παρακολουθούν την πρόοδο των εργασιών.

Τα πλεονεκτήματα του Hive για την ανάλυση μεγάλων δεδομένων παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Οικείο περιβάλλον εργασίας:** Το Hive παρέχει μια οικεία διεπαφή που μοιάζει με SQL, γεγονός που διευκολύνει τους χρήστες που είναι ήδη εξοικειωμένοι με την SQL να εργαστούν με το Hadoop.
- **Επεκτασιμότητα:** Είναι χτισμένο πάνω στο Hadoop, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να επεκτείνεται οριζόντια, ώστε προσθέτοντας περισσότερους κόμβους ανά συστάδα να μπορεί να επεξεργαστεί μεγαλύτερο όγκο δεδομένων.

- **Ευελξία:** Το Hive υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα μορφών δεδομένων και αυτό το καθιστά ένα ευέλικτο εργαλείο για την ανάλυση μεγάλου εύρους πηγών δεδομένων.



Εικόνα 2.4 Αρχιτεκτονική Apache Hive [21]

2.5.4 Sqoop

Το Apache Sqoop (συντομογραφία του SQL-to-Hadoop) είναι ένα εργαλείο που έχει σχεδιαστεί για την αποτελεσματική μεταφορά μαζικών δεδομένων μεταξύ του Hadoop και δομημένων αποθηκευτικών χώρων δεδομένων, όπως σχεσιακές βάσεις δεδομένων, αποθήκες δεδομένων και βάσεις δεδομένων NoSQL. Επιτρέπει στους χρήστες να εισάγουν δεδομένα από το HDFS, όπως επίσης και να εξάγουν από αυτό. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται συνήθως ως ETL, που σημαίνει Extract, Transform, and Load (εξαγωγή, μετασχηματισμός και φόρτωση) [22]. Το Apache Sqoop χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε συνδέσμους για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ του Hadoop και εξωτερικών πηγών δεδομένων. Υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα συνδέσμων για δημοφιλείς πηγές δεδομένων, όπως η MySQL, η Oracle, ο SQL Server, η PostgreSQL και πολλές άλλες. Αυτοί οι σύνδεσμοι επιτρέπουν στο Sqoop να κατανοεί τις συγκεκριμένες μορφές δεδομένων και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας κάθε πηγής δεδομένων.

Το Sqoop παρέχει μια διεπαφή γραμμής εντολών και μια γραφική διεπαφή χρήστη για την εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων. Οι χρήστες μπορούν να καθορίσουν τα δεδομένα προς εισαγωγή/εξαγωγή χρησιμοποιώντας ερωτήματα SQL ή καθορίζοντας πίνακες ή στήλες. Άλλες περιπτώσεις χρήσης του Apache Sqoop είναι εξαγωγή επεξεργασμένων δεδομένων από το Hadoop πίσω σε μια σχεσιακή βάση δεδομένων ή μια αποθήκη δεδομένων για περαιτέρω ανάλυση ή υποβολή εκθέσεων και η μεταφορά δεδομένων μεταξύ συστάδων Hadoop ή μεταξύ του Hadoop και άλλων πλατφορμών μεγάλων δεδομένων, όπως το Apache Spark ή το Apache Kafka [23].

Ορισμένα πλεονεκτήματα του Apache Sqoop είναι:

- **Εύκολη ενσωμάτωση:** Το Sqoop παρέχει έναν εύκολο και αποτελεσματικό τρόπο ενσωμάτωσης του Hadoop με σχεσιακές βάσεις δεδομένων και αποθήκες δεδομένων. Αυτό

επιτρέπει στους χρήστες να εισάγουν δεδομένα από αυτές τις πηγές στο Hadoop για επεξεργασία και ανάλυση.

- **Επεκτασιμότητα:** Το Sqoop έχει σχεδιαστεί για να διαχειρίζεται μεγάλους όγκους δεδομένων και μπορεί να μεταφέρει δεδομένα παράλληλα, καθιστώντας το εξαιρετικά κλιμακούμενο.
- **Ευέλικτη εισαγωγή/εξαγωγή δεδομένων:** Το Sqoop υποστηρίζει την εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων σε διάφορες μορφές, όπως CSV, Avro, Parquet και SequenceFile.
- **Εύκολη διασύνδεση:** Το Sqoop διαθέτει ένα ευρύ φάσμα συνδέσμων για δημοφιλείς σχεσιακές βάσεις δεδομένων και αποθήκες δεδομένων, καθιστώντας εύκολη τη σύνδεση με αυτές τις πηγές.

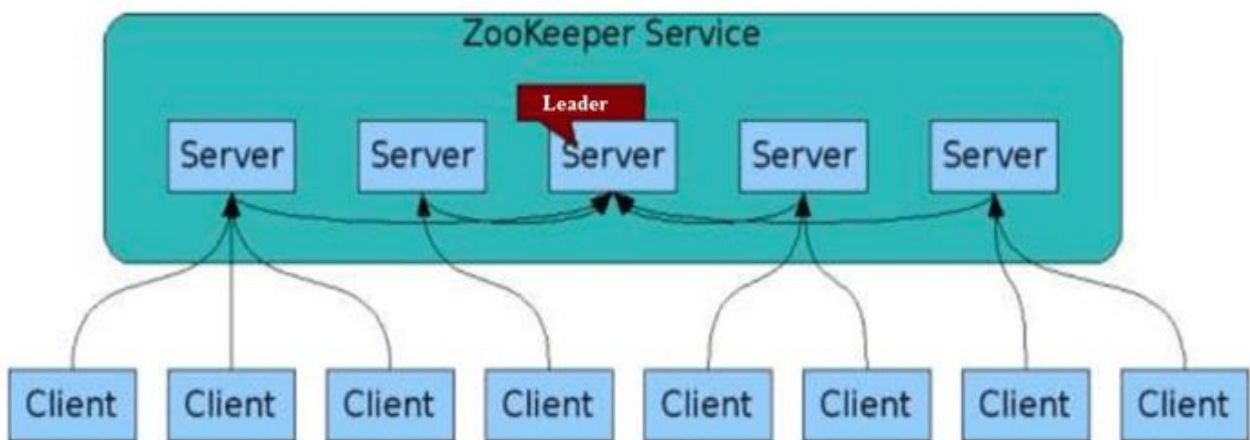
2.5.5 Zookeeper

Το Apache ZooKeeper είναι μια υπηρεσία κατανεμημένου συντονισμού που παρέχει μια κεντρική υποδομή για τη διαχείριση και τον συγχρονισμό των πληροφοριών διαμόρφωσης, κατάστασης και μεταδεδομένων των κατανεμημένων εφαρμογών. Πρόκειται για ένα έργο ανοικτού κώδικα που παρέχει μια απλή διεπαφή για κατανεμημένα συστήματα για τη διαχείριση κοινών πόρων. Στον πυρήνα του, το ZooKeeper παρέχει έναν ιεραρχικό χώρο ονομάτων, παρόμοιο με ένα σύστημα αρχείων, τον οποίο οι εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιούν για την αποθήκευση δεδομένων, γνωστά ως znodes. Κάθε znode μπορεί να κρατήσει μια μικρή ποσότητα δεδομένων και μπορεί επίσης να έχει παιδιά znodes. Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στον κόμβο znode μπορεί να είναι μια τιμή διαμόρφωσης, πληροφορίες κατάστασης ή οποιοδήποτε άλλο μικρό κομμάτι μεταδεδομένων [24]. Η αρχιτεκτονική του παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5.

Το ZooKeeper χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλά κατανεμημένα συστήματα μεγάλης κλίμακας, συμπεριλαμβανομένων των Hadoop, HBase, Kafka και πολλών άλλων. Παρέχει έναν αξιόπιστο και κλιμακούμενο τρόπο διαχείρισης του συντονισμού και της διαμόρφωσης αυτών των συστημάτων. Έχει σχεδιαστεί για να παρέχει διάφορα βασικά χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία κατανεμημένων συστημάτων, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Συντονισμός:** Το ZooKeeper παρέχει έναν αξιόπιστο τρόπο συντονισμού των δραστηριοτήτων των κατανεμημένων εφαρμογών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση κατανεμημένων κλειδαριών, την εκλογή ηγέτη και άλλων πρωτοβουλιών συντονισμού που είναι απαραίτητα για την κατασκευή κατανεμημένων συστημάτων με ανοχή σε σφάλματα.
- **Συγχρονισμός:** Το ZooKeeper παρέχει έναν τρόπο για τις κατανεμημένες εφαρμογές να συγχρονίζουν την πρόσβασή τους σε κοινόχρηστους πόρους. Παρέχει έναν μηχανισμό για την υλοποίηση φραγμών και άλλων πρωτοβουλιών συγχρονισμού.

- **Διαχείριση ρυθμίσεων:** Το ZooKeeper μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση της διαμόρφωσης κατανεμημένων εφαρμογών. Παρέχει έναν τρόπο αποθήκευσης και ανάκτησης τιμών διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται από κοινού από πολλούς κόμβους του συστήματος.
- **Ονομασία και ανακάλυψη:** Το ZooKeeper παρέχει μια υπηρεσία ονοματολογίας που επιτρέπει στις κατανεμημένες εφαρμογές να ανακαλύπτουν τη θέση των κοινόχρηστων πόρων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση της ανακάλυψης υπηρεσιών, όπου οι πελάτες μπορούν να ανακαλύπτουν δυναμικά τη θέση των υπηρεσιών στις οποίες πρέπει να έχουν πρόσβαση.



Εικόνα 2.5 Αρχιτεκτονική Zookeeper [25]

Τα πλεονεκτήματα του Apache ZooKeeper παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Υψηλή αξιοπιστία:** ZooKeeper έχει σχεδιαστεί για να είναι εξαιρετικά αξιόπιστο και ανεκτικό σε σφάλματα. Χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική αντιγραφής που εξασφαλίζει ότι τα δεδομένα είναι πάντα διαθέσιμα, ακόμη και σε περίπτωση αποτυχίας κόμβων.
- **Επεκτασιμότητα:** Το ZooKeeper μπορεί εύκολα να κλιμακωθεί για να διαχειρίζεται μεγάλες ποσότητες δεδομένων και υψηλά επίπεδα ταυτόχρονης χρήσης.
- **Διασύνδεση με Advanced Programming Interface (API):** Το ZooKeeper παρέχει ένα απλό API που επιτρέπει στους προγραμματιστές να διαχειρίζονται εύκολα κοινόχρηστους πόρους σε κατανεμημένες εφαρμογές.

- **Αποδοτικότητα:** Το ZooKeeper έχει σχεδιαστεί για να είναι εξαιρετικά αποδοτικό και μπορεί να χειριστεί μεγάλο αριθμό πελατών και συναλλαγών χωρίς καμία υποβάθμιση της απόδοσης.
- **Λογισμικό ανοιχτού κώδικα:** Το ZooKeeper είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα και χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλά καταναμεμημένα συστήματα μεγάλης κλίμακας.

2.6 Εφαρμογές

Τα ΜΔ έχουν πολυάριθμες εφαρμογές σε διάφορους κλάδους και έχουν εφαρμοστεί στην πραγματική ζωή για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων και την απόκτηση πολύτιμων πληροφοριών. Τα ΜΔ είναι ένα ισχυρό εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών για την απόκτηση πολύτιμων πληροφοριών, τη βελτίωση της αποδοτικότητας, τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της εμπειρίας των πελατών. Η εφαρμογή τους στην πραγματική ζωή έχει οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις σε διάφορους κλάδους και η χρήση τους αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται στο μέλλον.

Διάφορες εφαρμογές που μπορούν να δημιουργηθούν αξιοποιώντας τα ΜΔ παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Υγειονομική περίθαλψη:** Τα ΜΔ χρησιμοποιούνται στον κλάδο της υγειονομικής περίθαλψης για τη βελτίωση της περίθαλψης και των αποτελεσμάτων των ασθενών. Οι επαγγελματίες της ιατρικής μπορούν να συλλέγουν και να αναλύουν δεδομένα ασθενών για να αναπτύσσουν αποτελεσματικότερες θεραπείες και να εντοπίζουν πιθανούς κινδύνους για την υγεία. Για παράδειγμα, οι γιατροί μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα ΜΔ για να προβλέψουν ποιοι ασθενείς κινδυνεύουν να αναπτύξουν ορισμένες ασθένειες και να λάβουν προληπτικά μέτρα για την πρόληψή τους.
- **Χρηματοοικονομικά:** Τα ΜΔ χρησιμοποιούνται στον χρηματοοικονομικό κλάδο για τον εντοπισμό απάτης, τη διαχείριση κινδύνων και τη λήψη καλύτερων επενδυτικών αποφάσεων. Τα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα μπορούν να χρησιμοποιούν τα ΜΔ για να αναλύουν τις τάσεις της αγοράς και να λαμβάνουν αποφάσεις βάσει δεδομένων για τη μεγιστοποίηση των αποδόσεών τους. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν τα ΜΔ για να ανιχνεύσουν δόλιες δραστηριότητες και να εντοπίσουν πιθανούς κινδύνους σε πραγματικό χρόνο.
- **Λιανικό εμπόριο:** Τα ΜΔ χρησιμοποιούνται στον κλάδο του λιανικού εμπορίου για τη βελτίωση της εμπειρίας των πελατών και την αύξηση των πωλήσεων. Οι λιανοπωλητές μπορούν να χρησιμοποιούν δεδομένα πελατών για να εξατομικεύουν τις εκστρατείες μάρκετινγκ και να προσφέρουν εξατομικευμένες συστάσεις με βάση το ιστορικό αγορών τους. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν τα Big Data για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της αλυσίδας εφοδιασμού και της διαχείρισης αποθεμάτων τους, ώστε να μειώσουν το κόστος και να βελτιώσουν την αποδοτικότητα.

- **Κατασκευαστικός τομέας:** Τα ΜΔ χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής και τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων. Οι κατασκευαστές μπορούν να χρησιμοποιούν τα ΜΔ για να παρακολουθούν την απόδοση του εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο και να εντοπίζουν πιθανά προβλήματα πριν προκαλέσουν διακοπή λειτουργίας. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν Big Data για να αναλύσουν δεδομένα προϊόντων και να εντοπίσουν περιοχές όπου μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα και να μειώσουν τα ελαττώματα.
- **Τηλεπικοινωνίες:** Τα ΜΔ χρησιμοποιούνται στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και της εμπειρίας των πελατών. Οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών μπορούν να χρησιμοποιούν τα ΜΔ για να παρακολουθούν την κυκλοφορία του δικτύου και να εντοπίζουν πιθανά προβλήματα σε πραγματικό χρόνο. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν τα ΜΔ για να αναλύσουν τα δεδομένα των πελατών και να εξατομικεύσουν τις εκστρατείες μάρκετινγκ για να βελτιώσουν τη διατήρηση των πελατών τους.

Οι οργανισμοί χρησιμοποιούν πλατφόρμες Big Data για να τους δώσουν απαντήσεις σε σημαντικά ερωτήματα σε δευτερόλεπτα, επιτρέποντας την αύξηση του ρυθμού λήψης αποφάσεων τόσο σε επιχειρησιακό όσο και σε τακτικό επίπεδο. Οργανισμοί όπως η CapitalOne, FreshDirect, Tesco, Walmart, Amazon, eBay και Google χρησιμοποιούν τα ΜΔ για να πειραματιστούν με συνδυασμούς τμημάτων της αγοράς και νέα προϊόντα. Καθημερινά παραδείγματα μπορεί να εντοπιστούν και στις πιο γνωστές παγκόσμιες εταιρείες. Πιο συγκεκριμένα, η Walmart χρησιμοποιεί δεδομένα συναλλαγών για τα εκατομμύρια των πελατών της για να αναλύσει νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες. Η Amazon, το eBay και η Google χρησιμοποιούν επίσης τα ΜΔ για να αυξήσουν τις επιδόσεις τους και να αναλύσουν την συμπεριφορά της αγοράς [26].

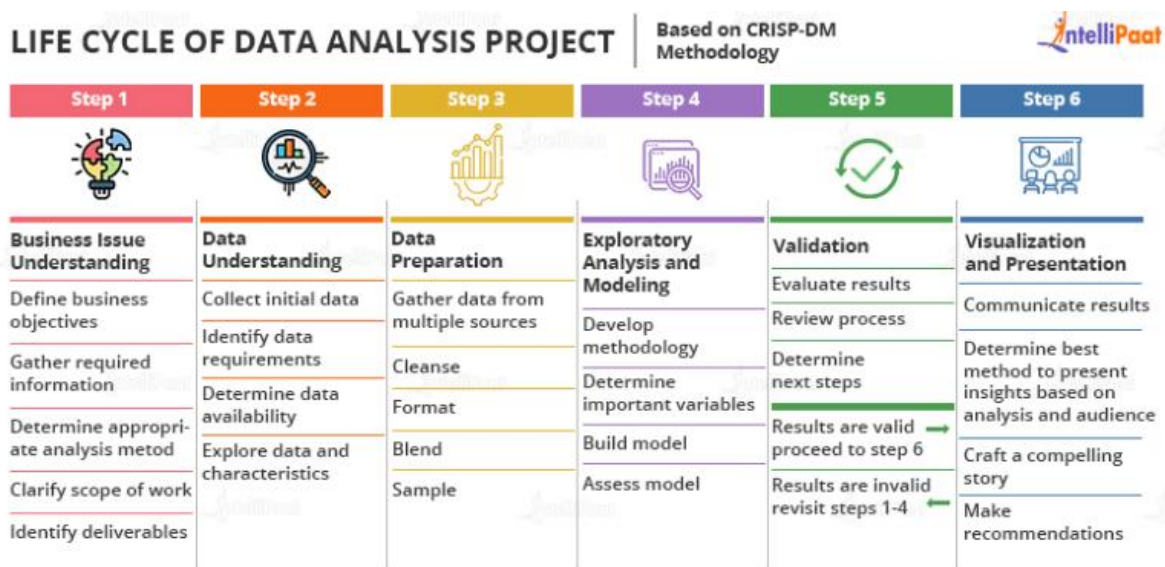
2.7 Ανάλυση ΜΔ

Η ανάλυση ΜΔ είναι η διαδικασία ανάλυσης μεγάλων και πολύπλοκων συνόλων δεδομένων για την αποκάλυψη πληροφοριών, μοτίβων και τάσεων που μπορούν να δώσουν πληροφορίες για επιχειρηματικές αποφάσεις. Περιλαμβάνει την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών και στρατηγικών για την εξαγωγή αξίας από τεράστιους όγκους οργανωμένων, ημιδομημένων και αδόμητων δεδομένων που δημιουργούνται από διάφορες πηγές, όπως τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, οι αισθητήρες, τα συστήματα συναλλαγών και άλλα.

Ο κύριος στόχος της ανάλυσης μεγάλων δεδομένων είναι να δώσει τη δυνατότητα στους οργανισμούς να λαμβάνουν αποφάσεις βάσει δεδομένων που μπορούν να βελτιώσουν τις λειτουργίες τους, να μειώσουν το κόστος και να βελτιώσουν τις εμπειρίες των πελατών. Ορισμένα από τα βασικά βήματα που εμπλέκονται στην ανάλυση μεγάλων δεδομένων [27] απεικονίζονται στην Εικόνα 2.6 και περιλαμβάνουν τα εξής:

- Ανίχνευση και σχηματισμός δεδομένων

- Προετοιμασία και επεξεργασία δεδομένων
- Σχεδιασμός μοντέλου
- Κατασκευή μοντέλου
- Επικοινωνία και δημοσίευση αποτελεσμάτων
- Μέτρηση αποτελεσματικότητας



Εικόνα 2.6 Βήματα ανάλυσης ΜΔ [27]

2.7.1 Ανίχνευση και σχηματισμός δεδομένων

Η ανίχνευση και ο σχηματισμός δεδομένων είναι σημαντικά βήματα στη διαδικασία της ανάλυσης ΜΔ. Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν τον εντοπισμό και την προετοιμασία των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για ανάλυση.

Η ανίχνευση δεδομένων αναφέρεται στη διαδικασία εντοπισμού και κατανόησης των δεδομένων που είναι διαθέσιμα για ανάλυση. Αυτό περιλαμβάνει τον εντοπισμό των πηγών των δεδομένων, της μορφής στην οποία είναι αποθηκευμένα και τυχόν πιθανών προβλημάτων με τα δεδομένα. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, οι αναλυτές μπορούν επίσης να εντοπίσουν τυχόν κενά στα δεδομένα και να καθορίσουν εάν απαιτούνται πρόσθετες πηγές δεδομένων.

Μόλις συλλεχθούν τα δεδομένα, το επόμενο βήμα είναι ο σχηματισμός των δεδομένων. Αυτό περιλαμβάνει την προετοιμασία των δεδομένων για ανάλυση με τον καθαρισμό, την ενσωμάτωση και τον μετασχηματισμό τους σε μορφή κατάλληλη για ανάλυση. Το βήμα αυτό είναι σημαντικό,

διότι η ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των γνώσεων που παράγονται.

2.7.2 Προετοιμασία και επεξεργασία δεδομένων

Στην συνέχεια εφαρμόζεται η προετοιμασία και η επεξεργασία των δεδομένων. Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν τον μετασχηματισμό των δεδομένων σε μορφή που μπορεί να αναλυθεί, καθώς και τον καθαρισμό και το φιλτράρισμα των δεδομένων για την αφαίρεση σφαλμάτων και άσχετων πληροφοριών.

Η προετοιμασία δεδομένων περιλαμβάνει την επιλογή των σχετικών πηγών δεδομένων και την εξαγωγή των απαραίτητων δεδομένων από αυτές τις πηγές. Αυτό περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των πηγών δεδομένων που είναι πιο χρήσιμες για την ανάλυση και τον προσδιορισμό του καλύτερου τρόπου εξαγωγής των σχετικών πληροφοριών από τις πηγές αυτές. Η προετοιμασία δεδομένων μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τη συγχώνευση ή την ένωση συνόλων δεδομένων από διαφορετικές πηγές για τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης άποψης των δεδομένων.

Μόλις εξαχθούν τα δεδομένα, το επόμενο βήμα είναι η επεξεργασία δεδομένων. Αυτό περιλαμβάνει τον καθαρισμό των δεδομένων για την αφαίρεση τυχόν σφαλμάτων ή ασυνεπειών, όπως τα ελλιπή ή διπλά δεδομένα. Η επεξεργασία δεδομένων μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τον μετασχηματισμό των δεδομένων σε μορφή που είναι ευκολότερη στην ανάλυση, όπως η μετατροπή δεδομένων κειμένου σε αριθμητικές τιμές ή η συγκέντρωση δεδομένων σε κατηγορίες με νόημα. Η επεξεργασία δεδομένων μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τεχνικές μείωσης δεδομένων, όπως δειγματοληψία ή ομαδοποίηση, για τη μείωση του όγκου των δεδομένων που πρέπει να αναλυθούν. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν πρόκειται για μεγάλα σύνολα δεδομένων, καθώς η ταυτόχρονη επεξεργασία όλων των δεδομένων μπορεί να είναι χρονοβόρα και απαιτητική σε πόρους. Η συγκεκριμένη φάση κρίνεται πολύ ουσιαστική, καθώς διασφαλίζεται η ποιότητα των δεδομένων με συνεχή επαλήθευση τους με τις επίσημες πηγές.

2.7.3 Σχεδιασμός μοντέλου

Η φάση σχεδιασμού του μοντέλου ανάλυσης των συλλεγόμενων δεδομένων είναι ένα κρίσιμο βήμα στην ανάλυση ΜΔ που περιλαμβάνει τον καθορισμό των στόχων της ανάλυσης και των προσδοκώμενων αποτελεσμάτων ώστε να μπορεί να παραμετροποιηθεί κατάλληλα το μοντέλο ανάλυσης. Στο βήμα αυτό καθορίζονται επίσης οι διάφορες μεθοδολογίες, στρατηγικές ανάλυσης και ροές εργασιών που θα χρησιμοποιηθούν στην επόμενη φάση. Το μοντέλο για να λειτουργήσει αποτελεσματικά απαιτεί την φόρτωση επεξεργασμένων δεδομένων που έχουν συγκεντρωθεί από τις προηγούμενες φάσεις. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να φορτωθούν τα δεδομένα στο σύστημα και να ξεκινήσει η ανάλυσή τους:

- **ETL (εξαγωγή, μετασχηματισμός και φόρτωση)** χρησιμοποιεί ένα σύνολο επιχειρηματικών κανόνων για τη μετατροπή των πληροφοριών πριν από τη φόρτωσή τους σε ένα σύστημα.
- **ELT (Extract, Load, and Transform)** είναι ένα εργαλείο που φορτώνει ακατέργαστα δεδομένα στο sandbox πριν από την επεξεργασία τους.

- **ETLT (Extract, Transform, Load, Transform)** είναι ένας μετασχηματιστικός συνδυασμός δύο επιπέδων.

Με αυτό τον τρόπο αναπτύσσονται τα σύνολα δεδομένων για εκπαίδευση και δοκιμή και χρήση, καθώς εξετάζονται εάν τα διαθέσιμα δεδομένα, αλλά και εργαλεία είναι επαρκή για την ανάλυση των δεδομένων.

2.7.4 Κατασκευή μοντέλου

Η φάση δημιουργίας μοντέλων περιλαμβάνει τη χρήση μοντέλων δεδομένων για τη δημιουργία πληροφοριών και την πραγματοποίηση προβλέψεων. Τα βήματα που εκτελούνται σε αυτό το στάδιο παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- **Επιλογή μοντέλου:** Περιλαμβάνει την επιλογή ενός προκατασκευασμένου μοντέλου ή εκ νέου δημιουργία σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ανάλυσης. Μπορεί να είναι ένα δέντρο αποφάσεων ή ένα μοντέλο παλινδρόμησης, ή την ανάπτυξη ενός προσαρμοσμένου μοντέλου με τη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης.
- **Εκπαίδευση του μοντέλου:** Μετά την επιλογή ενός μοντέλου δεδομένων, το επόμενο βήμα είναι η εκπαίδευση του μοντέλου χρησιμοποιώντας τα προετοιμασμένα δεδομένα. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση ενός υποσυνόλου δεδομένων για την εκπαίδευση του μοντέλου και την κράτηση ενός άλλου υποσυνόλου για τη δοκιμή της ακρίβειας του μοντέλου.
- **Επικύρωση του μοντέλου:** Αφού εκπαιδευτεί το μοντέλο, το επόμενο βήμα είναι η επικύρωση της ακρίβειάς του. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη σύγκριση των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα πραγματικά αποτελέσματα ή τη χρήση στατιστικών μέτρων, όπως η ακρίβεια, η ανάκληση και η βαθμολογία F1 για την αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου.
- **Ρύθμιση του μοντέλου:** Με βάση τα αποτελέσματα της φάσης επικύρωσης, το επόμενο βήμα είναι η ρύθμιση του μοντέλου για τη βελτίωση της ακρίβειάς του. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου, την επιλογή διαφορετικών μεταβλητών εισόδου ή την επανεκπαίδευση του μοντέλου με πρόσθετα δεδομένα.
- **Ανάπτυξη του μοντέλου:** Μετά τη ρύθμιση και την επικύρωση του μοντέλου, το τελικό βήμα στη φάση κατασκευής του μοντέλου είναι η ανάπτυξη του μοντέλου σε περιβάλλον παραγωγής. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την ενσωμάτωση του μοντέλου σε μια ευρύτερη πλατφόρμα ανάλυσης δεδομένων ή την ανάπτυξη προσαρμοσμένου κώδικα για την εκτέλεση του μοντέλου σε ένα συγκεκριμένο σύστημα ή εφαρμογή.

2.7.5 *Επικοινωνία και δημοσίευση αποτελεσμάτων*

Το συγκεκριμένο στάδιο περιλαμβάνει την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των δεδομένων με τους ενδιαφερόμενους και τη δημοσίευσή τους σε μορφή που να μπορεί να καταναλωθεί και να γίνει εύκολα κατανοητή. Η φάση αυτή περιλαμβάνει συνήθως διάφορα βασικά βήματα, τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

- **Τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων:** Το πρώτο βήμα στη φάση της επικοινωνίας και δημοσίευσης αποτελεσμάτων είναι η τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας έκθεσης ή παρουσίασης που συνοψίζει τα βασικά ευρήματα, τις γνώσεις και τις συστάσεις.
- **Επιλογή μέσου παρουσίασης:** Αφού τεκμηριωθούν τα αποτελέσματα, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του κατάλληλου μέσου επικοινωνίας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την επιλογή μιας μορφής παρουσίασης, όπως ένα slide deck ή ένα βίντεο, ή την ανάπτυξη μιας γραπτής έκθεσης που μπορεί να διανεμηθεί στους ενδιαφερόμενους.
- **Προετοιμασία της παρουσίασης:** Μόλις επιλεγεί το μέσο, το επόμενο βήμα είναι η προετοιμασία της επικοινωνίας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη δημιουργία οπτικοποιήσεων ή άλλων υποστηρικτικών υλικών που θα βοηθήσουν στη μεταφορά των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με σαφή και συνοπτικό τρόπο.
- **Παράδοση της παρουσίασης:** Μετά την προετοιμασία της επικοινωνίας, το επόμενο βήμα είναι η παράδοσή της στους ενδιαφερόμενους. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μια συνάντηση, τη διανομή μιας γραπτής έκθεσης μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου ή την κοινή χρήση μιας βιντεοπαρουσίασης μέσω ενός κοινόχρηστου δίσκου.
- **Ενσωμάτωση ανατροφοδότησης:** Αφού παραδοθεί η επικοινωνία, το τελευταίο βήμα είναι η ενσωμάτωση των ανατροφοδοτήσεων των ενδιαφερομένων μερών. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αναθεώρηση της έκθεσης ή της παρουσίασης με βάση την ανατροφοδότηση των ενδιαφερομένων ή τη χρήση της ανατροφοδότησης για την ενημέρωση μελλοντικών προσπαθειών ανάλυσης και μοντελοποίησης.

2.7.6 *Μέτρηση αποτελεσματικότητας*

Το στάδιο της μέτρησης της αποτελεσματικότητας στην ανάλυση ΜΔ περιλαμβάνει την αξιολόγηση του αντίκτυπου και της αποτελεσματικότητας της ανάλυσης και των πληροφοριών που παράγονται κατά τη φάση μοντελοποίησης. Η φάση αυτή είναι κρίσιμη για τον προσδιορισμό του κατά πόσον η ανάλυση πέτυχε τους επιδιωκόμενους στόχους της και για τον εντοπισμό τομέων για περαιτέρω βελτίωση. Περιλαμβάνει συνήθως τα κάτωθι βήματα:

- **Καθορισμός μετρήσεων επιτυχίας:** Το πρώτο βήμα στη φάση της μέτρησης της αποτελεσματικότητας είναι ο καθορισμός μετρήσεων επιτυχίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της ανάλυσης. Αυτές οι μετρήσεις μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τους συγκεκριμένους στόχους της ανάλυσης, αλλά μπορεί να περιλαμβάνουν μέτρα όπως η αύξηση των εσόδων, η βελτίωση της ικανοποίησης των πελατών ή η μείωση του κόστους.
- **Συλλογή δεδομένων:** Αφού καθοριστούν οι μετρήσεις επιτυχίας, το επόμενο βήμα είναι η συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για την αξιολόγηση του αντικτύπου τους. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων από διάφορες πηγές, όπως έρευνες πελατών, εκθέσεις πωλήσεων και άλλες εσωτερικές και εξωτερικές πηγές.
- **Ανάλυση των δεδομένων:** Αφού συλλεχθούν τα δεδομένα, το επόμενο βήμα είναι η ανάλυσή τους για να προσδιοριστεί ο αντίκτυπος της ανάλυσης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη διενέργεια στατιστικής ανάλυσης, οπτικοποίησης δεδομένων ή άλλων μεθόδων ανάλυσης δεδομένων για τον εντοπισμό τάσεων και προτύπων.
- **Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων:** Αφού αναλυθούν τα δεδομένα, το επόμενο βήμα είναι η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για να προσδιοριστεί αν η ανάλυση ήταν αποτελεσματική. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις επιτυχίας που καθορίστηκαν στο βήμα 1 ή τη χρήση άλλων κριτηρίων για την αξιολόγηση του αντίκτυπου της ανάλυσης.
- **Επανάληψη και βελτίωση:** Τέλος, η φάση μέτρησης της αποτελεσματικότητας μπορεί να περιλαμβάνει επανάληψη και βελτίωση της ανάλυσης με βάση τα αποτελέσματα της αξιολόγησης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει αλλαγές στην προσέγγιση της ανάλυσης, στις πηγές δεδομένων ή στις μετρήσεις επιτυχίας ή την τελειοποίηση της ανάλυσης με βάση τα σχόλια των ενδιαφερομένων μερών.

2.8 ΜΔ και Υπολογιστικό Νέφος

Το υπολογιστικό νέφος είναι ένα μοντέλο παροχής υπολογιστικών πόρων (όπως διακομιστές, αποθηκευτικοί χώροι, βάσεις δεδομένων, δικτύωση, λογισμικό, αναλύσεις και άλλα) μέσω του διαδικτύου. Αντί της διατήρησης φυσικών διακομιστών και κέντρων δεδομένων στις εγκαταστάσεις, το υπολογιστικό νέφος επιτρέπει στους οργανισμούς να έχουν πρόσβαση σε υπολογιστικούς πόρους κατά παραγγελία και να πληρώνουν μόνο για ό,τι χρησιμοποιούν, καθιστώντας το μια ευέλικτη και οικονομικά αποδοτική επιλογή για τη διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων. Χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με την ανάλυση μεγάλων δεδομένων, επειδή προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα για τη διαχείριση και την ανάλυση δεδομένων, όπως:

- **Επεκτασιμότητα:** Το υπολογιστικό νέφος επιτρέπει στους οργανισμούς να αυξάνουν ή να μειώνουν τους υπολογιστικούς τους πόρους ανάλογα με τις ανάγκες τους, καθιστώντας εύκολη τη διαχείριση των μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων που απαιτεί η ανάλυση μεγάλων δεδομένων.
- **Προσβασιμότητα:** Οι πόροι υπολογιστικού νέφους είναι προσβάσιμοι από οπουδήποτε υπάρχει σύνδεση στο διαδίκτυο, καθιστώντας εύκολη τη συνεργασία γεωγραφικά διασκορπισμένων ομάδων σε έργα ανάλυσης μεγάλων δεδομένων.
- **Αποδοτικότητα:** Το υπολογιστικό νέφος επιτρέπει στους οργανισμούς να πληρώνουν μόνο για τους υπολογιστικούς πόρους που χρησιμοποιούν, καθιστώντας το μια οικονομικά αποδοτική επιλογή για τη διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων.
- **Ασφάλεια:** Οι πάροχοι υπηρεσιών νέφους διαθέτουν συνήθως ισχυρά μέτρα ασφαλείας για την προστασία των δεδομένων, καθιστώντας την ασφαλή επιλογή για την ανάλυση μεγάλων δεδομένων.

Τα ΜΔ και το υπολογιστικό νέφος έχουν άμεση συσχέτιση λόγω της ικανότητας του υπολογιστικού νέφους να παρέχει κλιμακούμενους πόρους κατά παραγγελία για την αποθήκευση, την επεξεργασία και την ανάλυση μεγάλων δεδομένων. Παράλληλα, παρέχει στους οργανισμούς μια ευέλικτη, οικονομικά αποδοτική και αξιόπιστη υποδομή για την αποθήκευση και την επεξεργασία των μεγάλων δεδομένων τους. Οι πάροχοι υπολογιστικού νέφους προσφέρουν μια ποικιλία υπολογιστικών πόρων, όπως εικονικές μηχανές, αποθήκευση και βάσεις δεδομένων, οι οποίες μπορούν να παρέχονται και να αφαιρούνται γρήγορα. Αυτό βοηθά τους οργανισμούς να διαχειρίζονται αποτελεσματικά και οικονομικά τους φόρτους εργασίας μεγάλων δεδομένων. Επιπρόσθετα, προσφέρουν μια σειρά εργαλείων και υπηρεσιών μεγάλων δεδομένων, όπως το Hadoop, το Spark, το Hive και άλλα, τα οποία μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν και να διαχειριστούν στις πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους τους. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη των οργανισμών να δημιουργήσουν και να διαχειριστούν τη δική τους υποδομή μεγάλων δεδομένων, η οποία μπορεί να είναι χρονοβόρα και δαπανηρή.

Ωστόσο, υπάρχουν επίσης ορισμένες προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση του υπολογιστικού νέφους για μεγάλα δεδομένα. Μία από τις κύριες ανησυχίες είναι η ασφάλεια των δεδομένων που αποθηκεύονται στο νέφος. Οι οργανισμοί πρέπει να διασφαλίζουν ότι τα δεδομένα τους προστατεύονται κατάλληλα από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και ότι συμμορφώνονται με τις κανονιστικές απαιτήσεις. Μια άλλη πρόκληση είναι το ενδεχόμενο εγκλωβισμού σε προμηθευτές. Οι οργανισμοί πρέπει να επιλέγουν προσεκτικά τους παρόχους cloud και να διασφαλίζουν ότι έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν τα δεδομένα και τις εφαρμογές τους σε άλλους παρόχους νέφους, αν χρειαστεί [28].

3

Ασύρματα Δίκτυα

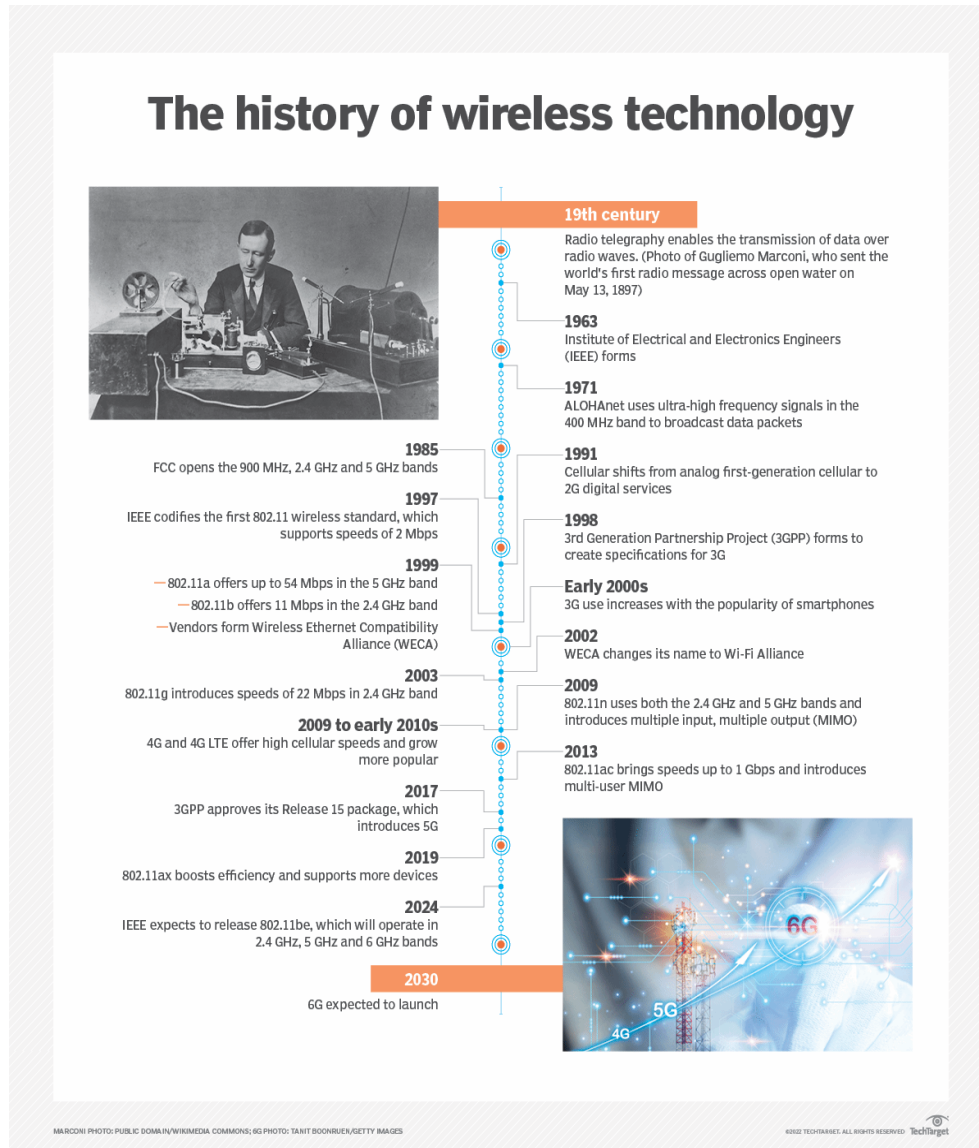
Τα ασύρματα δίκτυα είναι δίκτυα υπολογιστών που χρησιμοποιούν ασύρματες συνδέσεις δεδομένων μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν ραδιοκύματα ή μικροκύματα για τη μετάδοση δεδομένων μέσω του αέρα, επιτρέποντας την κινητή υπολογιστική και επικοινωνία. Τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες με βάση την περιοχή κάλυψης και την τεχνολογία μετάδοσης. Υπάρχουν διαφορετικά είδη ασύρματων δικτύων, τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικά στις επόμενες ενότητες. Τα δίκτυα αυτά είναι απαραίτητα για την κινητή πληροφορική, το IoT και άλλες εφαρμογές που απαιτούν κινητικότητα και ευελιξία, αλλά ενέχουν επίσης κινδύνους ασφαλείας, όπως υποκλοπή δεδομένων και απαιτούν ειδικά μέτρα για την προστασία από αυτές τις απειλές. Με την αξιοποίηση ασύρματων δικτύων σπίτια, τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και εγκαταστάσεις επιχειρήσεων αποφεύγεται η εγκατάσταση καλωδίων με αποτέλεσμα να μειώνονται σημαντικά τα κόστη [29].

Στις επόμενες ενότητες που ακολουθούν θα υλοποιηθεί μια συνοπτική παρουσίαση της ιστορικής αναδρομής των ασύρματων δικτύων, θα αναφερθούν οι βασικές αρχές της ασύρματης μετάδοσης, οι διάφοροι τύποι ασύρματων, κυψελωτών και διάφορων άλλων ασύρματων δικτύων και θα παρατεθούν εφαρμογές τους στην σύγχρονη εποχή.

3.1 Ιστορική Αναδρομή Ασύρματων Δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα έχουν σχετικά μικρή ιστορία [30] σε σύγκριση με άλλες μορφές δικτύων επικοινωνίας και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1. Το πρώτο ασύρματο δίκτυο δημιουργήθηκε το 1895 από τον Ιταλό φυσικό Guglielmo Marconi, ο οποίος μετέδωσε με επιτυχία ένα ασύρματο σήμα σε απόσταση δύο μιλίων. Η ανακάλυψη αυτή έθεσε τα θεμέλια για την ασύρματη τηλεγραφία, η οποία έγινε δημοφιλές μέσο επικοινωνίας για τις επόμενες δεκαετίες.

Στις δεκαετίες του 1920 και 1930, οι ραδιοφωνικές εκπομπές έγιναν δημοφιλείς, επιτρέποντας την ευρεία διανομή ειδήσεων, μουσικής και άλλων μορφών ψυχαγωγίας. Η ανάπτυξη του ραντάρ κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου οδήγησε σε περαιτέρω πρόοδο της ασύρματης τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης μικροκυματικών μεταδόσεων για επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις.



Εικόνα 3.1 Ιστορική ανασκόπηση Ασύρματων Δικτύων [30]

Η εμφάνιση των κινητών τηλεφώνων τη δεκαετία του 1980 σηματοδότησε μια σημαντική καμπή στην ιστορία των ασύρματων δικτύων. Το πρώτο κυψελοειδές δίκτυο ξεκίνησε στην Ιαπωνία το 1979, και μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980, τα κινητά τηλέφωνα είχαν γίνει ευρέως διαθέσιμα σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο.

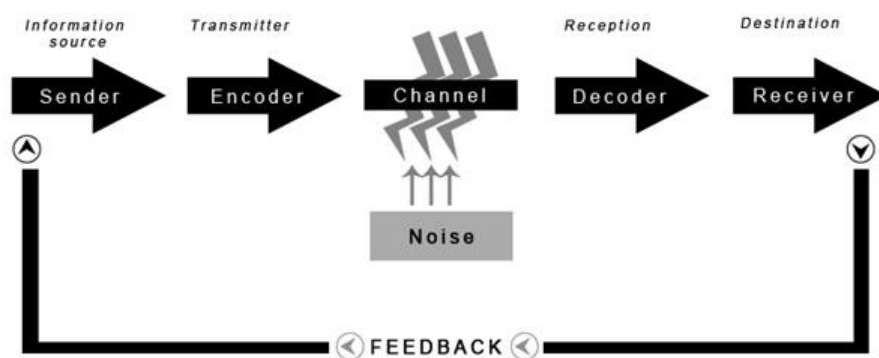
Στη δεκαετία του 1990, η εμφάνιση των ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN) επέτρεψε την ασύρματη πρόσβαση σε δίκτυα υπολογιστών και στο διαδίκτυο. Η ανάπτυξη ασύρματων προτύπων, όπως το Wi-Fi (802.11) και το Bluetooth, διεύρυνε περαιτέρω τις δυνατότητες των ασύρματων δικτύων, επιτρέποντας νέες μορφές επικοινωνίας και συνεργασίας.

Σήμερα, τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν πανταχού παρόν μέρος της καθημερινής ζωής, με εκατομμύρια ανθρώπους σε όλο τον κόσμο να χρησιμοποιούν smartphones, tablet και άλλες ασύρματες συσκευές για να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο, να επικοινωνούν με άλλους και να εκτελούν ένα ευρύ φάσμα εργασιών. Η συνεχής εξέλιξη της ασύρματης τεχνολογίας αναμένεται να

οδηγήσει σε περαιτέρω πρόοδο σε τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, οι μεταφορές και η εκπαίδευση, μεταξύ άλλων.

3.2 Βασικές Αρχές Ασύρματων Επικοινωνιών

Τα ασύρματα δίκτυα λειτουργούν με βάση τις αρχές των ραδιοκυμάτων και του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα ραδιοκύματα είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με εύρος συχνοτήτων από 3kHz έως 300GHz. Χρησιμοποιούνται για την ασύρματη μεταφορά πληροφοριών από μια συσκευή σε μια άλλη μέσω του αέρα. Απαραίτητα στοιχεία για την επιτυχή επικοινωνία μεταξύ δύο πηγών είναι ένας εκπομπής, ο οποίος κωδικοποιεί κατάλληλα το εκπεμπόμενο σήμα για να αποσταλεί στον παραλήπτη, ο οποίος εφαρμόζει την αντίστροφη διαδικασία. Επιπρόσθετα, απαιτείται και ένα μέσο μετάδοσης στο οποίο φυσικά υπάρχουν παρεμβολές και περιττοί θόρυβοι που ενδέχεται να αλλοιώσουν το σήμα. Στην περίπτωση που ο παραλήπτης έχει μεγάλη απόσταση από τον αποστολέα, τότε αξιοποιούνται κατάλληλα μέσα και εξοπλισμοί, τα οποία ενισχύουν κατάλληλα το σήμα και το αναμεταδίδουν προς τον επόμενο σταθμό ή στον τελικό παραλήπτη. Το μοντέλο της ασύρματης επικοινωνίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.



SHANNON-WEAVER'S MODEL OF COMMUNICATION

Εικόνα 3.2 Μοντέλο ασύρματης επικοινωνίας [31]

Η ασύρματη επικοινωνία έχει ορισμένες βασικές αρχές και χαρακτηριστικά, στα οποία πρέπει να βασίζονται όλοι όσοι αξιοποιούν αυτή την τεχνολογία. Οι βασικές αρχές των ασύρματων δικτύων περιλαμβάνουν:

- **Σήματα ραδιοσυχνοτήτων (RF):** Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν σήματα RF για την επικοινωνία. Τα σήματα RF παράγονται από μια κεραία και ταξιδεύουν μέσω του αέρα σε μια κεραία λήψης.
- **Διαμόρφωση:** Οι προς μετάδοση πληροφορίες διαμορφώνονται στο σήμα RF. Η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τον τύπο του ασύρματου δικτύου.

- **Μέσο μετάδοσης:** Το μέσο μετάδοσης σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι ο αέρας. Το σήμα RF ταξιδεύει μέσω του αέρα από την κεραία εκπομπής στην κεραία λήψης.
- **Μέθοδος πρόσβασης:** Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους πρόσβασης για τον διαμοιρασμό του μέσου μετάδοσης μεταξύ πολλαπλών χρηστών, όπως η TDMA, FDMA, CDMA και OFDM που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.
- **Ασφάλεια:** Τα ασύρματα δίκτυα είναι ευάλωτα και υπόκεινται σε υποκλοπές και μη εξουσιοδοτημένες προσβάσεις τρίτων. Ως εκ τούτου, για την ασφάλεια των ασύρματων δικτύων χρησιμοποιούνται μηχανισμοί ασφαλείας, όπως η κρυπτογράφηση, ο έλεγχος ταυτότητας και η εξουσιοδότηση.
- **Τοπολογία δικτύου:** Η τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου μπορεί να είναι ad hoc, υποδομής ή υβριδική. Τα ad hoc δίκτυα είναι ομότιμα δίκτυα, ενώ τα δίκτυα υποδομής διαθέτουν ένα κεντρικό σημείο πρόσβασης. Τα υβριδικά δίκτυα συνδυάζουν τόσο την τοπολογία ad hoc όσο και την τοπολογία υποδομής.
- **Πρότυπα:** Τα ασύρματα δίκτυα λειτουργούν σύμφωνα με διάφορα πρότυπα, όπως Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee και κυψελοειδή δίκτυα. Αυτά τα πρότυπα καθορίζουν τις προδιαγραφές για το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων και το επίπεδο δικτύου του ασύρματου δικτύου.

3.3 Ασύρματες Τεχνολογίες

Στον σημερινό ταχέως εξελισσόμενο και διασυνδεδεμένο κόσμο, η διάχυτη επιρροή των ασύρματων τεχνολογιών δεν μπορεί να υποτιμηθεί. Αυτές οι αξιοσημείωτες καινοτομίες έχουν φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η επικοινωνία. Εξαλείφοντας την ανάγκη για φυσικές συνδέσεις και καλώδια, οι ασύρματες τεχνολογίες έχουν εγκαινιάσει μια εποχή απaráμιλλης αποδοτικότητας και παραγωγικότητας.

Οι ασύρματες τεχνολογίες έχουν αφήσει ανεξίτηλο αντίκτυπο σε διάφορες βιομηχανίες και τομείς. Από την υγειονομική περίθαλψη έως τη μεταποίηση, τις μεταφορές και την ψυχαγωγία, οι τεχνολογίες αυτές ενσωματώνονται απρόσκοπτα στη ζωή μας, προσφέροντας μετασχηματιστικές λύσεις. Ενισχύουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών, επιτρέπουν τη βιομηχανική παρακολούθηση και συντήρηση σε πραγματικό χρόνο και διευκολύνουν τη δημιουργία έξυπνων σπιτιών και πόλεων. Επιπλέον, έχουν φέρει επανάσταση στην κατανάλωση πολυμέσων, με τις υπηρεσίες streaming, τις ασύρματες συσκευές ήχου και τις έξυπνες τηλεοράσεις να παρέχουν άμεση πρόσβαση σε ποικίλο περιεχόμενο. Η ασύρματη φόρτιση και οι κινητές συσκευές έχουν γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας, βελτιώνοντας τον τρόπο ζωής μας. Ωστόσο, οι ασύρματες τεχνολογίες συνεχώς εξελίσσονται και επιτυγχάνουν σημαντική πρόοδο στην ασύρματη επικοινωνία. Η επέκταση των δικτύων 5G και το IoT επαναπροσδιορίζουν τη συνδεσιμότητα, επιτρέποντας ταχύτερες ταχύτητες και ένα πλήθος διασυνδεδεμένων συσκευών. Τα βασικά δίκτυα

που επιτρέπουν την ασύρματη επικοινωνία και θα παρουσιαστούν στις παρακάτω ενότητες και παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.3 είναι τα κάτωθι:

- Wireless Personal Area Network (**WPAN**)
- Wireless Local Area Network (**WLAN**)
- Wireless Metropolitan Area Network (**WMAN**)
- Wireless Wide Area Network (**WWAN**)

Types of wireless networks				
	Wireless LAN (WLAN)	Wireless MAN (WMAN)	Wireless PAN (WPAN)	Wireless WAN (WWAN)
TYPE OF NETWORK	Local area network	Metropolitan area network	Personal area network	Wide area network
GOAL	Provide internet access within a building or limited outdoor area	Provide access outside office and home networks, typically regional	Transmit signals between devices in limited areas, typically 100 meters	Provide access outside the range of WLANs and WMANs
CONNECTIVITY	Cellular	IEEE 802.16 WiMax	Bluetooth, Zigbee and infrared	LTE

Εικόνα 3.3 Τύποι ασύρματων δικτύων [32]

Τα βασικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων περιλαμβάνουν:

- **Υψηλή συνδεσιμότητα:** Επιτρέπουν στους χρήστες να συνδέονται στο δίκτυο και να έχουν πρόσβαση σε πόρους από οπουδήποτε, χωρίς να περιορίζονται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία.
- **Ευελιξία:** Μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν και να διαμορφωθούν ώστε να προσαρμόζονται σε αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου ή στις απαιτήσεις των χρηστών.
- **Επεκτασιμότητα:** Μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλο αριθμό χρηστών και συσκευών, καθιστώντας τα κατάλληλα για χρήση σε μεγάλους οργανισμούς ή δημόσιους χώρους.

- **Αξιοπιστία:** Είναι σχεδιασμένα για να παρέχουν αξιόπιστες και σταθερές συνδέσεις, με χαρακτηριστικά όπως πλεονασμός και μηχανισμοί εναλλαγής αποτυχίας για τη διασφάλιση της συνέχειας των υπηρεσιών.
- **Ασφάλεια:** Πρέπει να παρέχουν ασφαλείς συνδέσεις για την προστασία ευαίσθητων δεδομένων και την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης ή εισβολής.
- **Επιρρεπή σε παρεμβολές:** Ενδέχεται να υπόκεινται σε παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές ή φυσικά εμπόδια, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα και την ταχύτητα της σύνδεσης (Noise).
- **Περιορισμός εύρους ζώνης:** Ενδέχεται να έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης σε σύγκριση με τα ενσύρματα δίκτυα, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση εφαρμογών ή υπηρεσιών έντασης δεδομένων.

3.3.1 Wireless Personal Area Network (WPAN)

Το WPAN (Wireless Personal Area Network) είναι μια μορφή ασύρματου δικτύου που συνδέει συσκευές σε μικρή απόσταση, συχνά λίγων μέτρων, και χρησιμοποιείται συχνά για προσωπικές συσκευές όπως smartphones, tablets και κινητές συσκευές. Στην πραγματικότητα, το WPAN είναι ένα PAN (Personal Area Network), στο οποίο τα δικτυωμένα gadgets συγκεντρώνονται γύρω από το χώρο εργασίας ενός ή ελάχιστων ατόμων και συνδέονται μέσω ασύρματων μέσων. Στην Εικόνα 3.4 απεικονίζεται ένα δίκτυο WPAN [33].

Μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες WPAN είναι το Bluetooth, το οποίο χρησιμοποιείται για ασύρματη επικοινωνία μικρής εμβέλειας μεταξύ συσκευών. Η τεχνολογία Bluetooth λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 2,4 GHz και μπορεί να μεταδίδει δεδομένα με ταχύτητες έως και 3 Mbps. Μια άλλη δημοφιλής τεχνολογία WPAN είναι το Zigbee, το οποίο έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές χαμηλής ισχύος και χαμηλού ρυθμού δεδομένων και λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 2,4 GHz και μπορεί να μεταδώσει δεδομένα σε ταχύτητες έως 250 kbps [34].

Τα WPAN μπορούν να υλοποιηθούν σε διαφορετικές τοπολογίες, όπως αστέρι, πλέγμα και δένδρο συστάδας. Σε μια τοπολογία αστέρα, οι συσκευές συνδέονται σε μια κεντρική συσκευή που ονομάζεται συντονιστής. Σε μια τοπολογία πλέγματος, οι συσκευές συνδέονται μεταξύ τους, επιτρέποντας πλεονασμό και αυξημένη αξιοπιστία. Σε μια τοπολογία δένδρου συστάδων, οι συσκευές οργανώνονται σε συστάδες με μια συσκευή συντονιστή για κάθε συστάδα. Διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, το χαμηλό κόστος και η ευκολία ανάπτυξης. Είναι επίσης εξαιρετικά επεκτάσιμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ποικιλία εφαρμογών, όπως ο οικιακός αυτοματισμός, η υγειονομική περίθαλψη και ο βιομηχανικός αυτοματισμός. Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα στα WPAN. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι το περιορισμένο εύρος επικοινωνίας, το οποίο μπορεί να αποτελέσει μειονέκτημα σε ορισμένες εφαρμογές. Επιπλέον, οι παρεμβολές από άλλα ασύρματα δίκτυα και συσκευές μπορούν επίσης να επηρεάσουν την απόδοση των WPANs [33].

Σύμφωνα με το IEEE, τα Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα Περιοχής κατηγοριοποιούνται σε τρεις τύπους:

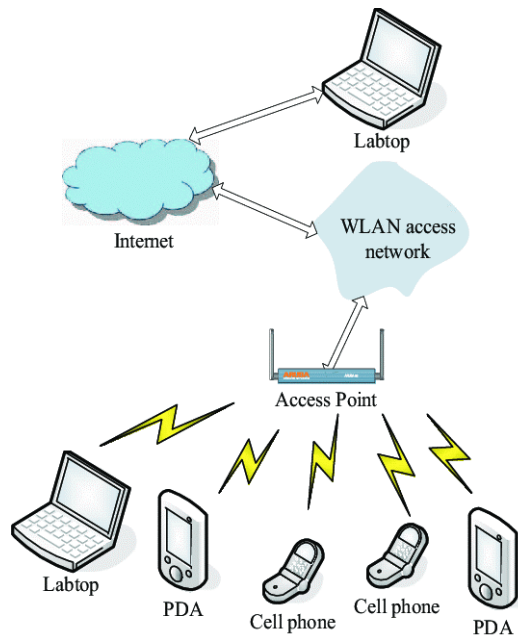
- Το **πρότυπο IEEE 802.15.3** ορίζει το WPAN υψηλού ρυθμού (HR-WPAN). Η απόδοση δεδομένων είναι γύρω στα 55 Mbps στο φάσμα των 2.4 GHz και μπορεί να φτάσει τα 480 Mbps στο φάσμα των 60 GHz.
- Το **πρότυπο IEEE 802.15.1** ορίζει το WPAN μεσαίου ρυθμού (MR-WPAN). Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι περίπου στα 3 Mbps.
- Το **πρότυπο IEEE 802.15.4** ορίζει το WPAN χαμηλού ρυθμού (LR-WPAN). Ο ρυθμός δεδομένων είναι 0,25 Mbps.



Εικόνα 3.4 Δίκτυο WPAN [34]

3.3.2 Wireless Local Area Network (WLAN)

Το WLAN (Wireless Local Area Network) είναι ένας τύπος ασύρματου δικτύου που επιτρέπει στις συσκευές να συνδέονται και να επικοινωνούν μεταξύ τους εντός μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής, συνήθως μερικών εκατοντάδων μέτρων. Η σύνδεση των συσκευών ενός δικτύου WLAN συνδέονται και επικοινωνούν μέσω Wi-Fi, παρέχοντας τις ίδιες υπηρεσίες όπως ένα τυπικό τοπικό δίκτυο. Διαθέτει μηχανισμό DHCP, ώστε να καταχωρεί δυναμικά μια διεύθυνση IP σε κάθε συσκευή που συνδέεται στο δίκτυο [35]. Ένα παράδειγμα δικτύου τύπου WLAN απεικονίζεται στην Εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5 Δίκτυο WLAN [36]

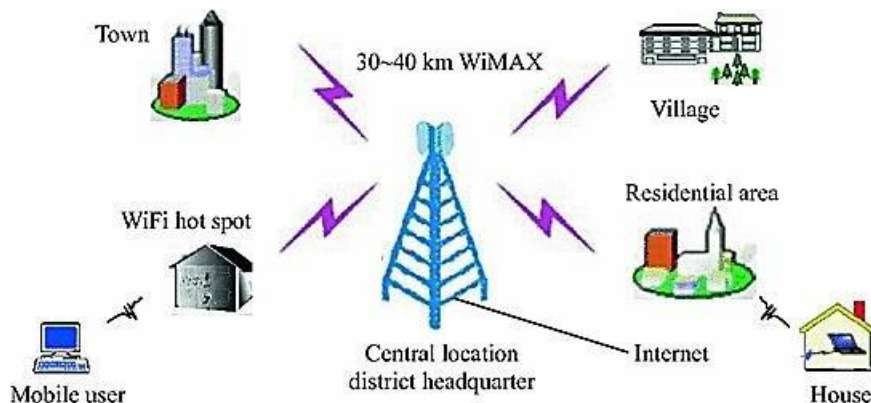
Τα WLAN λειτουργούν χρησιμοποιώντας πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας, όπως το Wi-Fi (Wireless Fidelity), το οποίο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο για τα WLAN. Το Wi-Fi χρησιμοποιεί σήματα ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency - RF) για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών, συνήθως χρησιμοποιώντας τις ζώνες συχνοτήτων 2,4 GHz ή 5 GHz. Αποτελούνται από δύο κύρια στοιχεία: ασύρματα σημεία πρόσβασης (Access Point - AP) και ασύρματες κάρτες διασύνδεσης δικτύου (Network Interface Card - NIC). Το AP λειτουργεί ως κεντρικό σημείο σύνδεσης για τις ασύρματες συσκευές, παρέχοντας μια γέφυρα μεταξύ του ασύρματου δικτύου και ενός ενσύρματου δικτύου, όπως το Διαδίκτυο. Η κάρτα NIC επιτρέπει σε συσκευές όπως φορητοί υπολογιστές, smartphones και tablet να συνδέονται στο WLAN και να επικοινωνούν με άλλες συσκευές στο δίκτυο.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των WLAN είναι ότι συνήθως αναπτύσσονται σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, όπως ένα κτίριο ή μια πανεπιστημιούπολη, αντί να καλύπτουν μια ευρεία περιοχή όπως τα κυβελοειδή δίκτυα. Αυτό επιτρέπει στα WLAN να παρέχουν υψηλής ταχύτητας, αξιόπιστη συνδεσιμότητα για συσκευές εντός της περιοχής, χωρίς την ανάγκη για καλώδια ή ενσύρματη υποδομή. Μπορούν να υποστηρίξουν μια σειρά εφαρμογών, όπως ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, περιήγηση στο διαδίκτυο, τηλεδιάσκεψεις και κοινή χρήση αρχείων. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε επιχειρηματικά και εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, καθώς και σε δημόσιους χώρους όπως αεροδρόμια, καφετέριες και ξενοδοχεία.

Το ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) είναι ένας τύπος ασύρματου δικτύου που επιτρέπει στις συσκευές να συνδέονται μεταξύ τους και στο διαδίκτυο χωρίς τη χρήση φυσικών καλωδίων. Τα WLAN χρησιμοποιούνται συνήθως σε σπίτια, επιχειρήσεις, σχολεία και άλλα περιβάλλοντα όπου οι άνθρωποι πρέπει να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο ή να μοιράζονται δεδομένα ασύρματα.

3.3.3 Wireless Metropolitan Area Network (WMAN)

Το ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο (WMAN) είναι ένας τύπος μητροπολιτικού δικτύου (MAN) και το μόνο πράγμα είναι ότι η συνδεσιμότητα είναι ασύρματη. Εκτείνεται σε πολλαπλές τοποθεσίες εντός μιας γεωγραφικής περιοχής και εξυπηρετεί την εμβέλεια μεγαλύτερη από 100 μέτρα έως 50 χλμ. Είναι ένας τύπος ασύρματης δικτύωσης που έχει μια περιοχή κάλυψης περίπου στο μέγεθος μιας πόλης. Οι συνδέσεις WMAN μπορούν να είναι δίκτυα Point to Point ή Point to Multipoint [37]. Ένα παράδειγμα ενός δικτύου WMAN απεικονίζεται στην Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6 Δίκτυο WMAN [36]

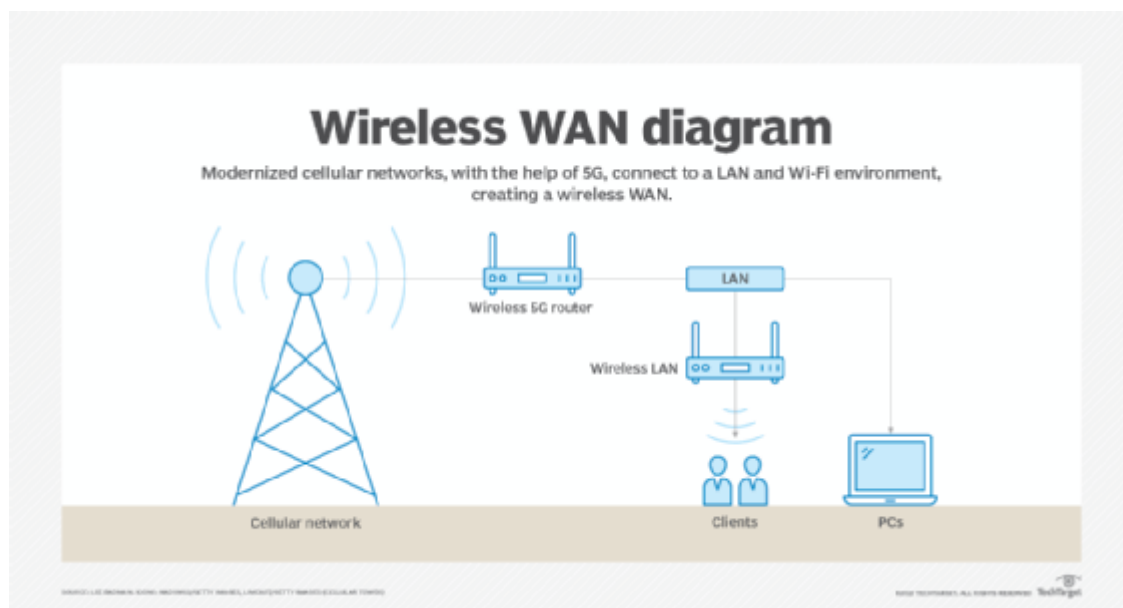
Μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες WMAN είναι το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), το οποίο λειτουργεί με το πρότυπο IEEE 802.16. Το WiMAX έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση υψηλής ταχύτητας σε μια μεγάλη περιοχή, συνήθως αρκετά χιλιόμετρα. Το WMAN μπορεί να αναπτυχθεί τόσο σε αδειοδοτημένες όσο και σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων. Οι αδειοδοτημένες ζώνες απαιτούν την άδεια ενός ρυθμιστικού φορέα για τη χρήση τους, ενώ οι μη αδειοδοτημένες ζώνες είναι διαθέσιμες για χρήση χωρίς ειδική εξουσιοδότηση. Η αρχιτεκτονική του WMAN αποτελείται συνήθως από έναν σταθμό βάσης, ο οποίος λειτουργεί ως κεντρικό σημείο του δικτύου και επικοινωνεί με πολλαπλούς συνδρομητικούς σταθμούς. Ο σταθμός βάσης συνδέεται σε ενσύρματο δίκτυο, το οποίο παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο και σε άλλα δίκτυα. Άλλες τεχνολογίες που αξιοποιούν το δίκτυο WMAN είναι η τοπική πολυσημειακή καταναεμημένη υπηρεσία (Local Multipoint Distributed Service - LMDS) και η πολυκαναλική πολυσημειακή καταναεμημένη υπηρεσία (Multi-Channel Multipoint Distributed Service - MMDS). Η πρώτη πρόκειται για μια ευρυζωνική τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης μικροκυμάτων και χρησιμοποιεί χαμηλή ισχύ και υψηλή συχνότητα, δηλαδή 25 έως 31 GHz σε μικρή απόσταση. Η δεύτερη τεχνολογία, η MMDS, πρόκειται για μια ασύρματη τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία που λειτουργεί στο τμήμα υπερυψηλών συχνοτήτων (UHF) του ραδιοφάσματος και χρησιμοποιείται για τεχνολογία τηλεπικοινωνιών και ευρυζωνική δικτύωση γενικής χρήσης [37].

Το WMAN προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της μετάδοσης δεδομένων υψηλής ταχύτητας, της κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών και της υποστήριξης τόσο για σταθερές όσο και για κινητές συσκευές. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες

εφαρμογές, όπως η παροχή ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο σε απομακρυσμένες περιοχές, η σύνδεση επιχειρήσεων στο διαδίκτυο και η παροχή ασύρματης συνδεσιμότητας υψηλής ταχύτητας για κινητές συσκευές. Ωστόσο, το WMAN έχει επίσης ορισμένους περιορισμούς, όπως σχετικά υψηλό κόστος ανάπτυξης, ευαισθησία σε παρεμβολές από άλλα ασύρματα δίκτυα και περιορισμένη υποστήριξη για εφαρμογές φωνής και βίντεο σε πραγματικό χρόνο.

3.3.4 Wireless Wide Area Network (WWAN)

Το WWAN (Wireless Wide Area Network) είναι ένας τύπος ασύρματου δικτύου που καλύπτει μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή, που συνήθως εκτείνεται σε πολλές πόλεις ή ακόμη και χώρες. Έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ασύρματη συνδεσιμότητα για κινητές συσκευές όπως smartphone, tablet και φορητούς υπολογιστές, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας όπως GSM, CDMA, LTE και 5G. Το βασικό χαρακτηριστικό του WWAN είναι η ικανότητά του να παρέχει ασύρματη συνδεσιμότητα σε κινητές συσκευές σε περιοχές όπου τα ενσύρματα δίκτυα δεν είναι διαθέσιμα ή δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη. Χρησιμοποιεί πύργους κινητής τηλεφωνίας για τη μετάδοση και λήψη δεδομένων, γεγονός που επιτρέπει στους χρήστες να παραμένουν συνδεδεμένοι στο Διαδίκτυο και να πραγματοποιούν τηλεφωνικές κλήσεις ενώ βρίσκονται εν κινήσει [38]. Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζεται ένα δίκτυο τύπου WWAN.



Εικόνα 3.7 Δίκτυο WWAN [39]

Η αρχιτεκτονική WWAN αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία: την κινητή συσκευή και το κυψελοειδές δίκτυο. Η κινητή συσκευή είναι εξοπλισμένη με ένα modem WWAN που συνδέεται στο κυψελοειδές δίκτυο, επιτρέποντας στη συσκευή να μεταδίδει και να λαμβάνει δεδομένα ασύρματα. Το κυψελοειδές δίκτυο, με τη σειρά του, αποτελείται από μια σειρά διασυνδεδεμένων σταθμών βάσης που επικοινωνούν με τις κινητές συσκευές και παρέχουν ασύρματη σύνδεση στο Διαδίκτυο.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του WWAN είναι η ευρεία περιοχή κάλυψής του, η οποία επιτρέπει στους χρήστες να παραμένουν συνδεδεμένοι ενώ βρίσκονται σε κίνηση, ανεξάρτητα από την τοποθεσία τους. Αυτό το καθιστά ιδανικό για χρήστες που πρέπει να παραμείνουν συνδεδεμένοι ενώ ταξιδεύουν ή εργάζονται εξ αποστάσεως. Το WWAN παρέχει επίσης ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων υψηλής ταχύτητας, οι οποίες επιτρέπουν στους χρήστες να έχουν γρήγορη πρόσβαση και λήψη μεγάλων αρχείων. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα στο WWAN, συμπεριλαμβανομένου του κόστους των προγραμμάτων δεδομένων, το οποίο μπορεί να είναι ακριβό για χρήστες που αξιοποιούν και μεταφέρουν μεγάλο όγκο δεδομένων. Επιπλέον, η ισχύς και η ποιότητα του σήματος μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία και τη συμφόρηση δικτύου, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την εμπειρία του χρήστη. Τέλος, το WWAN υπόκειται σε ρυθμιστικούς περιορισμούς, οι οποίοι μπορούν να περιορίσουν τη διαθεσιμότητά του σε ορισμένες χώρες ή περιοχές.

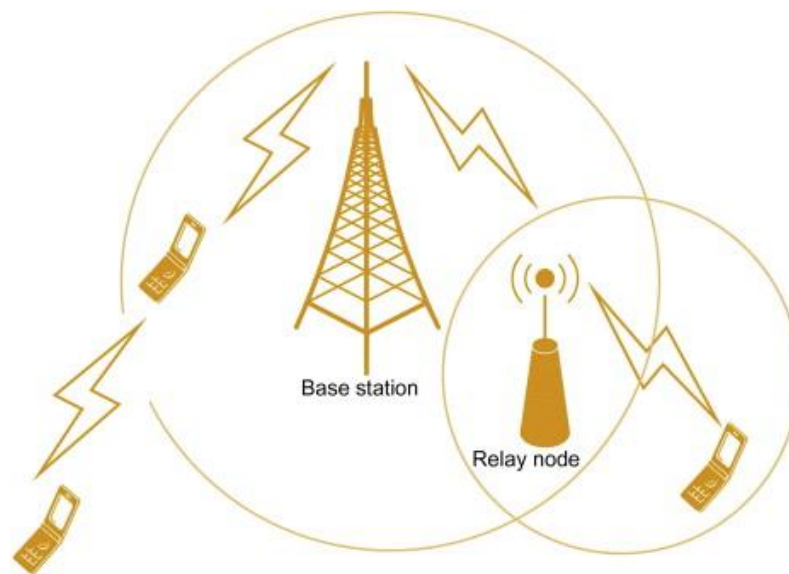
3.4 Κυψελωτά Δίκτυα

Τα Κυψελωτά δίκτυα είναι ασύρματα δίκτυα στα οποία ένας μεγάλος αριθμός κινητών συσκευών επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω μιας σειράς διασυνδεδεμένων σταθμών βάσης, γνωστών ως τοποθεσίες κυψέλης ή πύργοι. Ο όρος "κυτταρικό" προέρχεται από το γεγονός ότι το δίκτυο χωρίζεται σε κυψέλες, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετείται από έναν σταθμό βάσης. Κάθε κυψέλη καλύπτει μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και καθώς οι κινητές συσκευές μετακινούνται από τη μια κυψέλη στην άλλη, το δίκτυο μεταφέρει την κλήση ή τη σύνδεση δεδομένων σε μια νέα κυψέλη, διασφαλίζοντας τη συνέχεια της υπηρεσίας [40]. Υπάρχουν μέχρι σήμερα 5 γενιές κυψελωτών δικτύων (1G, 2G, 3G, 4G, 5G) με κάποιες να είναι παρωχημένες. Ένα παράδειγμα κυψελωτού δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.8.

Η αρχιτεκτονική ενός κυψελοειδούς δικτύου συνήθως αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- **Κινητές συσκευές:** Αυτές είναι οι συσκευές που χρησιμοποιούνται από τους τελικούς χρήστες, όπως smartphone, tablet ή φορητοί υπολογιστές, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο μέσω μιας διεπαφής κυψελοειδούς ραδιοφώνου.
- **Σταθμός βάσης (θέση κυψέλης):** Ο σταθμός βάσης είναι ένας σταθερός κόμβος επικοινωνίας που παρέχει ασύρματη κάλυψη σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, γνωστή ως κυψέλη.
- **Κέντρο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (MSC):** Το MSC είναι υπεύθυνο για την εναλλαγή κλήσεων και δεδομένων μεταξύ κυψελών και άλλων δικτύων.
- **Εγγραφή τοποθεσίας οικίας (HLR):** Το HLR αποθηκεύει πληροφορίες για κάθε συνδρομητή.

- **Εγγραφή τοποθεσίας επισκεπτών (VLR):** Το VLR περιέχει πληροφορίες σχετικά με τους συνδρομητές που βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο κελί ανά συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
- **Κέντρο ελέγχου ταυτότητας (AUC):** Το AUC είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο ταυτότητας των συνδρομητών και τη διασφάλιση της ασφαλούς επικοινωνίας.
- **Μητρώο ταυτότητας εξοπλισμού (EIR):** Το EIR περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις κινητές συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο.



Εικόνα 3.8 Κυψελωτό Δίκτυο [41]

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα των κυψελωτών δικτύων παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Ευρεία κάλυψη:** Τα κυψελοειδή δίκτυα παρέχουν εκτεταμένη κάλυψη, επιτρέποντας στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες σε μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Αυτή η ευρεία κάλυψη επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη πολλαπλών πύργων κυψέλης που δημιουργούν ένα δίκτυο επικαλυπτόμενων κυψελών. Οι χρήστες μπορούν να παραμένουν συνδεδεμένοι σε υπηρεσίες φωνής και δεδομένων ακόμη και όταν ταξιδεύουν, εξασφαλίζοντας συνεχή συνδεσιμότητα σε διαφορετικές τοποθεσίες.
- **Επεκτασιμότητα:** Τα κυψελοειδή δίκτυα είναι εξαιρετικά επεκτάσιμα, ικανά να εξυπηρετούν ταυτόχρονα μεγάλο αριθμό χρηστών. Καθώς αυξάνεται η ζήτηση για συνδεσιμότητα, τα κυψελοειδή δίκτυα μπορούν να διαχειριστούν την αυξανόμενη βάση χρηστών προσθέτοντας περισσότερες κυψέλες και αυξάνοντας τη χωρητικότητα του δικτύου.

- **Αξιοπιστία:** Τα κυψελοειδή δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν αξιόπιστες υπηρεσίες επικοινωνίας. Χρησιμοποιούν πλεονάζουσες υποδομές και εφεδρικά συστήματα για να εξασφαλίζουν αδιάλειπτη συνδεσιμότητα, ακόμη και σε περίπτωση βλαβών του δικτύου ή φυσικών καταστροφών.
- **Ευελξία:** Τα κυψελοειδή δίκτυα υποστηρίζουν διάφορες υπηρεσίες επικοινωνίας πέραν των φωνητικών κλήσεων, συμπεριλαμβανομένων των μηνυμάτων κειμένου (SMS), των μηνυμάτων πολυμέσων (MMS) και της πρόσβασης στο κινητό διαδίκτυο. Οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και υπηρεσιών μέσω των κινητών συσκευών τους.
- **Περιοχή:** Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας επιτρέπουν στους χρήστες να περιηγηθούν και να έχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες εκτός της περιοχής του οικείου δικτύου τους. Οι συμφωνίες περιοχής μεταξύ διαφορετικών φορέων εκμετάλλευσης δικτύων επιτρέπουν στους χρήστες να διατηρούν τη συνδεσιμότητα ενώ ταξιδεύουν σε διαφορετικές περιοχές ή χώρες.
- **Ασφάλεια:** Για να διατηρηθεί η ασφάλεια και το απόρρητο των επικοινωνιών των χρηστών, τα κυψελοειδή δίκτυα χρησιμοποιούν διαδικασίες κρυπτογράφησης και ελέγχου ταυτότητας. Αυτό συμβάλλει στην προστασία των ευαίσθητων πληροφοριών που μεταδίδονται μέσω του δικτύου από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση.

3.4.1 Δίκτυο 2G

Το 2G, συντομογραφία για δεύτερη γενιά, αναφέρεται στο δεύτερο στάδιο ανάπτυξης των κυψελοειδών δικτύων. Η εισαγωγή της ψηφιακής τεχνολογίας βελτίωσε την ποιότητα των φωνητικών κλήσεων και επέτρεψε τη μετάδοση γραπτών μηνυμάτων, κάτι που δεν ήταν δυνατό με την αναλογική τεχνολογία. Χρησιμοποιούσαν δύο κύριες τεχνολογίες: Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM) και Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα (CDMA) [42].

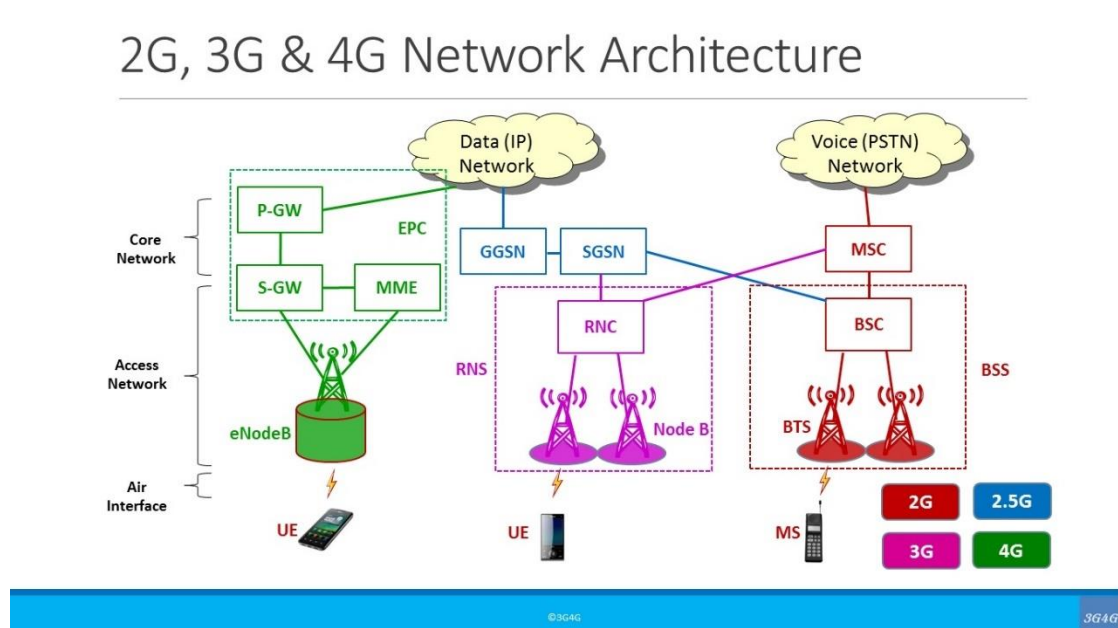
Η αρχιτεκτονική των δικτύων 2G βασίζεται σε ένα δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος, όπου δημιουργείται ένα αποκλειστικό κύκλωμα μεταξύ δύο μερών κατά τη διάρκεια μιας κλήσης και παραμένει ανοιχτό μέχρι να τελειώσει η κλήση. Αυτό σημαίνει ότι οι πόροι δικτύου δεσμεύονται για τη διάρκεια της κλήσης, η οποία είναι αναποτελεσματική σε σύγκριση με νεότερες τεχνολογίες όπως το 4G και το 5G, που χρησιμοποιούν δίκτυα μεταγωγής πακέτων που μπορούν να μοιράζονται πόρους δικτύου πιο αποτελεσματικά. Τα δίκτυα 2G είχαν ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως και 64 kbps, που επαρκούσε για βασική περιήγηση στο διαδίκτυο και email.

Για την βελτίωση των δυνατοτήτων μεταφοράς δεδομένων των δικτύων 2Gμ αναπτύχθηκαν τα δίκτυα 2.5G, τα οποία ήταν ένα ενδιάμεσο βήμα μεταξύ των δικτύων 2G και 3G. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δικτύων 2G και 2.5G είναι ότι τα δίκτυα 2.5G χρησιμοποιούν τεχνολογία μεταγωγής πακέτων εκτός από την τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος, ενώ τα δίκτυα 2G χρησιμοποιούν μόνο τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος. Η μεταγωγή πακέτων επιτρέπει την αποστολή δεδομένων σε μικρά πακέτα μέσω του δικτύου, γεγονός που κάνει πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και μπορεί να αυξήσει τις ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Αυτό ήταν ιδιαίτερα σημαντικό για την αυξανόμενη χρήση υπηρεσιών δεδομένων κινητής

τηλεφωνίας, όπως η περιήγηση στο Διαδίκτυο μέσω κινητού τηλεφώνου και το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο. Η αρχιτεκτονική των 2G και 2.5G, αλλά και των 3G και 4G δικτύων παρατίθεται στην Εικόνα 3.9.

Σε ένα δίκτυο 2G, το BTS (Base Transceiver Station), το BSC (Base Station Controller), το BSS (Base Station Subsystem) και το MSC (Mobile Switching Center) συνεργάζονται για να επιτευχθεί η επικοινωνία των χρηστών. Το BTS διευκολύνει τη μετάδοση ασύρματου σήματος, ενώ το BSC διαχειρίζεται κεντρικά πολλαπλά BTS, χειριζόμενο τη δρομολόγηση κλήσεων και την κατανομή πόρων. Ο συνδυασμός BTS και BSC αποτελούν το BSS, υπεύθυνο για τη διαχείριση των πόρων του δικτύου και τη διαχείριση της μεταβίβασης. Τέλος, το MSC χρησιμεύει ως κεντρική μονάδα μεταγωγής, συνδέοντας κλήσεις μεταξύ κινητών συνδρομητών και εξωτερικών δικτύων. Μαζί, αυτά τα στοιχεία συνεργάζονται για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου και την παροχή αξιόπιστων κινητών υπηρεσιών.

Η ανάπτυξη του 2.5G δικτύου πρόσθεσε δύο κύριες τεχνολογίες για την επέκταση των δικτύων 2G, τα GGSN (Gateway GPRS Support Node) και SGSN (Serving GPRS Support Node). Σε ένα δίκτυο 2.5G, ο SGSN και ο GGSN συνεργάζονται για να ενεργοποιήσουν υπηρεσίες δεδομένων μεταγωγής πακέτων. Το SGSN διαχειρίζεται την κινητικότητα των κινητών συσκευών και τις διαδικασίες παράδοσης, συνεργαζόμενο με το BSC για απρόσκοπτη συνδεσιμότητα. Εν τω μεταξύ, το GGSN χρησιμεύει ως πύλη προς εξωτερικά δίκτυα, συνεργαζόμενο με το SGSN για τη διευκόλυνση της μετάδοσης δεδομένων. Μαζί, εξασφαλίζουν την ομαλή συνδεσιμότητα δεδομένων και την πρόσβαση σε εξωτερικά δίκτυα στο δίκτυο 2.5G.



Εικόνα 3.9 Αρχιτεκτονική 2G, 2.5G, 3G και 4G δικτύων [43]

3.4.2 Δίκτυο 3G

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) εισήχθησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και ήταν ένα σημαντικό άλμα από τα δίκτυα 2G. Τα δίκτυα 3G επέτρεψαν ταχύτερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, επιτρέποντας την πιο αποτελεσματική χρήση των κινητών συσκευών. Ήταν τα πρώτα

δίκτυα που πρόσφεραν ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο, η οποία ήταν μια τεράστια ανακάλυψη για την τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα δίκτυα 3G βασίζεται στα πρότυπα CDMA (Code Division Multiple Access) και WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Αυτές οι τεχνολογίες διαιρούν το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε μικρούς, μοναδικούς κωδικούς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από πολλές συσκευές ταυτόχρονα [44].

Στην Εικόνα 3.9 απεικονίζονται οι τεχνολογίες και τα στοιχεία του δικτύου που προστέθηκαν και επέκτειναν τις δυνατότητες του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, προστέθηκαν τα RNC (Radio Network Controller) και RNS (Radio Network Subsystem). Στα δίκτυα 3G, το RNC και το RNS συνεργάζονται με το SGSN και το MSC για αποτελεσματική κυψελοειδή επικοινωνία. Το RNC, μαζί με το RNS, διαχειρίζεται τους πόρους του δικτύου, τις μεταβιβάσεις και τη δρομολόγηση κλήσεων. Το SGSN εξασφαλίζει τη διαχείριση της κινητικότητας και συντονίζει τις μεταβιβάσεις με το RNC κατά τη διάρκεια των συνόδων δεδομένων. Ταυτόχρονα, το MSC χειρίζεται τη δρομολόγηση κλήσεων και συνδέει υπηρεσίες φωνής με εξωτερικά δίκτυα. Μαζί, αυτά τα στοιχεία εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη επικοινωνία και την αποδοτική απόδοση του δικτύου στα δίκτυα 3G.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων 3G για την εποχή που εμφανίστηκα περιλαμβάνουν:

- **Υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων:** Τα δίκτυα 3G έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν δεδομένα με ταχύτητες έως και 2 Mbps, γεγονός που τα καθιστά πολύ πιο γρήγορα από τα δίκτυα 2G.
- **Βελτιωμένες δυνατότητες πολυμέσων:** Τα δίκτυα 3G επιτρέπουν πιο εξελιγμένες λειτουργίες πολυμέσων, όπως βιντεοκλήσεις, κινητή τηλεόραση και τηλεδιάσκεψη.
- **Ευρύτερη κάλυψη δικτύου:** Τα δίκτυα 3G έχουν ευρύτερη περιοχή κάλυψης από τα δίκτυα 2G, επιτρέποντας στους χρήστες να παραμένουν συνδεδεμένοι ακόμη και όταν βρίσκονται εκτός της εμβέλειας ενός δικτύου Wi-Fi.
- **Βελτιωμένη ασφάλεια:** Τα δίκτυα 3G παρέχουν καλύτερη ασφάλεια από τα δίκτυα 2G, με λειτουργίες όπως κρυπτογράφηση και έλεγχος ταυτότητας χρήστη.

3.4.3 Δίκτυο 4G

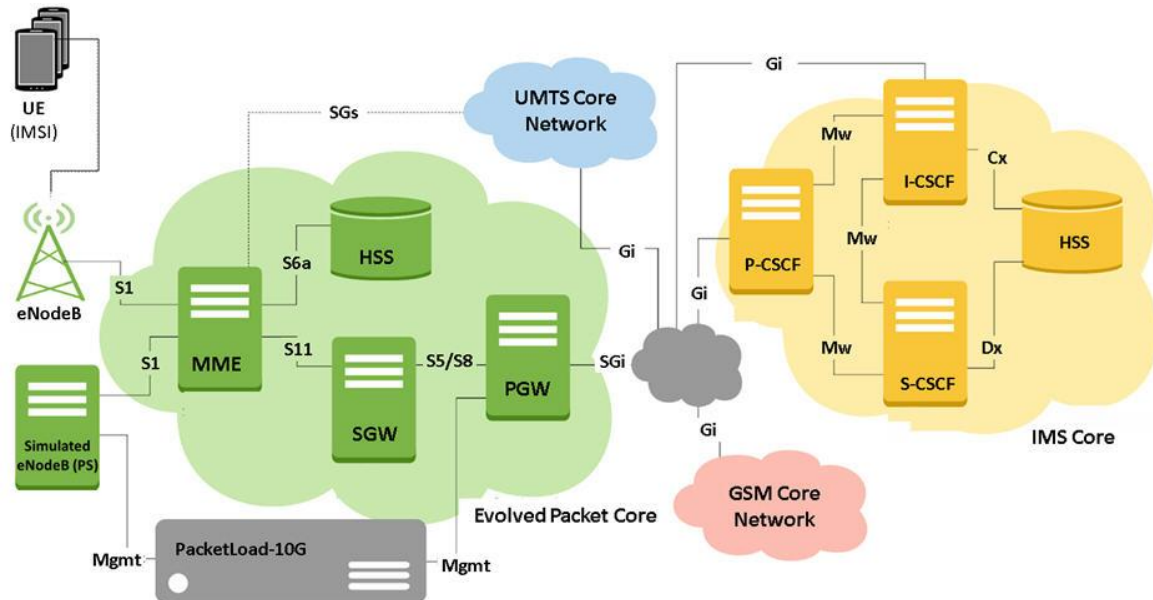
Τα δίκτυα 4G, γνωστά και ως δίκτυα τέταρτης γενιάς, είναι το σημερινό πρότυπο για τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Τα δίκτυα αυτά έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν σημαντικά ταχύτερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και χαμηλότερη καθυστέρηση από τους προκατόχους τους. Τα δίκτυα 4G βασίζονται στην τεχνολογία Long-Term Evolution (LTE). Η τεχνολογία LTE χρησιμοποιεί μια διαφορετική μέθοδο μεταφοράς δεδομένων, γνωστή ως Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), η οποία επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται το ίδιο κανάλι και επιτρέπει ταχύτερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων [45].

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των δικτύων 4G είναι η ικανότητά τους να παρέχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας σε κινητές συσκευές, καθιστώντας δυνατή τη ροή βίντεο, τη λήψη μεγάλων αρχείων και την πρόσβαση σε υπηρεσίες που βασίζονται στο σύννεφο από σχεδόν οπουδήποτε. Τα δίκτυα 4G προσφέρουν επίσης χαμηλότερη καθυστέρηση, πράγμα που σημαίνει ότι τα δεδομένα μπορούν να μεταδίδονται ταχύτερα μεταξύ των συσκευών, με αποτέλεσμα ταχύτερους χρόνους απόκρισης για εφαρμογές και υπηρεσίες.

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική, τα δίκτυα 4G αποτελούνται συνήθως από ένα δίκτυο πυρήνα και ένα δίκτυο ραδιοπρόσβασης. Το δίκτυο πυρήνα παρέχει την υποκείμενη υποδομή που επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των συσκευών, ενώ το δίκτυο ραδιοπρόσβασης παρέχει τη σύνδεση μεταξύ της συσκευής του χρήστη και του δικτύου πυρήνα. Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης αποτελείται από πολλαπλούς σταθμούς βάσης, οι οποίοι επικοινωνούν με τις κινητές συσκευές χρησιμοποιώντας ραδιοσήματα. Η αρχιτεκτονική 4G βασίζεται στο πρωτόκολλο IP (Internet Protocol) και έχει σχεδιαστεί για γρήγορη πρόσβαση σε δεδομένα, χαμηλή καθυστέρηση και βελτιωμένη αποδοτικότητα του φάσματος. Τα δομικά στοιχεία ενός 4G δικτύου παρατίθενται παρακάτω και απεικονίζονται στην Εικόνα 3.10:

- **Εξοπλισμός χρήστη (UE):** Το UE αναφέρεται στη συσκευή που χρησιμοποιεί ο χρήστης για να συνδεθεί στο δίκτυο 4G. Αυτό περιλαμβάνει smartphones, tablets, φορητούς υπολογιστές και άλλες συσκευές που υποστηρίζουν συνδεσιμότητα 4G.
- **Εξελιγμένος κόμβος (eNodeB):** Ο eNodeB είναι ο σταθμός βάσης στην αρχιτεκτονική 4G που συνδέει τον εξοπλισμό χρήστη με το δίκτυο πυρήνα. Παρέχει ραδιοπρόσβαση στον UE και διαχειρίζεται τους ραδιοπόρους για τη μετάδοση δεδομένων.
- **Πύλη εξυπηρέτησης (SGW):** Ο SGW είναι η πύλη που συνδέει τον eNodeB με το δίκτυο πυρήνα. Είναι υπεύθυνη για την προώθηση πακέτων μεταξύ του UE και του κεντρικού δικτύου και για τη διαχείριση της κινητικότητας.
- **Πύλη δικτύου δεδομένων πακέτων (PGW):** Η PGW είναι η πύλη που συνδέει το δίκτυο 4G με εξωτερικά δίκτυα IP. Είναι υπεύθυνη για την κατανομή διευθύνσεων IP, την ασφάλεια και το φιλτράρισμα πακέτων.
- **Οντότητα διαχείρισης κινητικότητας (MME):** Η MME είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση της κινητικότητας του UE, συμπεριλαμβανομένου του εντοπισμού της θέσης του UE, της εκκίνησης διαδικασιών τηλεειδοποίησης και της διαχείρισης της παράδοσης μεταξύ eNodeBs.
- **Εξυπηρετητής οικιακού συνδρομητή (HSS):** Ο HSS αποθηκεύει πληροφορίες συνδρομητή και πληροφορίες συνδρομής υπηρεσίας.

- **Λειτουργία κανόνων πολιτικής και χρέωσης (PCRF):** Η PCRF είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο πολιτικής και τους κανόνες χρέωσης για τη μετάδοση δεδομένων. Καθορίζει την ποιότητα υπηρεσίας για κάθε συνδρομητή και εφαρμόζει πολιτικές χρέωσης ανάλογα.



Εικόνα 3.10 Δίκτυο 4G [46]

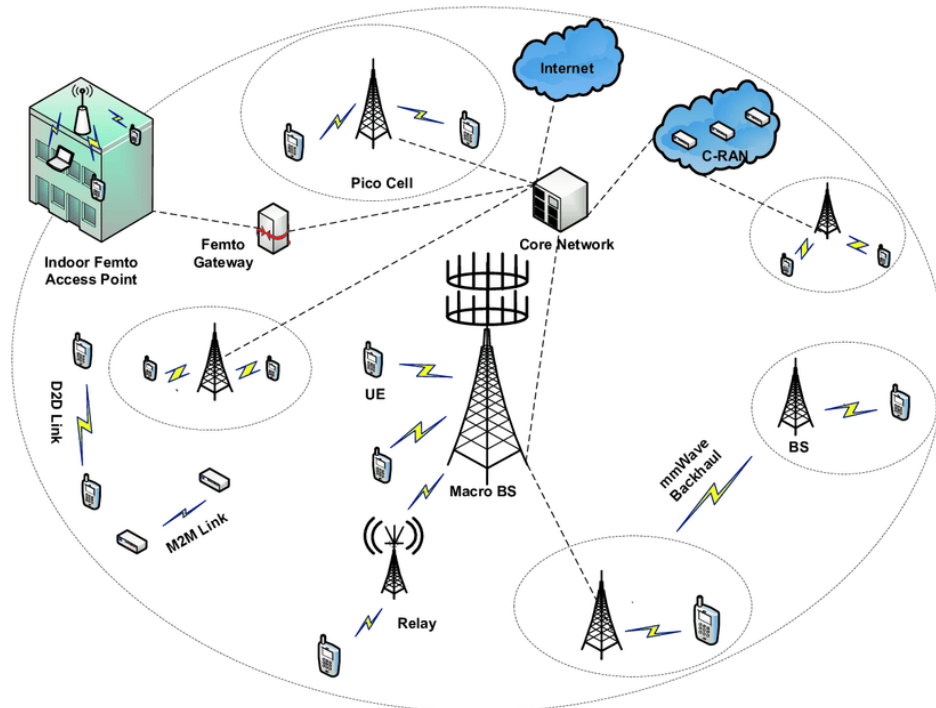
3.4.4 Δίκτυο 5G

Το 5G είναι η πέμπτη γενιά τεχνολογίας ασύρματων δικτύων που προορίζεται να παρέχει ταχύτερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, μειωμένη καθυστέρηση και μεγαλύτερη χωρητικότητα από τις προηγούμενες γενιές. Διαθέτει δυνατότητα για ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 20 Gbps και μέσους ρυθμούς δεδομένων που υπερβαίνουν τα 100 Mbps. Επιπλέον, τα δίκτυα 5G παρέχουν πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα από τα δίκτυα 4G, με 100πλάσια βελτίωση της χωρητικότητας και της αποδοτικότητας του δικτύου [47]. Στην Εικόνα 3.11 παρουσιάζεται ένα δίκτυο 5G.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του 5G είναι η ικανότητά του να λειτουργεί σε ζώνες υψηλών συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave), τα οποία προσφέρουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης από τις ζώνες χαμηλότερων συχνοτήτων που χρησιμοποιούσαν το 4G και τα προηγούμενα ασύρματα δίκτυα. Αυτό επιτρέπει στα δίκτυα 5G να μεταδίδουν γρήγορα μεγάλες ποσότητες δεδομένων και να υποστηρίζουν περισσότερες συσκευές ταυτόχρονα. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του 5G είναι η υποστήριξή του για τον διαμερισμό του δικτύου (Network Slicing), το οποίο επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να διαμερίσουν τα δίκτυά τους σε πολλαπλά εικονικά δίκτυα με διαφορετικά χαρακτηριστικά για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις διαφορετικών εφαρμογών και περιπτώσεων χρήσης.

Η αρχιτεκτονική των δικτύων 5G βασίζεται σε έναν συνδυασμό του δικτύου πυρήνα και του δικτύου ραδιοπρόσβασης (RAN). Το δίκτυο πυρήνα παρέχει υπηρεσίες όπως η πιστοποίηση ταυτότητας, η τιμολόγηση και η διαχείριση κινητικότητας, ενώ το RAN παρέχει τη διεπαφή μεταξύ

των κινητών συσκευών και του δικτύου. Το 5G RAN αποτελείται από πολλούς τύπους κόμβων, συμπεριλαμβανομένων των σταθμών βάσης, των μικρών κυψελών και των κατακεντρωμένων συστημάτων κεραιών (DAS). Αυτοί οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με ένα δίκτυο Back Haul που παρέχει συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας μεταξύ του RAN και του κεντρικού δικτύου.



Εικόνα 3.11 Δίκτυο 5G [48]

Το δίκτυο πυρήνα του 5G αποτελείται από πολλαπλά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένης της λειτουργίας διαχείρισης πρόσβασης και κινητικότητας (AMF), της λειτουργίας διαχείρισης συνόδου (SMF), της λειτουργίας επιπέδου χρήστη (UPF) και της λειτουργίας αποθετηρίου δικτύου (NRF). Αυτά τα στοιχεία συνεργάζονται για την παροχή υπηρεσιών όπως η τμηματοποίηση του δικτύου, η διαχείριση της ποιότητας υπηρεσίας (Quality-of-Service - QoS) και η ασφάλεια.

Κάποια άλλα πλεονεκτήματα πέρα από τις υψηλές ταχύτητες είναι τα κάτωθι.

- **Χαμηλή καθυστέρηση:** Το 5G έχει καθυστέρηση μικρότερη από 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου, που είναι σχεδόν 10 φορές ταχύτερη από το 4G LTE. Αυτό επιτρέπει την επικοινωνία σχεδόν σε πραγματικό χρόνο μεταξύ συσκευών και δικτύων.
- **Αυξημένη χωρητικότητα δικτύου:** Το 5G έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών και εφαρμογών, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές IoT.
- **Τεμαχισμός δικτύου:** Τα δίκτυα 5G μπορούν να χωριστούν σε πολλαπλά εικονικά δίκτυα, το καθένα με τα δικά του μοναδικά χαρακτηριστικά και ποιότητα υπηρεσιών (QoS).

- **Ενισχυμένη ασφάλεια:** Το 5G ενσωματώνει προηγμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο και ασφαλή έλεγχο ταυτότητας χρήστη.

3.4.5 Δίκτυο 6G - Ασύρματη επικοινωνία επόμενης γενιάς

Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, η ανάπτυξη των δικτύων 6G είναι έτοιμη να επαναπροσδιορίσει την ασύρματη επικοινωνία και να ξεκλειδώσει νέες δυνατότητες σε όλους τους κλάδους. Βασιζόμενο στα θεμέλια που δημιούργησαν τα δίκτυα 5G, το 6G στοχεύει να φέρει επανάσταση στην ασύρματη συνδεσιμότητα, εισάγοντας νέα χαρακτηριστικά και δυνατότητες που θα επιτρέψουν πρωτοφανή επίπεδα επιδόσεων, συνδεσιμότητας και εμπειρίας χρήστη. Αν και τα δίκτυα 6G βρίσκονται ακόμη σε φάση έρευνας και ανάπτυξης, αναμένεται να διαδραματίσουν ζωτικό ρόλο στην υποστήριξη μελλοντικών εφαρμογών και υπηρεσιών που απαιτούν ακόμη υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, μαζική συνδεσιμότητα και αυξημένη αξιοπιστία.

Βασικές πτυχές και χαρακτηριστικά των δικτύων 6G παρατίθενται παρακάτω:

- **Εξαιρετικά υψηλοί ρυθμοί δεδομένων:** Τα δίκτυα 6G στοχεύουν στην παροχή σημαντικά υψηλότερων ρυθμών δεδομένων σε σύγκριση με τους προκατόχους τους. Αναμένονται ταχύτητες της τάξης των Tbps, επιτρέποντας την εξαιρετικά γρήγορη μεταφορά δεδομένων για εφαρμογές όπως η ροή βίντεο υψηλής ανάλυσης, η εικονική και επανυξημένη πραγματικότητα και οι καθηλωτικές εμπειρίες σε πραγματικό χρόνο.
- **Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση:** Τα δίκτυα 6G θα μειώσουν περαιτέρω την καθυστέρηση, επιτρέποντας την επικοινωνία σχεδόν σε πραγματικό χρόνο και υπηρεσίες υψηλής απόκρισης. Αναμένεται ότι θα είναι εφικτή η καθυστέρηση σε επίπεδα κάτω του χιλιοστού του δευτερολέπτου, κάτι που θα είναι ζωτικής σημασίας για αναδυόμενες εφαρμογές όπως τα αυτόνομα οχήματα, οι απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις και ο βιομηχανικός αυτοματισμός.
- **Μαζική συνδεσιμότητα:** Τα δίκτυα 6G έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν ταυτόχρονα τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών. Εκτιμάται ότι τα δίκτυα 6G θα παρέχουν συνδεσιμότητα για έως και ένα εκατομμύριο συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, επιτρέποντας την άνθηση του IoT σε πρωτοφανή κλίμακα. Αυτό θα επιτρέψει την απρόσκοπτη συνδεσιμότητα για έξυπνες πόλεις, έξυπνα σπίτια και διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.
- **Δίκτυα υπερπυκνότητας (Hyper-Density Networks):** Τα δίκτυα 6G θα επικεντρωθούν στην ανάπτυξη υποδομών δικτύου υπερπυκνότητας για να αντιμετωπίσουν τις τεράστιες απαιτήσεις συνδεσιμότητας. Αξιοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες κεραιών, μικρές κυψέλες και συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων, τα δίκτυα 6G θα παρέχουν κάλυψη υψηλής χωρητικότητας ακόμη και σε πολυσύχναστα αστικά περιβάλλοντα.

- **Ενισχυμένη αξιοπιστία και ανθεκτικότητα:** Τα δίκτυα 6G θα δώσουν έμφαση στην ευρωστία και την ανθεκτικότητα, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη συνδεσιμότητα ακόμη και σε δύσκολα σενάρια. Τα δίκτυα θα χρησιμοποιούν προηγμένους μηχανισμούς διόρθωσης σφαλμάτων, τεχνικές πλεονασμού και έξυπνη διαχείριση δικτύου για την παροχή αξιόπιστης επικοινωνίας και την ελαχιστοποίηση των διακοπών των υπηρεσιών.
- **Ενεργειακή απόδοση:** Με αυξανόμενη έμφαση στη βιωσιμότητα, τα δίκτυα 6G θα προσπαθήσουν να επιτύχουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση. Οι προηγμένες τεχνικές διαχείρισης ισχύος, η ευφυής κατανομή πόρων και ο σχεδιασμός δικτύων με ενεργειακή επίγνωση θα είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας.
- **Νοημοσύνη δικτύου με βάση την τεχνητή νοημοσύνη:** Τα δίκτυα 6G θα αξιοποιήσουν τη δύναμη της τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων του δικτύου, την κατανομή των πόρων και την εμπειρία του χρήστη. Η τεχνητή νοημοσύνη θα αξιοποιηθεί για τη δυναμική προσαρμογή του δικτύου στις μεταβαλλόμενες συνθήκες, την πρόβλεψη και την πρόληψη της συμφόρησης του δικτύου και τη δυνατότητα ευφυούς βελτιστοποίησης του δικτύου.
- **Ολοκληρωμένη δορυφορική επικοινωνία:** Τα δίκτυα 6G αναμένεται να ενσωματώσουν απρόσκοπτα τα επίγεια δίκτυα με τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας. Η ενσωμάτωση αυτή θα επεκτείνει τη συνδεσιμότητα σε απομακρυσμένες περιοχές, στον αέρα, τη θάλασσα και το διάστημα, εξασφαλίζοντας πανταχού παρούσα παγκόσμια κάλυψη.

3.5 Εφαρμογές

Τα ασύρματα δίκτυα έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών και μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορους τομείς για να παρέχουν ευέλικτη και αποτελεσματική συνδεσιμότητα. Παρακάτω περιγράφονται λεπτομερώς οι τομείς [49] στους οποίους η υλοποίηση ασύρματων δικτύων βρίσκει εκτεταμένη χρήση:

- **Οικιακά περιβάλλοντα:** Τα ασύρματα δίκτυα αναπτύσσονται συνήθως σε οικιστικά περιβάλλοντα για την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο σε νοικοκυριά. Οι δρομολογητές Wi-Fi επιτρέπουν την ασύρματη συνδεσιμότητα, επιτρέποντας στους χρήστες να συνδέουν ταυτόχρονα πολλές συσκευές. Αυτή η εφαρμογή επιτρέπει την άνετη πρόσβαση στο διαδίκτυο, υποστηρίζοντας δραστηριότητες όπως η περιήγηση στο διαδίκτυο, η ροή πολυμέσων, ο έξυπνος οικιακός αυτοματισμός και τα διαδικτυακά παιχνίδια.

- **Δίκτυα επιχειρήσεων:** Τα ασύρματα δίκτυα αναπτύσσονται εκτενώς σε επιχειρηματικά και επιχειρησιακά περιβάλλοντα, προσφέροντας συνδεσιμότητα για τους υπαλλήλους, τους πελάτες και τους επισκέπτες. Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει την απρόσκοπτη συνδεσιμότητα σε χώρους γραφείων, αίθουσες συσκέψεων και κοινόχρηστους χώρους. Τα ασύρματα δίκτυα υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, κοινή χρήση αρχείων, τηλεδιασκέψεις και υπηρεσίες που βασίζονται στο νέφος. Παρέχοντας κινητικότητα, τα ασύρματα δίκτυα ενισχύουν την παραγωγικότητα και διευκολύνουν τη συνεργασία σε σύγχρονα εργασιακά περιβάλλοντα.
- **Δημόσια Wi-Fi Hotspots:** Τα ασύρματα δίκτυα αναπτύσσονται σε δημόσιους χώρους όπως αεροδρόμια, ξενοδοχεία, καφετέριες, βιβλιοθήκες και εμπορικά κέντρα για να προσφέρουν δημόσια πρόσβαση Wi-Fi. Αυτά τα hotspots παρέχουν ασύρματη συνδεσιμότητα σε άτομα που βρίσκονται εν κινήσει, επιτρέποντάς τους να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο για επικοινωνία, ανάκτηση πληροφοριών και ψυχαγωγία. Τα δημόσια δίκτυα Wi-Fi συχνά απαιτούν έλεγχο ταυτότητας για τον έλεγχο της πρόσβασης και τη διασφάλιση της ασφάλειας.
- **Εκπαιδευτικά ιδρύματα:** Επιτρέπουν τη συνδεσιμότητα για μαθητές, καθηγητές και διοικητικό προσωπικό σε αίθουσες διδασκαλίας, βιβλιοθήκες και πανεπιστημιούπολεις. Τα ασύρματα δίκτυα υποστηρίζουν πλατφόρμες ηλεκτρονικής μάθησης, διαδικτυακή έρευνα, συνεργατικά έργα και απρόσκοπτη πρόσβαση σε εκπαιδευτικούς πόρους. Η εφαρμογή αυτή βελτιώνει την εμπειρία μάθησης και επιτρέπει καινοτόμες μεθοδολογίες διδασκαλίας.
- **Εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης:** Τα ασύρματα δίκτυα εφαρμόζονται σε περιβάλλοντα υγειονομικής περίθαλψης, συμπεριλαμβανομένων νοσοκομείων, κλινικών και ιατρικών κέντρων. Επιτρέπουν την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, την ανταλλαγή δεδομένων και την πρόσβαση σε ηλεκτρονικούς ιατρικούς φακέλους, βελτιώνοντας την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα και τη φροντίδα των ασθενών. Τα ασύρματα δίκτυα διευκολύνουν τη χρήση ιατρικών συσκευών, όπως συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης, κινητά καροτσάκια και ασύρματοι ιατρικοί αισθητήρες, βελτιώνοντας την παροχή υγειονομικής περίθαλψης και εξασφαλίζοντας άμεση πρόσβαση σε κρίσιμες πληροφορίες.
- **Βιομηχανικές και κατασκευαστικές ρυθμίσεις:** Τα ασύρματα δίκτυα υποστηρίζουν εργασίες όπως η διαχείριση αποθεμάτων, η αυτοματοποίηση γραμμών παραγωγής, η παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων και η απομακρυσμένη παρακολούθηση εξοπλισμού. Η εφαρμογή αυτή ενισχύει την επιχειρησιακή αποδοτικότητα, μειώνει τον χρόνο διακοπής λειτουργίας και επιτρέπει την ενσωμάτωση έξυπνων τεχνολογιών.
- **Υπαίθριες εγκαταστάσεις:** Τα ασύρματα δίκτυα επιτρέπουν τη συνδεσιμότητα σε έξυπνες πόλεις, υποστηρίζοντας υπηρεσίες όπως η δημόσια ασφάλεια, η διαχείριση της

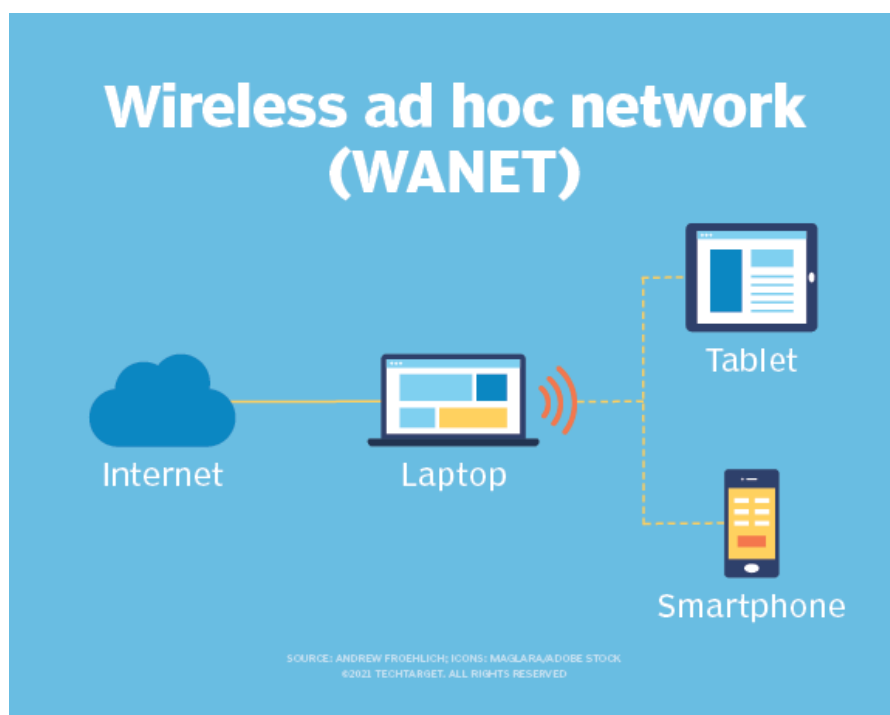
κυκλοφορίας, η περιβαλλοντική παρακολούθηση και η έξυπνη μέτρηση των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας. Επιπλέον, τα υπαίθρια ασύρματα δίκτυα διευκολύνουν την επικοινωνία σε απομακρυσμένες περιοχές, ζώνες καταστροφών και εργοτάξια, όπου η ενσύρματη υποδομή μπορεί να είναι ανέφικτη ή μη διαθέσιμη.

- **Μεταφορές και εφοδιαστική:** Επιτρέπουν την παρακολούθηση και την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο σε συστήματα διαχείρισης στόλου, επιτρέποντας τον αποτελεσματικό συντονισμό των οχημάτων, των αποστολών και των λειτουργιών εφοδιαστικής. Ασύρματα δίκτυα αναπτύσσονται επίσης σε συστήματα δημόσιων μεταφορών για την παροχή συνδεσιμότητας στους επιβάτες, όπως Wi-Fi σε λεωφορεία, τρένα και αεροπλάνα.

3.6 *Ad Hoc*

Το Ad hoc είναι ένας τύπος τεχνολογίας ασύρματης δικτύωσης που επιτρέπει στις συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας χωρίς να απαιτείται κεντρική υποδομή, όπως δρομολογητής ή σημείο πρόσβασης. Σε ένα δίκτυο ad hoc, κάθε συσκευή λειτουργεί τόσο ως πομπός όσο και ως δέκτης, σχηματίζοντας μια τοπολογία δικτύου εν κινήσει καθώς οι συσκευές έρχονται σε εμβέλεια η μία από την άλλη [50]. Παράδειγμα ενός δικτύου Ad hoc απεικονίζεται στην Εικόνα 3.12.

Τα δίκτυα ad hoc μπορούν να σχηματιστούν από μια ποικιλία συσκευών, συμπεριλαμβανομένων φορητών υπολογιστών, smartphones, tablet και άλλων κινητών συσκευών. Είναι ιδιαίτερα επωφελείς σε περιπτώσεις όπου η παραδοσιακή δικτυακή υποδομή δεν είναι διαθέσιμη, όπως σε σενάρια ανάκαμψης από καταστροφές ή σε απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν μπορούν να δημιουργηθούν μόνιμες υποδομές.



Εικόνα 3.12 Δίκτυο Ad hoc [51]

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των δικτύων ad hoc είναι η ευελιξία και η ανθεκτικότητά τους. Επειδή κάθε συσκευή στο δίκτυο μπορεί να λειτουργεί ως κόμβος, το δίκτυο μπορεί να προσαρμόζεται γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και να αναδιαμορφώνεται ανάλογα με τις ανάγκες. Αυτό καθιστά τα δίκτυα ad hoc ιδιαίτερα χρήσιμα σε δυναμικά περιβάλλοντα όπου τα παραδοσιακά δίκτυα μπορεί να μην είναι διαθέσιμα ή αναξιόπιστα. Ωστόσο, τα δίκτυα ad hoc παρουσιάζουν επίσης μια σειρά από προκλήσεις, όπως η ασφάλεια, η επεκτασιμότητα και η διαχείριση του δικτύου. Επειδή κάθε συσκευή στο δίκτυο πρέπει να επικοινωνεί απευθείας με κάθε άλλη συσκευή, μπορεί να είναι δύσκολο να διασφαλιστεί η ασφάλεια και το απόρρητο των μεταδόσεων δεδομένων. Επιπλέον, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συσκευών στο δίκτυο, γίνεται όλο και πιο δύσκολη η διαχείριση και η συντήρηση του δικτύου, ιδίως όσον αφορά τη δρομολόγηση και τη διαχείριση της κυκλοφορίας.

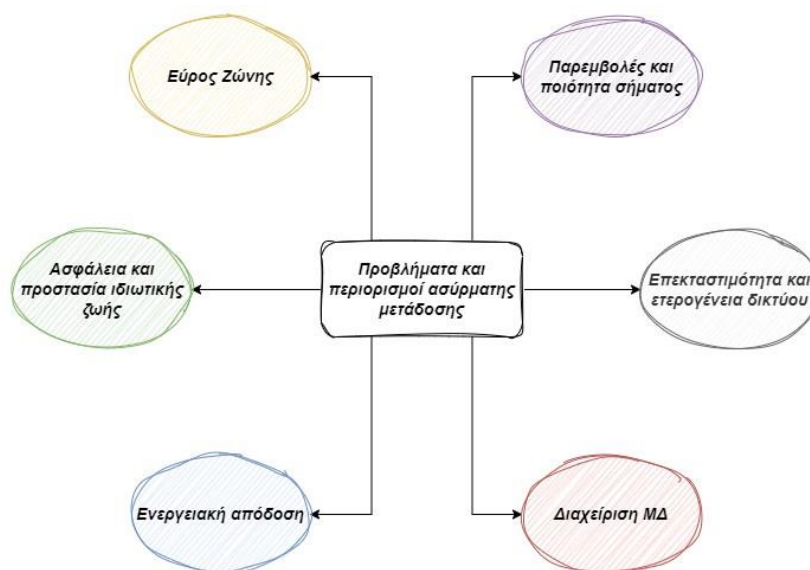
Το δίκτυο ad hoc είναι ένα αποκεντρωμένο ασύρματο δίκτυο που δεν βασίζεται σε σταθερή υποδομή. Με άλλα λόγια, οι συσκευές σε ένα δίκτυο ad hoc επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς να χρειάζονται κεντρικές συσκευές, όπως σημεία πρόσβασης ή δρομολογητές. Η τοπολογία του δικτύου είναι δυναμική και αυτόνομα οργανωμένη, με κάθε συσκευή να μπορεί να δρομολογεί δεδομένα μεταξύ άλλων συσκευών. Αυτός ο τύπος δικτύου ονομάζεται επίσης κινητό δίκτυο ad hoc (MANET) επειδή οι συσκευές στο δίκτυο μπορούν να μετακινούνται και να αλλάζουν τη θέση τους, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την τοπολογία του δικτύου.

4

Προβλήματα Ασύρματης Μετάδοσης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται διερεύνηση των μειονεκτημάτων και των προκλήσεων που αντιμετωπίζει η επίτευξη αποτελεσματικής μετάδοσης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια επισκόπηση των διαφόρων εμποδίων που εμποδίζουν τη βέλτιστη μετάδοση δεδομένων και υπογραμμίζει τη σημασία τους στο πεδίο των ασύρματων επικοινωνιών. Με την κατανόηση αυτών των προκλήσεων δύναται να αναπτυχθούν αποτελεσματικές στρατηγικές για τη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των ασύρματων δικτύων.

Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι ιδιαιτερότητες των ασύρματων δικτύων, εξετάζοντας τους βασικούς περιορισμούς και τις προκλήσεις που εμποδίζουν την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων. Τα θέματα που καλύπτονται περιλαμβάνουν περιορισμούς εύρους ζώνης, παρεμβολές σήματος, κινδύνους ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής, επεκτασιμότητα και ετερογένεια του δικτύου, περιορισμούς ενεργειακής απόδοσης, απαιτήσεις επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων, καθώς και εκτιμήσεις κόστους και πόρων [52]. Τα προβλήματα και οι περιορισμοί που εντοπίζονται κατά την ασύρματη μετάδοση παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.4.1 Περιορισμοί και προβλήματα ασύρματης μετάδοσης

4.1 Περιορισμοί εύρους ζώνης

Το περιορισμένο εύρος ζώνης είναι μια κρίσιμη πρόκληση στα ασύρματα δίκτυα που επηρεάζει σημαντικά την αποδοτικότητα της μετάδοσης δεδομένων. Το εύρος ζώνης αναφέρεται στον μέγιστο ρυθμό δεδομένων που μπορεί να μεταδοθεί μέσω ενός δικτύου σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Στα ασύρματα δίκτυα, το εύρος ζώνης περιορίζεται λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως το διαθέσιμο φάσμα, οι κανονιστικοί περιορισμοί και οι παρεμβολές από άλλες συσκευές ή δίκτυα.

4.1.1 Αιτίες περιορισμών εύρους ζώνης στα ασύρματα δίκτυα

Οι περιορισμοί εύρους ζώνης στα ασύρματα δίκτυα προκύπτουν από την περιορισμένη διαθεσιμότητα του ραδιοφάσματος. Το ραδιοφάσμα είναι ένας πεπερασμένος πόρος που διατίθεται για την ασύρματη επικοινωνία και χωρίζεται σε ζώνες συχνοτήτων. Κάθε ζώνη συχνοτήτων έχει συγκεκριμένο εύρος ζώνης και το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης μοιράζεται μεταξύ των διαφόρων ασύρματων υπηρεσιών και τεχνολογιών. Οι ρυθμιστικοί φορείς κατανέμουν συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων για διάφορες εφαρμογές και επιβάλλουν κανονισμούς για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών ασύρματων συσκευών και δικτύων. Αυτοί οι κανονιστικοί περιορισμοί περιορίζουν περαιτέρω το διαθέσιμο εύρος ζώνης στα ασύρματα δίκτυα.

Οι παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές, γειτονικά δίκτυα και περιβαλλοντικοί παράγοντες συμβάλλουν επίσης στους περιορισμούς του εύρους ζώνης. Οι παρεμβολές ενός διαύλου επικοινωνιών εμφανίζονται όταν πολλές συσκευές χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση του σήματος και τη μείωση της απόδοσης. Επίσης γειτονικά κανάλια δύναται να παρεμβάλλουν συσκευές σε γειτονικές ζώνες συχνοτήτων με την παραγωγή ανεπιθύμητων σημάτων που παρεμβαίνουν στα επιθυμητά σήματα. Μια άλλη μορφή παρεμβολής είναι η εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών που προκαλείται από ανακλάσεις και διαθλάσεις του σήματος στο ασύρματο περιβάλλον, οδηγώντας σε παραμορφώσεις του σήματος και μειωμένη ισχύ του σήματος.

4.1.2 Επίδραση των περιορισμών του εύρους ζώνης στην αποδοτικότητα της μετάδοσης δεδομένων

Το περιορισμένο εύρος ζώνης επηρεάζει άμεσα τη χωρητικότητα και την απόδοση των ασύρματων δικτύων. Με χαμηλότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης, το δίκτυο μπορεί να διαχειριστεί λιγότερες ταυτόχρονες μεταδόσεις δεδομένων, οδηγώντας σε αυξημένη συμφόρηση και μειωμένους ρυθμούς δεδομένων. Οι περιορισμοί εύρους ζώνης έχουν σημαντικό αντίκτυπο σε διάφορες εφαρμογές και υπηρεσίες. Οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως οι κλήσεις φωνής και βίντεο, απαιτούν επαρκές εύρος ζώνης για την έγκαιρη μετάδοση πακέτων δεδομένων. Εάν το διαθέσιμο εύρος ζώνης δεν επαρκεί, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις, απώλεια πακέτων και επιδείνωση της ποιότητας της κλήσης.

Οι εφαρμογές με μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, όπως οι μεταφορές αρχείων, η ροή πολυμέσων και οι υπηρεσίες νέφους, επηρεάζονται επίσης από το περιορισμένο εύρος ζώνης. Οι χρήστες αντιμετωπίζουν χαμηλότερες ταχύτητες λήψης και μεταφόρτωσης, προβλήματα buffering και μεγαλύτερους χρόνους μεταφοράς όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι ανεπαρκές. Επιπλέον,

το περιορισμένο εύρος ζώνης εμποδίζει την επεκτασιμότητα των ασύρματων δικτύων. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών, το διαθέσιμο εύρος ζώνης πρέπει να μοιράζεται σε περισσότερους χρήστες, γεγονός που ενδεχομένως οδηγεί σε συμφόρηση του δικτύου και υποβαθμισμένη απόδοση.

4.1.3 Στρατηγικές για τη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων

Για τον μετριασμό των επιπτώσεων του περιορισμένου εύρους ζώνης στην αποδοτικότητα της μετάδοσης δεδομένων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες στρατηγικές:

- **Διαμόρφωση της κυκλοφορίας και διαχείριση QoS:** Με την εφαρμογή τεχνικών διαμόρφωσης της κυκλοφορίας, οι διαχειριστές του δικτύου μπορούν να δίνουν προτεραιότητα σε ορισμένους τύπους κυκλοφορίας έναντι άλλων. Οι μηχανισμοί ποιότητας υπηρεσίας (QoS) επιτρέπουν την κατανομή του εύρους ζώνης με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής ή τις προτιμήσεις του χρήστη. Αυτό διασφαλίζει ότι οι κρίσιμες εφαρμογές ή οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου λαμβάνουν επαρκές εύρος ζώνης για την ομαλή μετάδοση δεδομένων.
- **Δέσμευση εύρους ζώνης:** Η δέσμευση μέρους του διαθέσιμου εύρους ζώνης για συγκεκριμένες εφαρμογές ή υπηρεσίες εξασφαλίζει την αποκλειστική χωρητικότητά τους, αποτρέποντας άλλη λιγότερο κρίσιμη κίνηση από το να συμφορήσει το δίκτυο και να παρεμποδίσει την απόδοσή τους.
- **Δυναμική διαχείριση εύρους ζώνης:** Οι τεχνικές δυναμικής κατανομής πόρων, όπως η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, η δέσμευση καναλιών και η κατανομή φάσματος, βελτιστοποιούν τη χρήση του εύρους ζώνης με βάση τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν στο δίκτυο να προσαρμόζεται και να κατανέμει περισσότερο εύρος ζώνης όταν η ζήτηση είναι υψηλή ή να μειώνει την κατανομή σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.
- **Βελτιστοποίηση δικτύου:** Η αξιοποίηση αποδοτικών αλγορίθμων δρομολόγησης, τεχνικών σχεδιασμού της κυκλοφορίας και εξισορρόπησης φορτίου μπορεί να βοηθήσει στη διανομή της κυκλοφορίας στο δίκτυο και στη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται τα σημεία συμφόρησης και η συμφόρηση σε συγκεκριμένα τμήματα του δικτύου, βελτιώνοντας τη συνολική αποδοτικότητα της μετάδοσης δεδομένων. Μια τέτοια βελτιστοποίηση είναι η υλοποίηση δικτύων παράδοσης περιεχομένου (CDN), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσωρινή αποθήκευση δημοφιλούς περιεχομένου πιο κοντά στους χρήστες, μειώνοντας την ανάγκη μετάδοσης δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις και βελτιστοποιώντας τη χρήση του εύρους ζώνης.

4.2 Παρεμβολές και ποιότητα σήματος

Η παρεμβολή σήματος είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα μετάδοσης δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα. Οι παρεμβολές μπορούν να υποβαθμίσουν την ισχύ του σήματος, να εισάγουν σφάλματα και να επηρεάσουν τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία των ασύρματων επικοινωνιών. Καθίσταται επιτακτική η ανάγκη να διευκρινιστούν οι διάφορες πτυχές της παρεμβολής σήματος και στον αντίκτυπό της στην ποιότητα μετάδοσης δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα.

4.2.1 Πηγές παρεμβολής σήματος στα ασύρματα δίκτυα

Η παρεμβολή σήματος μπορεί να προέρχεται από πολλαπλές πηγές, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα σχετικά με τις παρεμβολές από κοινή χρήση του διαύλου επικοινωνίας, παρεμβολές από γειτονικά κανάλια, αλλά και από διάθλαση και αντανάκλαση του σήματος εκπομπής. Κάποιες άλλες πηγές παρεμβολών είναι:

- **Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (HMI):** Η HMI μπορεί να εμφανιστεί όταν ασύρματες συσκευές ή δίκτυα λειτουργούν κοντά σε άλλες ηλεκτρονικές συσκευές που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η παρεμβολή αυτή μπορεί να διαταράζει τα ασύρματα σήματα και να επηρεάσει την ποιότητα της μετάδοσης δεδομένων.
- **Φυσικά εμπόδια:** Φυσικά αντικείμενα όπως τοίχοι, κτίρια, δέντρα, ακόμη και ανθρώπινα σώματα μπορούν να εμποδίσουν ή να απορροφήσουν ασύρματα σήματα. Καθώς το σήμα συναντά αυτά τα εμπόδια, υφίσταται εξασθένηση και ανάκλαση, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση του σήματος. Η παρουσία φυσικών εμποδίων μεταξύ του ασύρματου πομπού και του δέκτη μπορεί να εισάγει διαταραχές σήματος και να μειώσει το διαθέσιμο εύρος ζώνης.
- **Καιρικές συνθήκες:** Οι καιρικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν τη διάδοση του ασύρματου σήματος και να εισάγουν διαταραχές στο σήμα. Για παράδειγμα, η έντονη βροχή, η ομίχλη, το χιόνι ή οι καταιγίδες μπορεί να προκαλέσουν εξασθένηση και ανάκλαση του σήματος, οδηγώντας σε υποβαθμισμένη ισχύ σήματος και μειωμένο εύρος ζώνης. Οι ακραίες καιρικές συνθήκες μπορεί να έχουν σημαντικότερο αντίκτυπο στα ασύρματα δίκτυα που λειτουργούν σε εξωτερικά περιβάλλοντα.
- **Αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR):** Ο λόγος σήματος προς θόρυβο αναφέρεται στον λόγο της επιθυμητής ισχύος σήματος προς το επίπεδο θορύβου υποβάθρου. Εάν η ισχύς του σήματος είναι πολύ χαμηλή σε σύγκριση με το θόρυβο, μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλό SNR, καθιστώντας δύσκολη την ακριβή αποκωδικοποίηση του σήματος από το δέκτη. Ένα χαμηλό SNR μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχές σήματος, σφάλματα και μειωμένο αποτελεσματικό εύρος ζώνης.

4.2.2 Επιπτώσεις των παρεμβολών σήματος στην ποιότητα μετάδοσης δεδομένων

Οι παρεμβολές σήματος έχουν διάφορες δυσμενείς επιπτώσεις στην ποιότητα της μετάδοσης δεδομένων:

- **Αυξημένος ρυθμός σφάλματος bit (BER):** Η παρεμβολή μπορεί να εισάγει σφάλματα στα λαμβανόμενα δεδομένα, οδηγώντας σε υψηλότερο BER. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αλλοιωμένα ή ελλιπή πακέτα δεδομένων, απαιτώντας επαναμεταδόσεις και μειώνοντας τη συνολική αποδοτικότητα της μετάδοσης δεδομένων.
- **Απώλεια πακέτων:** Η παρεμβολή μπορεί να προκαλέσει απώλεια ή απόρριψη πακέτων κατά τη μετάδοση. Η απώλεια πακέτων επηρεάζει την αξιοπιστία της παράδοσης δεδομένων και μπορεί να οδηγήσει σε υποβαθμισμένη απόδοση, ιδίως σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου που απαιτούν συνεχείς ροές δεδομένων.
- **Μειωμένη ισχύς σήματος:** Οι παρεμβολές αποδυναμώνουν το λαμβανόμενο σήμα, με αποτέλεσμα τη μείωση SNR. Ένα αδύναμο σήμα μπορεί να περιορίσει την περιοχή κάλυψης, να μειώσει την αποτελεσματική εμβέλεια του ασύρματου δικτύου και να επηρεάσει τη συνολική ποιότητα μετάδοσης δεδομένων.
- **Αυξημένη καθυστέρηση:** Η προκαλούμενη από παρεμβολές απώλεια πακέτων ή οι επαναμεταδόσεις μπορούν να εισάγουν καθυστερήσεις στη μετάδοση δεδομένων, με αποτέλεσμα αυξημένη καθυστέρηση.

4.2.3 Τεχνικές για τον μετριασμό των παρεμβολών σήματος

Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για τον μετριασμό των επιπτώσεων της παρεμβολής σήματος, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων:** Η προς τα εμπρός διόρθωση σφαλμάτων (FEC) και η αυτόματη αίτηση επανάληψης (ARQ) χρησιμοποιούνται συνήθως για τον εντοπισμό και τη διόρθωση σφαλμάτων που εισάγονται από παρεμβολές. Η FEC προσθέτει πλεονασμό στα μεταδιδόμενα δεδομένα, επιτρέποντας στο δέκτη να ανακατασκευάσει τα αρχικά δεδομένα ακόμη και αν προκύψουν κάποια σφάλματα. Οι μηχανισμοί ARQ ζητούν επαναμεταδόσεις κατεστραμμένων ή χαμένων πακέτων για να διασφαλίσουν την ακεραιότητα των δεδομένων.
- **Ενίσχυση σήματος:** Οι τεχνικές ενίσχυσης σήματος αποσκοπούν στην ενίσχυση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, βελτιώνοντας το SNR και μειώνοντας τις επιπτώσεις των παρεμβολών. Οι μηχανισμοί ελέγχου ισχύος προσαρμόζουν την ισχύ μετάδοσης με βάση την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη ποιότητα σήματος. Οι

τεχνικές προσαρμοστικής διαμόρφωσης προσαρμόζουν δυναμικά το σχήμα διαμόρφωσης ώστε να ταιριάζει με τις συνθήκες του καναλιού και να βελτιστοποιεί το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

- **Τεχνικές ποικιλομορφίας:** Οι τεχνικές ποικιλομορφίας, όπως η ποικιλομορφία κεραίας ή η ποικιλομορφία χώρου, αξιοποιούν πολλαπλές κεραίες για την καταπολέμηση της εξασθένησης του σήματος και τη βελτίωση της λήψης σήματος. Λαμβάνοντας σήματα από διαφορετικές διαδρομές ή γωνίες, οι τεχνικές ποικιλομορφίας μπορούν να βελτιώσουν την αξιοπιστία του σήματος και να μετριάσουν τις επιπτώσεις της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών.

4.3 Προβλήματα ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής

Η ασφάλεια και το απόρρητο είναι κρίσιμες πτυχές της αποτελεσματικής μετάδοσης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Η παρούσα ενότητα εξετάζει την κρισιμότητα της ασφάλειας και της παραβίασης της ιδιωτικότητας που σχετίζονται με την ασύρματη μετάδοση δεδομένων, ιδίως στο πλαίσιο της χρήσης μεγάλων δεδομένων [53]. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται οι αδυναμίες των ασύρματων δικτύων, οι κίνδυνοι και τις προκλήσεις που σχετίζονται με αυτά, καθώς και παρατίθενται μέτρα και βέλτιστες πρακτικές για τη διασφάλιση της ασφαλούς και ιδιωτικής μετάδοσης δεδομένων.

4.3.1 Επισκόπηση των κινδύνων ασφαλείας στην ασύρματη μετάδοση δεδομένων

Τα ασύρματα δίκτυα παρέχουν βολική και ευέλικτη συνδεσιμότητα, αλλά εισάγουν επίσης μοναδικούς κινδύνους ασφαλείας σε σύγκριση με τα ενσύρματα δίκτυα. Η κατανόηση αυτών των κινδύνων είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της εμπιστευτικότητας, της ακεραιότητας και της διαθεσιμότητας των δεδομένων που μεταδίδονται μέσω ασύρματων δικτύων.

4.3.1.1 Μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και υποκλοπή

Τα ασύρματα δίκτυα είναι ευάλωτα σε μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και υποκλοπή, όπου οι επιτιθέμενοι υποκλέπτουν και αναλύουν τα δεδομένα που μεταδίδονται. Αυτές οι δραστηριότητες ενέχουν σημαντικούς κινδύνους για την ασφάλεια, θέτοντας σε κίνδυνο την εμπιστευτικότητα και την ακεραιότητα της μετάδοσης δεδομένων. Η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε ασύρματα δίκτυα μπορεί να οδηγήσει σε παραβιάσεις δεδομένων, όπου ευαίσθητες πληροφορίες πέφτουν σε λάθος χέρια. Οι επιτιθέμενοι μπορούν να υποκλέψουν και να συλλάβουν εμπιστευτικά δεδομένα, όπως προσωπικές πληροφορίες ή οικονομικά στοιχεία, οδηγώντας σε παραβιάσεις της ιδιωτικής ζωής, οικονομικές απώλειες ή βλάβη της φήμης. Η υποκλοπή των ασύρματων μεταδόσεων οδηγεί επίσης σε διαρροή πληροφοριών, επιτρέποντας στους αντιπάλους να αποκτήσουν πρόσβαση σε ιδιωτικές συνομιλίες, εμπορικά μυστικά ή διαβαθμισμένες πληροφορίες. Η κλοπή ταυτότητας είναι ένα άλλο πρόβλημα που προκύπτει από τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε ασύρματα δίκτυα, καθώς οι επιτιθέμενοι μπορούν να συγκεντρώσουν διαπιστευτήρια σύνδεσης και προσωπικές πληροφορίες για τη διεξαγωγή δόλιων δραστηριοτήτων. Η κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας αποτελεί επίσης

πρόβλημα, καθώς ανταγωνιστές ή κακόβουλες οντότητες μπορούν να υποκλέψουν πολύτιμες και αποκλειστικές πληροφορίες. Η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και η υποκλοπή μπορούν να οδηγήσουν σε νομικά ζητήματα και ζητήματα συμμόρφωσης, να υπονομεύσουν την εμπιστοσύνη των χρηστών και να έχουν σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις.

4.3.1.2 Επιθέσεις Man-in-the-Middle

Επιπρόσθετα, τα ασύρματα δίκτυα είναι ευάλωτα σε επιθέσεις man-in-the-middle (MITM), όπου οι επιτιθέμενοι υποκλέπτουν την επικοινωνία μεταξύ δύο μερών και αποκτούν μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στα δεδομένα που μεταδίδονται. Η ασύρματη φύση αυτών των δικτύων τα καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτα σε τέτοιες επιθέσεις. Οι επιτιθέμενοι μπορούν να τοποθετηθούν μεταξύ των νόμιμων μερών και να αλλοιώσουν τα δεδομένα ή να υποκλέψουν την επικοινωνία. Οι επιθέσεις MITM μπορεί να έχουν σοβαρές συνέπειες, όπως χειραγώγηση δεδομένων, μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε ευαίσθητους πόρους, κλοπή πληροφοριών και πειρατεία συνόδου. Η χειραγώγηση δεδομένων μπορεί να οδηγήσει στην αλλοίωση ή τη διαφθορά κρίσιμων πληροφοριών, με αποτέλεσμα οικονομικές απώλειες ή υπονομευμένες επιχειρηματικές λειτουργίες. Η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση επιτρέπει στους επιτιθέμενους να αποκτήσουν τον έλεγχο λογαριασμών ή συστημάτων, οδηγώντας ενδεχομένως σε μη εξουσιοδοτημένες ενέργειες και δόλιες συναλλαγές. Η κλοπή πληροφοριών μέσω επιθέσεων MITM θέτει σε κίνδυνο την εμπιστευτικότητα ευαίσθητων δεδομένων, οδηγώντας σε κλοπή ταυτότητας, οικονομική απάτη ή άλλες κακόβουλες δραστηριότητες. Η πειρατεία συνόδου (Session Hijacking) επιτρέπει στους επιτιθέμενους να αναλάβουν τον έλεγχο των εν εξελίξει συνόδων, αποτελώντας σημαντική απειλή για την επικοινωνία και την πρόσβαση σε πόρους. Η πρόληψη και ο μετριασμός των επιθέσεων MITM περιλαμβάνει την εφαρμογή ασφαλών πρωτοκόλλων, την ευαισθητοποίηση των χρηστών και την υιοθέτηση βέλτιστων πρακτικών ασφαλείας.

4.3.1.3 Επιθέσεις Denial-of-Service (DoS)

Τα ασύρματα δίκτυα είναι ευάλωτα σε επιθέσεις άρνησης παροχής υπηρεσιών (DoS), όπου οι επιτιθέμενοι διαταράσσουν την κανονική λειτουργία του δικτύου, καθιστώντας το μη διαθέσιμο στους νόμιμους χρήστες. Οι επιθέσεις DoS μπορούν να πάρουν διάφορες μορφές, όπως επιθέσεις πλημμύρας (flooding), επιθέσεις παρεμβολής (jamming), επιθέσεις αποαυτοποίησης (de-authentication) και επιθέσεις εξάντλησης πόρων (resource exhaustion). Οι επιθέσεις αυτές προκαλούν διακοπή της υπηρεσίας, υποβάθμιση της απόδοσης ή πλήρη μη διαθεσιμότητα. Οι συνέπειες των επιθέσεων DoS μπορεί να είναι σοβαρές, με αποτέλεσμα την ταλαιπωρία των χρηστών, οικονομικές απώλειες για τους οργανισμούς και ζημία στη φήμη τους. Η πρόληψη και ο μετριασμός των επιθέσεων DoS απαιτεί ισχυρά μέτρα ασφαλείας, όπως παρακολούθηση του δικτύου, ανίχνευση εισβολών, φιλτράρισμα της κίνησης και μηχανισμούς περιορισμού του ρυθμού. Η τμηματοποίηση του δικτύου, ο πλεονασμός και η συνεχής ενημέρωση σχετικά με τις πρακτικές ασφαλείας διαδραματίζουν επίσης καθοριστικό ρόλο στην προστασία των ασύρματων δικτύων από επιθέσεις DoS. Η ενίσχυση της διαθεσιμότητας και της ανθεκτικότητας των ασύρματων δικτύων είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της αδιάλειπτης εξυπηρέτησης των νόμιμων χρηστών.

4.3.2 Μέθοδοι προστασίας από κινδύνους ασύρματου δικτύου

Για τον μετριασμό των κινδύνων που σχετίζονται με τα τρωτά σημεία των ασύρματων δικτύων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι για την ενίσχυση της ασφάλειας και την προστασία από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, υποκλοπή δεδομένων, παρεμβολές και άλλες πιθανές απειλές. Οι ακόλουθες είναι βασικές μέθοδοι που πρέπει να εξεταστούν:

4.3.2.1 Ασφαλής πιστοποίηση και κρυπτογράφηση δικτύου

Η εφαρμογή ισχυρών πρωτοκόλλων ελέγχου ταυτότητας δικτύου είναι ζωτικής σημασίας για την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης σε ασύρματα δίκτυα. Οι ισχυροί κωδικοί πρόσβασης, ο έλεγχος ταυτότητας δύο παραγόντων (Two-Factor Authentication) και ο έλεγχος ταυτότητας βάσει πιστοποιητικών μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την ασφάλεια του δικτύου. Επιπλέον, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μηχανισμοί κρυπτογράφησης όπως WPA2 ή WPA3 για να διασφαλίζεται η εμπιστευτικότητα και η ακεραιότητα των μεταδιδόμενων δεδομένων. Η κρυπτογράφηση μετατρέπει τα δεδομένα σε μη αναγνώσιμη μορφή, καθιστώντας δύσκολη την αποκρυπτογράφηση από τους επιτιθέμενους, ακόμη και αν υποκλαπούν. Συνδυάζοντας ισχυρές τεχνικές ελέγχου ταυτότητας και κρυπτογράφησης, οι οργανισμοί μπορούν να δημιουργήσουν ασφαλείς συνδέσεις και να προστατεύσουν από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και υποκλοπή δεδομένων.

4.3.2.2 Τμηματοποίηση και απομόνωση δικτύου

Η τμηματοποίηση δικτύου περιλαμβάνει τη διαίρεση ενός ασύρματου δικτύου σε μικρότερα, απομονωμένα υποδίκτυα. Διαχωρίζοντας τις συσκευές και τις υπηρεσίες σε διαφορετικά τμήματα, οι οργανισμοί μπορούν να περιορίσουν τον αντίκτυπο πιθανών παραβιάσεων ασφαλείας. Εάν ένας επιτιθέμενος αποκτήσει πρόσβαση σε ένα τμήμα, θα έχει περιορισμένη πρόσβαση σε άλλα τμήματα, μειώνοντας τον συνολικό κίνδυνο. Η απομόνωση του δικτύου ενισχύει περαιτέρω την ασφάλεια απομονώνοντας τα κρίσιμα συστήματα ή τα ευαίσθητα δεδομένα από τη γενική κυκλοφορία του δικτύου. Αυτό αποτρέπει τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και περιορίζει τις πιθανές ζημιές που προκαλούνται από μια επίθεση.

4.3.2.3 Συστήματα ανίχνευσης και πρόληψης εισβολών

Τα συστήματα ανίχνευσης και πρόληψης εισβολών (Intrusion Detection and Prevention Systems - IDPS) διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην ανίχνευση και τον μετριασμό πιθανών απειλών σε ασύρματα δίκτυα. Τα συστήματα αυτά παρακολουθούν την κυκλοφορία του δικτύου, αναλύουν τα μοτίβα και ανιχνεύουν τυχόν ύποπτες ή κακόβουλες δραστηριότητες. Μπορούν να εντοπίσουν μη εξουσιοδοτημένες προσπάθειες πρόσβασης, ασυνήθιστη συμπεριφορά δικτύου ή γνωστές υπογραφές επιθέσεων. Μόλις εντοπιστούν, το IDPS μπορεί να προβεί στις κατάλληλες ενέργειες, όπως ο αποκλεισμός ή η ειδοποίηση των διαχειριστών, για την αποτροπή περαιτέρω ζημιών ή μη

εξουσιοδοτημένης πρόσβασης. Η ανάπτυξη ενός IDPS ενισχύει τη στάση ασφαλείας ενός ασύρματου δικτύου και βοηθά στην έγκαιρη ανίχνευση απειλών.

4.3.2.4 Τακτικοί έλεγχοι και ενημερώσεις ασφαλείας

Οι τακτικοί έλεγχοι ασφαλείας είναι απαραίτητοι για τον εντοπισμό τρωτών σημείων, την αξιολόγηση των κινδύνων και τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα πρότυπα ασφαλείας. Η διενέργεια περιοδικών αξιολογήσεων της υποδομής του ασύρματου δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των συσκευών, των πρωτοκόλλων και των ρυθμίσεων, βοηθά στην αποκάλυψη πιθανών αδυναμιών που μπορούν να αξιοποιηθούν από επιτιθέμενους. Επιπλέον, η επικαιροποίηση όλων των στοιχείων του δικτύου με τις τελευταίες διορθώσεις ασφαλείας και ενημερώσεις λογισμικού συμβάλλει στον μετριασμό των γνωστών ευπαθειών και διασφαλίζει τη βέλτιστη ασφάλεια.

4.3.2.5 Παρακολούθηση δικτύου και αντιμετώπιση περιστατικών

Η εφαρμογή εργαλείων παρακολούθησης δικτύου και η κατάρτιση ενός σχεδίου αντιμετώπισης περιστατικών είναι απαραίτητη για τον άμεσο εντοπισμό και την αντιμετώπιση περιστατικών ασφαλείας. Η συνεχής παρακολούθηση επιτρέπει τον εντοπισμό ύποπτων δραστηριοτήτων, ασυνήθιστης συμπεριφοράς του δικτύου ή πιθανών ενδείξεων παραβίασης. Με την παρακολούθηση της κυκλοφορίας του δικτύου, των αρχείων καταγραφής συστημάτων και των συμβάντων ασφαλείας, οι οργανισμοί μπορούν να εντοπίζουν και να ανταποκρίνονται εγκαίρως σε περιστατικά ασφαλείας, ελαχιστοποιώντας τις πιθανές ζημιές.

4.3.2.6 Εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση των χρηστών

Τα προγράμματα εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης των χρηστών είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση μιας κουλτούρας ασφάλειας σε έναν οργανισμό. Με την εκπαίδευση των χρηστών σχετικά με τους κινδύνους που σχετίζονται με τα ασύρματα δίκτυα και την παροχή κατευθυντήριων γραμμών σχετικά με τις ασφαλείς πρακτικές, οι οργανισμοί μπορούν να δώσουν στα άτομα τη δυνατότητα να λαμβάνουν ενημερωμένες αποφάσεις και να αποφεύγουν πιθανές παγίδες ασφαλείας. Η εκπαίδευση των χρηστών σε θέματα όπως η αναγνώριση των ηλεκτρονικών μηνυμάτων ηλεκτρονικού "ψαρέματος", η αποφυγή μη ασφαλών δικτύων και η άσκηση καλής υγιεινής των κωδικών πρόσβασης μπορεί να μειώσει σημαντικά την πιθανότητα επιτυχών επιθέσεων.

4.4 Επεκτασιμότητα και ετερογένεια του δικτύου

Η επεκτασιμότητα και η ετερογένεια του δικτύου αποτελούν κρίσιμες εκτιμήσεις για την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα, ιδίως στο πλαίσιο των μεγάλων δεδομένων. Στην παρούσα ενότητα διερευνώνται οι προκλήσεις που θέτουν η επεκτασιμότητα και

η ετερογένεια του δικτύου και συζητούνται στρατηγικές για την αποτελεσματική αντιμετώπισή τους.

4.4.1 Προκλήσεις επεκτασιμότητας και ετερογένειας στα ασύρματα δίκτυα

Η επεκτασιμότητα αναφέρεται στην ικανότητα ενός δικτύου να φιλοξενεί έναν αυξανόμενο αριθμό χρηστών, συσκευών και κυκλοφορίας δεδομένων χωρίς να διακυβεύεται η απόδοση. Τα ασύρματα δίκτυα αντιμετωπίζουν διάφορες προκλήσεις κλιμάκωσης:

- **Αυξημένη κυκλοφορία δεδομένων:** Με τον πολλαπλασιασμό των συνδεδεμένων συσκευών και την εκθετική αύξηση των εφαρμογών έντασης δεδομένων, τα ασύρματα δίκτυα πρέπει να διαχειρίζονται συνεχώς αυξανόμενη κίνηση δεδομένων. Η υποδομή και τα πρωτόκολλα του δικτύου πρέπει να είναι ικανά να κλιμακώνονται για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση.
- **Χωρητικότητα δικτύου:** Η επεκτασιμότητα σχετίζεται άμεσα με τη χωρητικότητα του δικτύου, η οποία καθορίζει τον μέγιστο αριθμό ταυτόχρονων χρηστών και τον όγκο δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν. Η ανεπαρκής χωρητικότητα του δικτύου οδηγεί σε συμφόρηση, υποβαθμισμένη απόδοση και μειωμένη αποδοτικότητα στη μετάδοση δεδομένων.
- **Κατανομή πόρων:** Η αποδοτική κατανομή των πόρων γίνεται πρόκληση καθώς το δίκτυο κλιμακώνεται. Η διασφάλιση της δίκαιης και βέλτιστης κατανομής των πόρων, όπως το εύρος ζώνης και η επεξεργαστική ισχύς, καθίσταται ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της αποδοτικότητας της μετάδοσης δεδομένων.

Από την άλλη, η ετερογένεια δικτύου αναφέρεται στη συνύπαρξη διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών, πρωτοκόλλων και συσκευών εντός ενός δικτύου. Τα ετερογενή δίκτυα θέτουν προκλήσεις για την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων:

- **Διαλειτουργικότητα (Interoperability):** Διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες και πρωτόκολλα μπορεί να έχουν διαφορετικές δυνατότητες, προβλήματα συμβατότητας και χαρακτηριστικά επιδόσεων. Η διασφάλιση της διαλειτουργικότητας μεταξύ ετερογενών δικτύων είναι ζωτικής σημασίας για τη διευκόλυνση της απρόσκοπτης μετάδοσης δεδομένων.
- **Διαχείριση πόρων:** Η ετερογένεια των δικτύων απαιτεί αποτελεσματική διαχείριση των πόρων για την αποτελεσματική κατανομή των πόρων σε διαφορετικές τεχνολογίες και συσκευές. Αυτό περιλαμβάνει ευφυή χρονοπρογραμματισμό πόρων, εξισορρόπηση φορτίου και παροχή QoS για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης μετάδοσης δεδομένων.

- **Διαχείριση παράδοσης και κινητικότητας:** Οι αποτελεσματικοί μηχανισμοί μεταπομπής (handover) καθίστανται ζωτικής σημασίας σε ετερογενή δίκτυα όπου οι συσκευές μπορούν να μεταβούν μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης. Οι απρόσκοπτες μεταβιβάσεις και η διαχείριση της κινητικότητας είναι απαραίτητες για τη διατήρηση της αδιάλειπτης μετάδοσης δεδομένων, εξασφαλίζοντας παράλληλα την καλύτερη διαθέσιμη συνδεσιμότητα δικτύου.

4.4.2 Στρατηγικές αντιμετώπισης των προκλήσεων

Για την αντιμετώπιση των προκλήσεων επεκτασιμότητας στα ασύρματα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες στρατηγικές:

- **Κατάλληλος σχεδιασμός δικτύου:** Ο σωστός σχεδιασμός και η σχεδίαση του δικτύου είναι ουσιώδεις για τη διασφάλιση της επεκτασιμότητας. Αυτό περιλαμβάνει το σχεδιασμό μιας ισχυρής υποδομής, την εξέταση των απαιτήσεων κάλυψης και χωρητικότητας και την ενσωμάτωση των μελλοντικών αναγκών κλιμάκωσης. Η ανάπτυξη πρόσθετων σημείων πρόσβασης ή σταθμών βάσης μπορεί να βοηθήσει στην κατανομή του φορτίου και στην αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου.
- **Διαχείριση φάσματος:** Η αποτελεσματική διαχείριση του φάσματος είναι ζωτικής σημασίας για την επεκτασιμότητα. Οι τεχνικές δυναμικής κατανομής φάσματος, όπως το γνωστικό ραδιόφωνο και η κοινή χρήση φάσματος, βελτιστοποιούν τη χρήση του φάσματος και μετριάζουν τις παρεμβολές, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη μετάδοση δεδομένων.
- **Εκφόρτωση κίνησης:** Η μεταφόρτωση της κυκλοφορίας δεδομένων από το κυψελοειδές δίκτυο σε εναλλακτικά δίκτυα, όπως το Wi-Fi ή οι μικρές κυψέλες, μπορεί να ανακουφίσει τη συμφόρηση και να βελτιώσει την επεκτασιμότητα. Οι έξυπνοι μηχανισμοί εκφόρτωσης κίνησης εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη μεταβίβαση και δίνουν προτεραιότητα στην εκφόρτωση με βάση τις συνθήκες του δικτύου.
- **Υπολογιστικό νέφος (Cloud) και υπολογιστική ακμής (Edge Computing):** Η αξιοποίηση των τεχνολογιών υπολογιστικού νέφους και υπολογισμού άκρων μπορεί να ενισχύσει την επεκτασιμότητα με την εκφόρτωση της επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων σε κεντρικούς ή καταναμημένους υπολογιστικούς πόρους. Αυτό μειώνει την επιβάρυνση των μεμονωμένων συσκευών και επιτρέπει την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων.

Για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της ετερογένειας του δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες στρατηγικές:

- **Τυποποίηση πρωτοκόλλων και διεπαφών:** Η τυποποίηση πρωτοκόλλων και διεπαφών επιτρέπει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών και συσκευών. Η τήρηση των βιομηχανικών προτύπων διασφαλίζει τη συμβατότητα και διευκολύνει την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων σε ετερογενή δίκτυα.
- **Διαχείριση και ενορχήστρωση δικτύου:** Οι πλατφόρμες κεντρικής διαχείρισης και ενορχήστρωσης δικτύων επιτρέπουν τον ενοποιημένο έλεγχο και την παρακολούθηση ετερογενών δικτύων. Αυτό διευκολύνει την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων, τη δυναμική διαμόρφωση και τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων.
- **Δικτύωση καθορισμένη από λογισμικό (SDN) και εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV):** Οι τεχνολογίες SDN (Software Defined Network) και NFV (Network Functions Virtualization) παρέχουν ευελιξία και ευκινησία στη διαχείριση ετερογενών δικτύων. Αυτές οι τεχνολογίες αποσυνδέουν τον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου από το υποκείμενο υλικό, επιτρέποντας τη δυναμική διαμόρφωση και την αποτελεσματική κατανομή των πόρων.
- **Προσαρμοστικοί μηχανισμοί επικοινωνίας και παράδοσης:** Τα προσαρμοστικά πρωτόκολλα επικοινωνίας και οι έξυπνοι μηχανισμοί μεταπομπής λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών και βελτιστοποιούν τη μετάδοση δεδομένων με βάση τις συνθήκες του δικτύου. Αυτοί οι μηχανισμοί εξασφαλίζουν απρόσκοπτες μεταβιβάσεις και αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων.

4.5 Ενεργειακή απόδοση

Η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι μια κρίσιμη πτυχή της αποτελεσματικής μετάδοσης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Καθώς οι ασύρματες συσκευές και η κυκλοφορία δεδομένων συνεχίζουν να αυξάνονται, η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας καθίσταται απαραίτητη για τη βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική λειτουργία του δικτύου. Αυτή η ενότητα εμβαθύνει στη σημασία της ενεργειακής απόδοσης στα ασύρματα δίκτυα και διερευνά διάφορες τεχνικές και στρατηγικές για την επίτευξη ενεργειακά αποδοτικής μετάδοσης δεδομένων.

4.5.1 Σημασία της ενεργειακής απόδοσης στα ασύρματα δίκτυα

Η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί κρίσιμο ζήτημα στα ασύρματα δίκτυα λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για ασύρματη επικοινωνία και του αυξανόμενου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών. Η αποδοτική χρήση της ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα δεν ωφελεί μόνο το περιβάλλον, αλλά επιφέρει επίσης πολλά πλεονεκτήματα τόσο για τους χρήστες όσο και για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων.

Πρώτον, τα ενεργειακά αποδοτικά ασύρματα δίκτυα έχουν θετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον μειώνοντας το αποτύπωμα άνθρακα και ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση ενέργειας. Τα

ασύρματα δίκτυα καταναλώνουν σημαντική ποσότητα ενέργειας για την τροφοδοσία της υποδομής του δικτύου, των σημείων πρόσβασης και των συνδεδεμένων συσκευών. Βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση, τα ασύρματα δίκτυα συμβάλλουν στις προσπάθειες βιωσιμότητας και συμβάλλουν στη διατήρηση των ενεργειακών πόρων.

Δεύτερον, η ενεργειακή απόδοση στα ασύρματα δίκτυα οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε ασύρματες συσκευές, όπως τα smartphones, τα tablet και οι συσκευές IoT. Με τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την ασύρματη επικοινωνία, οι συσκευές μπορούν να λειτουργούν για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα χωρίς να απαιτείται συχνή επαναφόρτιση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε σενάρια όπου η πρόσβαση σε πηγές ενέργειας είναι περιορισμένη ή όπου η συχνή αντικατάσταση της μπαταρίας είναι ανέφικτη. Η παρατεταμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας βελτιώνει την άνεση του χρήστη, την παραγωγικότητα και τη συνολική χρηστικότητα των ασύρματων συσκευών.

Επιπλέον, η ενεργειακή απόδοση επιφέρει εξοικονόμηση κόστους τόσο για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων όσο και για τους τελικούς χρήστες. Με τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να μειώσουν τα λειτουργικά τους έξοδα, συμπεριλαμβανομένων των λογαριασμών ηλεκτρικού ρεύματος και του κόστους συντήρησης. Επιπλέον, οι ενεργειακά αποδοτικές ασύρματες συσκευές καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια, με αποτέλεσμα τη μείωση του ενεργειακού κόστους για τους τελικούς χρήστες. Για οργανισμούς με μεγάλης κλίμακας ασύρματες εγκαταστάσεις, η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους με την πάροδο του χρόνου.

Εκτός από την εξοικονόμηση κόστους, τα ενεργειακά αποδοτικά ασύρματα δίκτυα ενισχύουν την αξιοπιστία και τη χωρητικότητα του δικτύου. Με την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, η υποδομή του δικτύου μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά, μειώνοντας τον κίνδυνο βλαβών και διακοπής λειτουργίας του συστήματος. Η αποδοτική χρήση της ενέργειας επιτρέπει επίσης την καλύτερη κατανομή των πόρων του δικτύου, βελτιστοποιώντας τη χωρητικότητα και την απόδοση του δικτύου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε πυκνοκατοικημένες περιοχές ή σε περιβάλλοντα με υψηλή συμφόρηση του δικτύου. Με τη μεγιστοποίηση των διαθέσιμων πόρων μέσω της ενεργειακής απόδοσης, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να παρέχουν αξιόπιστη και υψηλής ποιότητας συνδεσιμότητα στους χρήστες.

Τέλος, η ενεργειακή απόδοση είναι ζωτικής σημασίας για την επεκτασιμότητα και τη μελλοντική ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων. Καθώς η ζήτηση για ασύρματη επικοινωνία συνεχίζει να αυξάνεται, οι ενεργειακά αποδοτικές πρακτικές επιτρέπουν στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να εξυπηρετούν μεγαλύτερους όγκους κίνησης και να υποστηρίζουν μεγαλύτερο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών. Με τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να αντιμετωπίσουν την αυξανόμενη ζήτηση χωρίς να διακυβεύεται η απόδοση ή να απαιτούνται σημαντικές αναβαθμίσεις της υποδομής. Αυτή η επεκτασιμότητα διασφαλίζει ότι τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να προσαρμόζονται στις εξελισσόμενες τεχνολογικές εξελίξεις και να ανταποκρίνονται στις ανάγκες μιας διευρυμένης βάσης χρηστών.

4.5.2 Τεχνικές για ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων

Η αποδοτική μετάδοση δεδομένων είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα. Χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τη χρήση ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα αξιόπιστη και υψηλής απόδοσης μετάδοση δεδομένων.

Μια τεχνική είναι ο έλεγχος ισχύος, ο οποίος περιλαμβάνει την προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης των ασύρματων συσκευών με βάση την ισχύ του σήματος και την απόσταση μεταξύ των συσκευών. Με τη δυναμική προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης, οι συσκευές μπορούν να μειώσουν τις περιττές ενεργειακές δαπάνες χωρίς να υποβαθμίσουν την ποιότητα του σήματος. Οι τεχνικές ελέγχου ισχύος, όπως οι αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος εκπομπής, επιτρέπουν στις συσκευές να λειτουργούν στο χαμηλότερο επίπεδο ισχύος που απαιτείται για τη διατήρηση αξιόπιστης επικοινωνίας, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας.

Μια άλλη τεχνική είναι η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding - AMC), η οποία προσαρμόζει το σχήμα διαμόρφωσης και το ρυθμό κωδικοποίησης με βάση τις συνθήκες του καναλιού. Οι τεχνικές AMC εκμεταλλεύονται τη μεταβαλλόμενη ποιότητα των ασύρματων καναλιών για την προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης δεδομένων. Σε καλές συνθήκες καναλιού, χρησιμοποιούνται υψηλότερα σχήματα διαμόρφωσης και ρυθμοί κωδικοποίησης για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών δεδομένων. Αντίθετα, σε κακές συνθήκες καναλιού, χρησιμοποιούνται χαμηλότερα σχήματα διαμόρφωσης και ρυθμοί κωδικοποίησης για να εξασφαλιστεί αξιόπιστη μετάδοση. Με τη δυναμική προσαρμογή των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, μπορεί να επιτευχθεί ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων χωρίς να θυσιάσει η απόδοση.

Η κατάσταση αναστολής λειτουργίας ή η κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας είναι μια άλλη τεχνική για την ενεργειακή απόδοση. Σε αυτή την τεχνική, οι συσκευές εξοικονομούν ενέργεια εισερχόμενες σε καταστάσεις χαμηλής ισχύος κατά τη διάρκεια περιόδων αδράνειας. Όταν μια συσκευή δεν μεταδίδει ή λαμβάνει ενεργά δεδομένα, μπορεί να μεταβεί σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Οι συσκευές ξυπνούν περιοδικά για να ελέγχουν για εισερχόμενα δεδομένα ή προγραμματισμένες μεταδόσεις. Με την έξυπνη διαχείριση των καταστάσεων αναστολής λειτουργίας και τον προγραμματισμό των μεταδόσεων δεδομένων, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, ιδίως σε σενάρια με διαλείποντα πρότυπα επικοινωνίας.

Στη συνέχεια, η συγκέντρωση πακέτων είναι μια τεχνική που περιλαμβάνει το συνδυασμό πολλαπλών μικρότερων πακέτων δεδομένων σε μεγαλύτερα πακέτα πριν από τη μετάδοση. Με τη συνάθροιση πακέτων, μειώνεται η επιβάρυνση που σχετίζεται με τις επικεφαλίδες πακέτων και τις επιβεβαιώσεις, με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη χρήση του ασύρματου μέσου και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Η συνάθροιση πακέτων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν πρόκειται για μικρά πακέτα δεδομένων ή εφαρμογές που παράγουν συχνές μικρές εκρήξεις δεδομένων.

Επιπλέον, η κωδικοποίηση δικτύου είναι μια τεχνική που επιτρέπει το συνδυασμό και τη μετάδοση πακέτων δεδομένων μαζί. Αντί για απλή προώθηση πακέτων, οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να εκτελούν λειτουργίες κωδικοποίησης για τη δημιουργία νέων πακέτων που περιέχουν συνδυασμούς αρχικών πακέτων. Με τη μετάδοση κωδικοποιημένων πακέτων, η κωδικοποίηση

δικτύου μειώνει τις περιττές μεταδόσεις και βελτιώνει την αποδοτικότητα του δικτύου, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια.

Τέλος, η δυναμική πρόσβαση φάσματος (Dynamic Spectrum Access – DSA) είναι μια τεχνική που αξιοποιεί τη χρήση των πόρων φάσματος με βάση τη διαθεσιμότητα και τη χρήση τους. Με τη δυναμική πρόσβαση σε υποαπασχολούμενες ζώνες φάσματος, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη μετάδοση δεδομένων και να μειώσουν τις παρεμβολές. Οι τεχνικές δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα, όπως το γνωστικό ραδιόφωνο ή η ανίχνευση φάσματος, επιτρέπουν στις συσκευές να επιλέγουν και να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά τις διαθέσιμες ζώνες φάσματος, οδηγώντας σε βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση στα ασύρματα δίκτυα.

4.6 Επίδραση ΜΔ στην ασύρματη μετάδοση

Η μετάδοση μεγάλων δεδομένων μέσω ασύρματων δικτύων παρουσιάζει μοναδικούς περιορισμούς και προκλήσεις που ενισχύουν και εισάγουν πρόσθετες πολυπλοκότητες σε σύγκριση με τη μετάδοση δεδομένων κανονικού μεγέθους. Οι προκλήσεις αυτές προκύπτουν από τον όγκο, την ταχύτητα, την ποικιλία, τις απαιτήσεις επεξεργασίας και τα χαρακτηριστικά αποθήκευσης των μεγάλων δεδομένων, που απαιτούν εξειδικευμένες προσεγγίσεις για αποτελεσματική και αξιόπιστη μετάδοση.

Ο όγκος των ΜΔ τα διαφοροποιεί, καθώς συχνά υπερβαίνουν τις δυνατότητες αποθήκευσης και επεξεργασίας των παραδοσιακών συστημάτων. Τα ασύρματα δίκτυα αντιμετωπίζουν προκλήσεις κλιμάκωσης για τη διαχείριση της αυξημένης κίνησης δεδομένων. Η στιβαρή αρχιτεκτονική δικτύου, η επαρκής παροχή εύρους ζώνης και οι αποτελεσματικοί μηχανισμοί δρομολόγησης δεδομένων είναι απαραίτητοι για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του όγκου δεδομένων.

Η ταχύτητα δημιουργίας των ΜΔ απαιτεί από τα ασύρματα δίκτυα να υποστηρίζουν τη μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Η χαμηλή καθυστέρηση, το υψηλό εύρος ζώνης και οι αποτελεσματικές δυνατότητες ροής δεδομένων είναι κρίσιμες για τη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η βελτιστοποίηση των πρωτοκόλλων δικτύου, η χρήση τεχνικών συμπίεσης δεδομένων και η εφαρμογή αποτελεσματικών μηχανισμών ροής δεδομένων βοηθούν στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που συνεπάγεται ο χειρισμός της ταχύτητας των ΜΔ μέσω ασύρματων δικτύων. Πέρα από την ταχύτητα δημιουργίας σημαντικός παράγοντας καθίσταται και η ταχύτητα αποστολής των δεδομένων ειδικά στις ασύρματες ζεύξεις, καθώς υπόκεινται σε μεγαλύτερες απώλειες και εμφανίζονται περισσότερα εμπόδια στο μέσο μετάδοσης. Ο συνδυασμός του όγκου των ΜΔ μαζί με την μειωμένη ταχύτητα αποστολής γίνεται ανασταλτικός παράγοντας στην αποδοτική μετάδοση των δεδομένων.

Η ποικιλία των ΜΔ και οι διάφορες μορφές τους εισάγουν την ανάγκη για υποστήριξη σε διάφορους τύπους δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των δομημένων, αδόμητων και ημιδομημένων δεδομένων. Τα ασύρματα δίκτυα πρέπει να διασφαλίζουν την απρόσκοπτη ενσωμάτωση και διαλειτουργικότητα σε αυτούς τους ετερογενείς τύπους δεδομένων, διατηρώντας παράλληλα την ακεραιότητα των δεδομένων. Οι τεχνικές μετασχηματισμού και τυποποίησης δεδομένων, μαζί με αποτελεσματικούς μηχανισμούς σειριοποίησης (serialization) και αποσειριοποίησης (deserialization) δεδομένων, διευκολύνουν την επιτυχή μετάδοση διαφορετικών τύπων δεδομένων μέσω ασύρματων δικτύων.

Οι απαιτήσεις επεξεργασίας των ΜΔ δημιουργούν προκλήσεις λόγω των περιορισμένων υπολογιστικών δυνατοτήτων των ασύρματων δικτύων. Η εξισορρόπηση των αναγκών επεξεργασίας δεδομένων με τους περιορισμούς του ασύρματου δικτύου είναι ζωτικής σημασίας. Η μεταφόρτωση των υπολογιστικών εργασιών σε διακομιστές νέφους ή σε πόρους υπολογιστών άκρων, η εφαρμογή κατανεμημένων πλαισίων επεξεργασίας και η χρήση τεχνικών συγκέντρωσης δεδομένων στην άκρη του δικτύου βοηθούν στην αντιμετώπιση των προκλήσεων επεξεργασίας που σχετίζονται με τη μετάδοση μεγάλων δεδομένων μέσω ασύρματων δικτύων.

Επιπρόσθετα, η αποθήκευση δεδομένων κατά τη μετάδοση ΜΔ αποτελεί πρόβλημα, καθώς οι ασύρματες συσκευές έχουν συχνά περιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης. Η ενσωμάτωση με συστήματα νέφους ή κεντρικά συστήματα αποθήκευσης καθίσταται αναγκαία για να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων. Προκλήσεις προκύπτουν όσον αφορά τον συγχρονισμό των δεδομένων, την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ ασύρματων συσκευών και συστημάτων αποθήκευσης και τη διασφάλιση της συνέπειας και της διαθεσιμότητας των δεδομένων. Η αξιοποίηση υπηρεσιών αποθήκευσης στο νέφος, η χρήση μηχανισμών προσωρινής αποθήκευσης και η εφαρμογή πρωτοκόλλων συγχρονισμού δεδομένων μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις αποθήκευσης.

Η αντιμετώπιση των περιορισμών και των προκλήσεων της μετάδοσης ΜΔ μέσω ασύρματων δικτύων απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση. Αυτή περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση της αρχιτεκτονικής του δικτύου, την παροχή επαρκούς εύρους ζώνης, την εφαρμογή αποτελεσματικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης και ροής δεδομένων, τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας για διάφορους τύπους δεδομένων, την εξισορρόπηση των απαιτήσεων επεξεργασίας δεδομένων και την απρόσκοπτη ενσωμάτωση με συστήματα αποθήκευσης στο νέφος ή σε κεντρικά συστήματα αποθήκευσης. Με την αντιμετώπιση αυτών των παραγόντων, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να χειριστούν με επιτυχία τις πολυπλοκότητες της μετάδοσης ΜΔ, επιτρέποντας την αποτελεσματική ανταλλαγή δεδομένων, την ανάλυση σε πραγματικό χρόνο και την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων.

5

Αποδοτική μετάδοση

Η ραγδαία ανάπτυξη των μεγάλων δεδομένων και η αυξανόμενη ζήτηση για επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο έχουν ασκήσει σημαντική πίεση στα ασύρματα δίκτυα για την υποστήριξη της αποτελεσματικής και αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων. Σε αυτό το κεφάλαιο, η έμφαση θα δοθεί στη διερεύνηση διαφόρων αλγορίθμων και μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση της αποδοτικότητας της μετάδοσης μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Οι τεχνικές αυτές αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων πόρων του δικτύου, στην ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και στη διασφάλιση της αξιόπιστης παράδοσης των δεδομένων.

Στο κεφάλαιο αυτό θα συζητηθούν οι τεχνικές τμηματοποίησης δεδομένων και παράλληλης μετάδοσης, οι οποίες περιλαμβάνουν τη διαίρεση μεγάλων συνόλων δεδομένων σε μικρότερα υποσύνολα για ταυτόχρονη μετάδοση. Παράλληλα θα παρουσιαστούν τεχνικές συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων, οι οποίες αποσκοπούν στη μείωση του πλεονασμού και στη βελτίωση της αξιοπιστίας στην ασύρματη μετάδοση. Στην συνέχεια, θα εξεταστούν οι στρατηγικές κατανομημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης, οι οποίες περιλαμβάνουν την αντιγραφή και προσωρινή αποθήκευση δεδομένων σε πολλαπλές συσκευές για τη βελτίωση της προσβασιμότητας και τη μείωση της καθυστέρησης. Ακόμη θα εξεταστούν υβριδικές λύσεις ενσύρματων-ασύρματων δικτύων, οι οποίες χρησιμοποιούν τόσο ενσύρματες όσο και ασύρματες συνδέσεις για βελτιστοποιημένη μετάδοση δεδομένων. Τέλος, θα αναλυθεί η εφαρμογή του Software Defined Networking (SDN) για τη μετάδοση μεγάλων δεδομένων, εστιάζοντας στις δυνατότητές του να επιτρέψει τη δυναμική διαχείριση της κίνησης και την κατανομή των πόρων.

5.1 Τμηματοποίηση ΜΔ και παράλληλη μετάδοση

Η τμηματοποίηση των δεδομένων είναι μια θεμελιώδης έννοια στο πεδίο της αποτελεσματικής μετάδοσης μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Όπως υποδηλώνει το όνομα, η τμηματοποίηση δεδομένων περιλαμβάνει τη διαίρεση μεγάλων συνόλων δεδομένων σε μικρότερα, πιο διαχειρίσιμα υποσύνολα. Το κύριο κίνητρο πίσω από αυτή την προσέγγιση είναι να καταστεί δυνατή η παράλληλη μετάδοση αυτών των μικρότερων τμημάτων δεδομένων σε πολλαπλά κανάλια

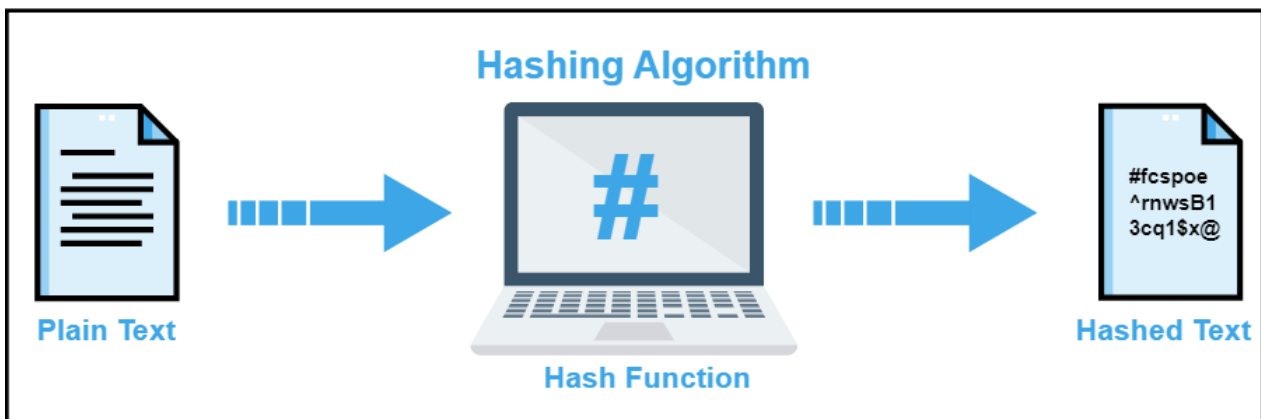
ή διαδρομές εντός του ασύρματου δικτύου. Με την κατανομή του φορτίου δεδομένων με αυτόν τον τρόπο, ο συνολικός χρόνος μετάδοσης μπορεί να μειωθεί σημαντικά και οι πόροι του δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο αποτελεσματικά.

Τα πλεονεκτήματα της τμηματοποίησης δεδομένων και της παράλληλης μετάδοσης είναι πολλαπλά. Πρώτον, διαιρώντας τα δεδομένα σε μικρότερα υποσύνολα, η διαδικασία μετάδοσης μπορεί να καταταξιωθεί σε πολλαπλούς πόρους δικτύου, επιτρέποντας την παράλληλη επεξεργασία και μετάδοση. Αυτό οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση και μειωμένη καθυστέρηση μετάδοσης. Δεύτερον, η τμηματοποίηση των δεδομένων επιτρέπει την αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου, αποφεύγοντας πιθανές συμφορήσεις που μπορεί να προκύψουν κατά τη μετάδοση μεγάλων συνόλων δεδομένων στο σύνολό τους. Με το σπάσιμο των δεδομένων σε διαχειρίσιμες μονάδες, το διαθέσιμο εύρος ζώνης μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, η τμηματοποίηση των δεδομένων παρέχει αυξημένη επεκτασιμότητα, καθώς η μετάδοση μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά με βάση τη διαθεσιμότητα των πόρων του δικτύου. Αυτό επιτρέπει τον αποτελεσματικό χειρισμό μεγάλων όγκων μεγάλων δεδομένων, τα οποία διαφορετικά μπορεί να υπερβούν τη χωρητικότητα του δικτύου εάν μεταδοθούν ως μονολιθική οντότητα. Επιπλέον, η τμηματοποίηση των δεδομένων ενισχύει την ανθεκτικότητα της διαδικασίας μετάδοσης. Σε περίπτωση σφαλμάτων ή αποτυχιών μετάδοσης, μόνο το επηρεαζόμενο υποσύνολο χρειάζεται να αναμεταδοθεί, ελαχιστοποιώντας τον αντίκτυπο στη συνολική διαδικασία μετάδοσης και μειώνοντας το ενδεχόμενο απώλειας δεδομένων.

Στις επόμενες ενότητες, θα διερευνήσουμε διάφορους αλγορίθμους και τεχνικές που σχετίζονται με την τμηματοποίηση δεδομένων και την παράλληλη μετάδοση, όπως η τμηματοποίηση με βάση τον κατακερματισμό, η τμηματοποίηση με βάση την εμβέλεια και η τμηματοποίηση Round-Robin.

5.1.1 Τμηματοποίηση με βάση τον κατακερματισμό (Hash Segmentation)

Η τμηματοποίηση με βάση τον κατακερματισμό είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την τμηματοποίηση δεδομένων στο πλαίσιο της μετάδοσης ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα [54]. Η προσέγγιση αυτή αξιοποιεί τις συναρτήσεις κατακερματισμού για την ομοιόμορφη κατανομή των τμημάτων δεδομένων σε πολλαπλά κανάλια ή μονοπάτια, εξασφαλίζοντας ισορροπημένο φορτίο και αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου.



Εικόνα 5.1 Αρχιτεκτονική αλγορίθμων κατακερματισμού [55]

Μια συνάρτηση κατακερματισμού είναι ένας μαθηματικός αλγόριθμος που λαμβάνει μια είσοδο, στην προκειμένη περίπτωση ένα τμήμα δεδομένων, και παράγει μια έξοδο σταθερού μεγέθους, γνωστή ως τιμή κατακερματισμού. Το κύριο χαρακτηριστικό μιας καλής συνάρτησης κατακερματισμού είναι η ικανότητά της να παράγει μοναδικές και ομοιόμορφα κατανεμημένες τιμές κατακερματισμού για διαφορετικές εισόδους. Αυτή η ιδιότητα εξασφαλίζει ότι τα τμήματα δεδομένων κατανέμονται σε διαφορετικά κανάλια ή μονοπάτια με ελάχιστες συγκρούσεις, οδηγώντας σε μια βελτιστοποιημένη διαδικασία παράλληλης μετάδοσης.

Στο πλαίσιο της τμηματοποίησης βάσει κατακερματισμού, τα δεδομένα χωρίζονται πρώτα σε μικρότερα τμήματα και σε κάθε τμήμα αποδίδεται ένα μοναδικό αναγνωριστικό. Στη συνέχεια, η συνάρτηση κατακερματισμού επεξεργάζεται αυτά τα αναγνωριστικά για τη δημιουργία τιμών κατακερματισμού, οι οποίες καθορίζουν την κατανομή κάθε τμήματος δεδομένων σε ένα συγκεκριμένο κανάλι ή μονοπάτι. Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει ότι τα τμήματα δεδομένων κατανέμονται ομοιόμορφα, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα συμφόρησης του δικτύου και μεγιστοποιώντας τη συνολική αποδοτικότητα της μετάδοσης.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της τμηματοποίησης βάσει κατακερματισμού είναι η προσαρμοστικότητα της στις δυναμικές συνθήκες του δικτύου. Καθώς αλλάζει η τοπολογία του δικτύου ή ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών ή μονοπατιών, η συνάρτηση κατακερματισμού μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα, ώστε να διατηρηθεί η ομοιόμορφη κατανομή των τμημάτων δεδομένων. Αυτή η προσαρμοστικότητα καθιστά την τμηματοποίηση με βάση τον κατακερματισμό κατάλληλη τεχνική για ασύρματα δίκτυα, όπου οι συνθήκες του δικτύου μπορεί να μεταβάλλονται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η απόδοση της τμηματοποίησης με βάση τον κατακερματισμό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή της συνάρτησης κατακερματισμού. Μια ανεπαρκής συνάρτηση κατακερματισμού μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη κατανομή των τμημάτων δεδομένων, με αποτέλεσμα τη συμφόρηση του δικτύου και τη μειωμένη απόδοση της μετάδοσης. Επομένως, η επιλογή μιας κατάλληλης συνάρτησης κατακερματισμού είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή της τμηματοποίησης με βάση τον κατακερματισμό σε ασύρματα δίκτυα.

Υπάρχουν αρκετές γνωστές συναρτήσεις και αλγόριθμοι τμηματοποίησης με βάση τον κατακερματισμό. Ορισμένες από τις πιο γνωστές συναρτήσεις και αλγόριθμους που βασίζονται σε κατακερματισμό περιλαμβάνουν:

- **Συνεπής κατακερματισμός (Consistent Hashing):** Ο συνεπής κατακερματισμός είναι μια δημοφιλής τεχνική που χρησιμοποιείται σε κατανεμημένα συστήματα για τη διανομή δεδομένων σε πολλαπλούς κόμβους με ισορροπημένο τρόπο. Ελαχιστοποιεί την ανάγκη αναδιοργάνωσης των δεδομένων όταν προστίθενται ή αφαιρούνται κόμβοι από το σύστημα. Ο συνεπής κατακερματισμός χρησιμοποιεί μια συνάρτηση κατακερματισμού για την αντιστοίχιση τόσο των τμημάτων δεδομένων όσο και των κόμβων σε έναν κυκλικό χώρο κλειδιών, γνωστό ως δακτύλιο κατακερματισμού. Τα τμήματα δεδομένων αντιστοιχίζονται στον πλησιέστερο κόμβο κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού στον δακτύλιο κατακερματισμού, εξασφαλίζοντας μια ομοιόμορφη κατανομή.

- **Hashing υψηλότερου τυχαίου βάρους (Rendezvous Hashing):** Το Rendezvous Hashing είναι μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την τμηματοποίηση δεδομένων και την εξισορρόπηση φορτίου σε κατανεμημένα συστήματα. Αναθέτει κάθε τμήμα δεδομένων σε έναν κόμβο υπολογίζοντας ένα βάρος για κάθε ζεύγος κόμβου-τμήματος δεδομένων χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση κατακερματισμού. Στη συνέχεια, το τμήμα δεδομένων ανατίθεται στον κόμβο με το μεγαλύτερο βάρος. Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει ομοιόμορφη κατανομή των τμημάτων δεδομένων στους κόμβους, διατηρώντας παράλληλα την ελάχιστη διαταραχή όταν προστίθενται ή αφαιρούνται κόμβοι.

5.1.2 Τμηματοποίηση με βάση το εύρος (Range Segmentation)

Η τμηματοποίηση βάσει εύρους είναι μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται για την τμηματοποίηση δεδομένων στο πλαίσιο της μετάδοσης ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει τη διαίρεση των δεδομένων σε τμήματα με βάση συγκεκριμένα εύρη τιμών, διασφαλίζοντας ότι κάθε τμήμα περιέχει στοιχεία δεδομένων που εμπίπτουν σε ένα προκαθορισμένο εύρος. Ο πρωταρχικός στόχος της τμηματοποίησης με βάση το εύρος τιμών είναι η ομαδοποίηση παρόμοιων στοιχείων δεδομένων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αποδοτικότερη μετάδοση και επεξεργασία των δεδομένων.

Στην τμηματοποίηση με βάση το εύρος, τα δεδομένα ταξινομούνται πρώτα με βάση ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ή μια βασική τιμή. Στη συνέχεια, τα ταξινομημένα δεδομένα χωρίζονται σε τμήματα σύμφωνα με προκαθορισμένα εύρη τιμών. Αυτά τα εύρη τιμών μπορούν να καθοριστούν με διάφορες τεχνικές, όπως η κατάτμηση ίσου πλάτους, η κατάτμηση ίσης συχνότητας ή η κατάτμηση με βάση την ομαδοποίηση.

- **Κατάτμηση ίσου πλάτους:** Σε αυτή τη μέθοδο, ολόκληρο το εύρος τιμών κλειδιών διαιρείται σε διαστήματα ίσου πλάτους και κάθε διάστημα αντιστοιχεί σε ένα τμήμα δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι τα τμήματα δεδομένων έχουν ομοιόμορφα εύρη τιμών, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε άνιση κατανομή των στοιχείων δεδομένων στα τμήματα, εάν τα δεδομένα δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα.
- **Κατάτμηση ίσης συχνότητας:** Αυτή η μέθοδος αποσκοπεί στη δημιουργία τμημάτων δεδομένων με ίσο αριθμό στοιχείων δεδομένων. Τα εύρη τιμών καθορίζονται με βάση την κατανομή των δεδομένων, διασφαλίζοντας ότι κάθε τμήμα περιέχει περίπου τον ίδιο αριθμό στοιχείων δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο ισορροπημένη κατανομή των στοιχείων δεδομένων στα τμήματα, αλλά τα εύρη τιμών μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των τμημάτων.
- **Κατάτμηση με βάση τη συσταδοποίηση:** Σε αυτή την τεχνική, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι ομαδοποίησης, όπως ο k-means ή η ιεραρχική ομαδοποίηση, για την ομαδοποίηση παρόμοιων στοιχείων δεδομένων με βάση τις βασικές τιμές τους. Οι προκύπτουσες συστάδες καθορίζουν τα εύρη τιμών για τα τμήματα δεδομένων. Αυτή η

προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματική μετάδοση και επεξεργασία των δεδομένων, καθώς παρόμοια στοιχεία δεδομένων είναι πιθανό να μεταδίδονται και να υποβάλλονται σε επεξεργασία μαζί.

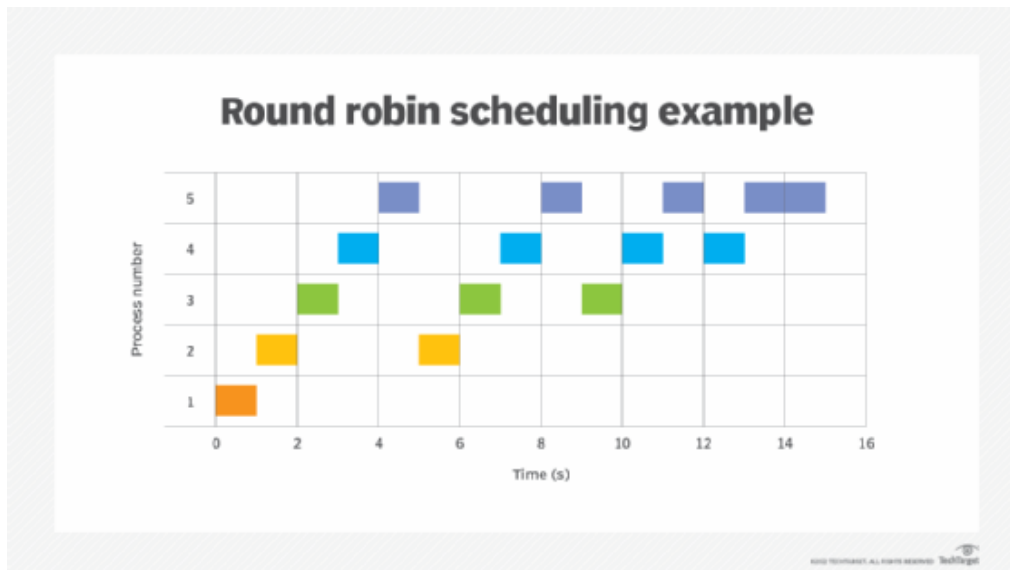
Μόλις δημιουργηθούν τα τμήματα δεδομένων με βάση την επιλεγμένη μέθοδο κατάτμησης, μπορούν να ανατεθούν σε διαφορετικά κανάλια ή διαδρομές στο ασύρματο δίκτυο για παράλληλη μετάδοση. Η κατανομή των τμημάτων δεδομένων σε κανάλια ή μονοπάτια μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες τεχνικές, όπως χρονοπρογραμματισμός Round-Robin, αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου ή αλγόριθμοι προσαρμοστικής δρομολόγησης.

Η τμηματοποίηση με βάση το εύρος προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα, όπως βελτιωμένη αποδοτικότητα μετάδοσης και μειωμένη επιβάρυνση επεξεργασίας, ιδίως όταν πρόκειται για δεδομένα που παρουσιάζουν συγκεκριμένα μοτίβα ή συσχετίσεις, έχουν δηλαδή κοινά χαρακτηριστικά. Με τον διαχωρισμό των δεδομένων με βάση συγκεκριμένα εύρη, υποσύνολα με παρόμοιες ιδιότητες μπορούν να μεταδοθούν μαζί, επιτρέποντας βελτιστοποιημένες στρατηγικές επεξεργασίας και μετάδοσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα επωφελές σε σενάρια όπου υποσύνολα δεδομένων απαιτούν ειδική επεξεργασία ή έχουν ξεχωριστές απαιτήσεις μετάδοσης. Επιπλέον αυτή η μέθοδος προσφέρει αυξημένη αποδοτικότητα και απόδοση, καθώς αξιοποιεί αποδοτικά τους πόρους του δικτύου και διευκολύνοντας την προσαρμογή του δικτύου στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και δυναμικές

5.1.3 Τμηματοποίηση Round-Robin (Round-Robin Segmentation)

Η τμηματοποίηση Round-Robin είναι μια απλή και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την τμηματοποίηση δεδομένων και την εξισορρόπηση φορτίου σε ασύρματα δίκτυα. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει τη διαίρεση των δεδομένων σε τμήματα ίσου μεγέθους και την ανάθεσή τους σε διαφορετικά κανάλια ή διαδρομές με κυκλικό τρόπο [56]. Ο πρωταρχικός στόχος της τμηματοποίησης Round-Robin είναι να εξασφαλιστεί μια δίκαιη και ισορροπημένη κατανομή των τμημάτων δεδομένων στους διαθέσιμους πόρους του δικτύου, που οδηγεί σε αποδοτική χρήση και βελτιωμένη απόδοση μετάδοσης.

Στην τμηματοποίηση round-robin, τα δεδομένα χωρίζονται πρώτα σε μικρότερα, ίσου μεγέθους τμήματα. Στη συνέχεια, τα τμήματα αυτά κατανέμονται στα διαθέσιμα κανάλια ή μονοπάτια με διαδοχική και κυκλική σειρά μέχρι να εκχωρηθούν όλα τα τμήματα δεδομένων σε ένα κανάλι ή μονοπάτι, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2. Αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει ότι κάθε κανάλι ή διαδρομή λαμβάνει ίσο αριθμό τμημάτων δεδομένων, με αποτέλεσμα την ισορροπημένη κατανομή του φορτίου δεδομένων. Αυτή η ισορροπημένη κατανομή φορτίου συμβάλλει στην πρόληψη της συμφόρησης και των σημείων συμφόρησης του δικτύου, οδηγώντας τελικά σε βελτιωμένη αποδοτικότητα μετάδοσης και μειωμένη καθυστέρηση.



Εικόνα 5.2 Τρόπος δρομολόγησης με Round-Robin τμηματοποίηση [57]

Ένα από τα πλεονεκτήματα της τμηματοποίησης Round-Robin είναι η απλότητα και η ευκολία υλοποίησής της. Σε αντίθεση με τις πιο σύνθετες τεχνικές τμηματοποίησης, το Round-Robin απαιτεί ελάχιστη υπολογιστική επιβάρυνση και μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί σε διάφορα περιβάλλοντα ασύρματων δικτύων. Η κυκλική κατανομή των υποσυνόλων δεδομένων διασφαλίζει ότι κάθε μονοπάτι μετάδοσης έχει ίσες ευκαιρίες να μεταδώσει δεδομένα, αποτρέποντας την υπερφόρτωση ή την υπολειτουργία οποιουδήποτε μονοπατιού.

Η τμηματοποίηση με κυκλική ροή προσφέρει εγγενείς δυνατότητες εξισορρόπησης φορτίου. Με την ομοιόμορφη κατανομή των υποσυνόλων δεδομένων στα μονοπάτια μετάδοσης, η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στην ομοιόμορφη κατανομή της κίνησης του δικτύου και στην αποφυγή συμφόρησης σε συγκεκριμένα μονοπάτια. Αυτή η ισορροπημένη κατανομή φορτίου συμβάλλει στη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου, μεγιστοποιώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης και ελαχιστοποιώντας τις καθυστερήσεις μετάδοσης. Ως αποτέλεσμα, η τμηματοποίηση Round-Robin μπορεί να βελτιώσει τη συνολική απόδοση μετάδοσης σε ασύρματα δίκτυα. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η τμηματοποίηση round-robin μπορεί να μην οδηγεί πάντα σε βέλτιστη απόδοση, ιδίως όταν πρόκειται για δεδομένα που παρουσιάζουν συγκεκριμένα μοτίβα ή συσχετίσεις.

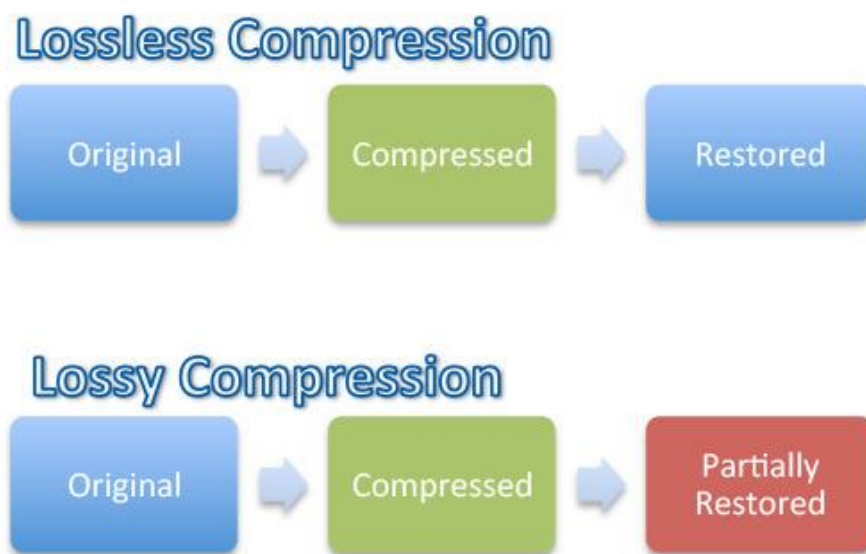
5.2 Τεχνικές συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων

Η αποτελεσματική μετάδοση μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα απαιτεί συχνά τη χρήση τεχνικών συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων για τη μείωση του μεγέθους των δεδομένων και την ενίσχυση της αξιοπιστίας τους κατά τη μετάδοση. Οι αλγόριθμοι συμπίεσης δεδομένων αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση του όγκου των δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν με την εξάλειψη του πλεονασμού και την εκμετάλλευση των προτύπων μέσα στα δεδομένα. Οι τεχνικές κωδικοποίησης, από την άλλη πλευρά, επικεντρώνονται στην προσθήκη πλεονασμού με ελεγχόμενο τρόπο για τη βελτίωση των δυνατοτήτων ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων κατά τη μετάδοση. Σε αυτή την ενότητα, θα διερευνήσουμε διάφορες τεχνικές συμπίεσης και

κωδικοποίησης δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα.

5.2.1 Αλγόριθμοι συμπίεσης δεδομένων χωρίς απώλειες

Η αποτελεσματική μετάδοση ΜΔ απαιτεί αποτελεσματική αξιοποίηση του περιορισμένου εύρους ζώνης και των πόρων. Οι αλγόριθμοι συμπίεσης χωρίς απώλειες είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές συμπίεσης δεδομένων που στοχεύουν στη μείωση του μεγέθους των δεδομένων χωρίς απώλεια πληροφοριών. Σε αντίθεση με τους αλγορίθμους συμπίεσης με απώλειες, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3, οι οποίοι θυσιάζουν κάποια ποιότητα δεδομένων για να επιτύχουν υψηλότερα ποσοστά συμπίεσης, οι αλγόριθμοι συμπίεσης χωρίς απώλειες διατηρούν ακριβώς τα αρχικά δεδομένα, επιτρέποντας την τέλεια ανακατασκευή κατά την αποσυμπίεση [58].



Εικόνα 5.3 Διαφορές συμπίεσης δεδομένων με και χωρίς απώλειες [59]

Οι αλγόριθμοι συμπίεσης χωρίς απώλειες εκμεταλλεύονται τους πλεονασμούς και τα μοτίβα μέσα στα δεδομένα για να επιτύχουν συμπίεση. Αυτοί οι πλεονασμοί μπορεί να είναι διαφόρων τύπων, όπως χωρικοί, χρονικοί ή στατιστικοί. Εντοπίζοντας και εξαλείφοντας αυτούς τους πλεονασμούς, οι αλγόριθμοι συμπίεσης χωρίς απώλειες μειώνουν τον όγκο των δεδομένων που πρέπει να αποθηκευτούν ή να μεταδοθούν, με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη διαχείριση των δεδομένων [60]. Στην παρούσα ενότητα, διερευνώνται τέσσερις αλγόριθμοι συμπίεσης δεδομένων χωρίς απώλειες - τον LZW (Lempel-Ziv-Welch), την κωδικοποίηση Huffman, τον μετασχηματισμό Burrows-Wheeler (BWT) και την κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης (RLE) .

- **Αλγόριθμος Lempel-Ziv-Welch (LZW):**

Ο αλγόριθμος Lempel-Ziv-Welch (LZW) είναι γνωστός για την ικανότητά του να συμπιέζει αποτελεσματικά δεδομένα με επαναλαμβανόμενα μοτίβα. Επιτυγχάνει τη συμπίεση με τη δυναμική δημιουργία ενός λεξικού των συχνά εμφανιζόμενων ακολουθιών στη ροή δεδομένων. Όταν συναντάται ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο, ο LZW το αντικαθιστά με μια συντομότερη κωδική λέξη από το λεξικό. Με τη συνεχή ενημέρωση και επέκταση του λεξικού καθώς συναντά νέα μοτίβα, το LZW επιτυγχάνει υψηλότερα ποσοστά συμπίεσης. Στο πλαίσιο της αποδοτικής

μετάδοσης μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα, η LZW συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του όγκου των δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν, μειώνοντας την επιβάρυνση των πόρων του δικτύου και επιτρέποντας την ταχύτερη μετάδοση.

- **Κωδικοποίηση Huffman:**

Η κωδικοποίηση Huffman είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος για τη συμπίεση δεδομένων, ιδίως σε σενάρια όπου τα δεδομένα έχουν μεταβλητή συχνότητα εμφάνισης. Λειτουργεί με βάση την αρχή της ανάθεσης μικρότερων κωδικών λέξεων σε πιο συχνά σύμβολα και μεγαλύτερων κωδικών λέξεων σε λιγότερο συχνά σύμβολα. Η κωδικοποίηση Huffman κατασκευάζει έναν βέλτιστο κώδικα χωρίς πρόθεμα, όπου καμία κωδική λέξη δεν είναι πρόθεμα μιας άλλης κωδικής λέξης, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση. Στο πλαίσιο των ασύρματων δικτύων και της μετάδοσης μεγάλων δεδομένων, η κωδικοποίηση Huffman βελτιστοποιεί τη χρήση του περιορισμένου εύρους ζώνης αναπαριστώντας συχνά εμφανιζόμενα σύμβολα με μικρότερες κωδικολέξεις, με αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους των δεδομένων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας της μετάδοσης.

- **Μετασχηματισμός Burrows-Wheeler (BWT):**

Ο μετασχηματισμός Burrows-Wheeler (BWT) είναι μια αντιστρεπτή τεχνική μετασχηματισμού δεδομένων που αναδιατάσσει τους χαρακτήρες σε μια ροή δεδομένων για να εκμεταλλευτεί τους πλεονασμούς και να βελτιώσει τη συμπίεστικότητα. Ο BWT αναδιοργανώνει τα δεδομένα ταξινομώντας τα σε μια συγκεκριμένη σειρά με βάση τις περιστροφές της αρχικής συμβολοσειράς δεδομένων. Αυτή η αναδιάταξη έχει ως αποτέλεσμα διαδοχικές εμφανίσεις παρόμοιων χαρακτήρων, διευκολύνοντας την εφαρμογή περαιτέρω τεχνικών συμπίεσης. Αξιοποιώντας τα εγγενή μοτίβα και τις επαναλήψεις στα δεδομένα, η BWT μπορεί να μειώσει σημαντικά το μέγεθος των μεγάλων δεδομένων για αποδοτικότερη μετάδοση σε ασύρματα δίκτυα. Τα μετασχηματισμένα δεδομένα διατηρούν όλες τις αρχικές πληροφορίες και μπορούν να ανακατασκευαστούν στην αρχική τους μορφή.

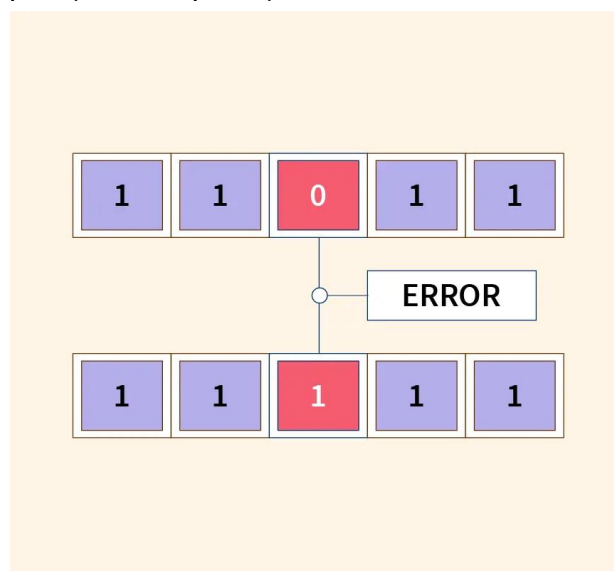
- **Κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης (Run-Length Encoding - RLE):**

Η κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης (RLE) είναι μια απλή αλλά αποτελεσματική τεχνική συμπίεσης που αντικαθιστά τις διαδοχικές εμφανίσεις του ίδιου συμβόλου με μια μέτρηση και το ίδιο το σύμβολο. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν πρόκειται για μεγάλες σειρές πανομοιότυπων συμβόλων, οι οποίες εμφανίζονται συχνά σε διάφορους τύπους δεδομένων. Η RLE εξαλείφει τον πλεονασμό αναπαριστώντας συνοπτικά τα επαναλαμβανόμενα σύμβολα, με αποτέλεσμα μικρότερο μέγεθος δεδομένων. Στο πλαίσιο της μετάδοσης μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα, η RLE χρησιμεύει ως πολύτιμο συστατικό της διαδικασίας συμπίεσης. Μειώνοντας τον αριθμό των συμβόλων που πρέπει να μεταδοθούν, η RLE ελαχιστοποιεί το συνολικό μέγεθος των δεδομένων και συμβάλλει στην αποδοτικότερη χρήση των πόρων του δικτύου.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται μαζί, ο μετασχηματισμός Burrows-Wheeler (BWT) και η κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης (RLE) αποτελούν έναν ισχυρό συνδυασμό για τη συμπίεση δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Ο BWT αναδιοργανώνει τα δεδομένα για να βελτιώσει τη συμπίεστικότητα ομαδοποιώντας παρόμοιους χαρακτήρες μαζί, ενώ ο RLE αναπαριστά αποτελεσματικά τις διαδοχικές επαναλήψεις του ίδιου συμβόλου. Αυτή η κοινή προσέγγιση επιτυγχάνει σημαντικά κέρδη συμπίεσης για μεγάλα δεδομένα, επιτρέποντας την αποδοτικότερη μετάδοση μέσω ασύρματων δικτύων. Μειώνοντας το μέγεθος των δεδομένων, διατηρώντας παράλληλα την ακεραιότητά τους, οι BWT και RLE συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της χρήσης του εύρους ζώνης, στη μείωση του χρόνου μετάδοσης και στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης κατά τη μετάδοση μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα.

5.2.2 Κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων

Οι κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων είναι μαθηματικοί αλγόριθμοι ή σχήματα που έχουν σχεδιαστεί για την ανίχνευση και τη διόρθωση σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν κατά τη μετάδοση ή την αποθήκευση δεδομένων. Σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας, όπως τα ασύρματα δίκτυα, τα σφάλματα μπορούν να εισαχθούν λόγω παραγόντων όπως ο θόρυβος, οι παρεμβολές, η εξασθένηση ή η παραμόρφωση. Αυτοί οι κώδικες ενισχύουν την αξιοπιστία και την ακεραιότητα των δεδομένων με την εισαγωγή πλεονασμού, ο οποίος περιλαμβάνει την προσθήκη επιπλέον bits ή συμβόλων στα αρχικά δεδομένα [61]. Με την ενσωμάτωση πρόσθετων πληροφοριών, οι κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων επιτρέπουν στο δέκτη να επαληθεύει την ακρίβεια των λαμβανόμενων δεδομένων και να ανακτήσει τις αρχικές πληροφορίες σε περίπτωση εντοπισμού σφαλμάτων, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4. Παρέχοντας ισχυρούς μηχανισμούς ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων, οι κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων επιτρέπουν την αποτελεσματική και αξιόπιστη επικοινωνία, αποθήκευση και μετάδοση δεδομένων.



Εικόνα 5.4 Ανίχνευση bit σφάλματος με τους κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων [62]

Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται οι κώδικες Hamming, Reed-Solomon και Low-Density Parity-Check (LDPC):

- **Κώδικες Hamming:**

Οι κώδικες Hamming χρησιμοποιούνται ευρέως σε ασύρματα δίκτυα για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική μετάδοση ΜΔ. Αυτοί οι κωδικοί διόρθωσης σφαλμάτων επιτρέπουν τον εντοπισμό και τη διόρθωση σφαλμάτων ενός bit, τα οποία είναι κοινά στην ασύρματη επικοινωνία λόγω θορύβου, παρεμβολών και άλλων βλαβών καναλιών. Προσθέτοντας πλεονάζοντα bit ισοτιμίας στα μεταδιδόμενα δεδομένα, οι κώδικες Hamming ενισχύουν την ακεραιότητα των δεδομένων και ελαχιστοποιούν τον αντίκτυπο των σφαλμάτων κατά τη μετάδοση. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι μεγάλοι όγκοι δεδομένων λαμβάνονται με ακρίβεια, μειώνοντας την ανάγκη για αναμετάδοση και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση μετάδοσης.

- **Κώδικες Reed-Solomon:**

Οι συγκεκριμένοι κώδικες έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να χειρίζονται τόσο σφάλματα ριπής όσο και τυχαία σφάλματα που μπορεί να προκύψουν κατά την ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Τα σφάλματα ριπής, που συμβαίνουν σε συμπλέγματα, μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιζήμια για την ακεραιότητα των δεδομένων. Ενσωματώνοντας τους κώδικες Reed-Solomon στη διαδικασία μετάδοσης, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να ανιχνεύσουν και να διορθώσουν αποτελεσματικά σφάλματα σε καθορισμένες αποστάσεις κώδικα. Αυτή η δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές ΜΔ, καθώς επιτρέπει την αξιόπιστη μετάδοση μεγάλων συνόλων δεδομένων μετριάζοντας τον αντίκτυπο των σφαλμάτων, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα των μεταδιδόμενων δεδομένων και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση μετάδοσης.

- **Κώδικες ελέγχου ισοτιμίας χαμηλής πυκνότητας (LDPC):**

Οι κώδικες LDPC προσφέρουν εξαιρετικές δυνατότητες διόρθωσης σφαλμάτων και αποτελεσματικούς αλγόριθμους αποκωδικοποίησης, καθιστώντας τους εξαιρετικά κατάλληλους για το χειρισμό μεγάλων όγκων δεδομένων. Οι κώδικες LDPC κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας αραιούς πίνακες ελέγχου ισοτιμίας και χρησιμοποιούν επαναληπτικούς αλγόριθμους αποκωδικοποίησης, όπως η διάδοση πεποιθήσεων. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική διόρθωση σφαλμάτων διατηρώντας παράλληλα χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Αξιοποιώντας τους κωδικούς LDPC, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να επιτύχουν ισχυρή διόρθωση σφαλμάτων, διασφαλίζοντας αξιόπιστη μετάδοση ΜΔ. Το υψηλό κέρδος κωδικοποίησης και η σχεδόν βέλτιστη απόδοση διόρθωσης σφαλμάτων των κωδικών LDPC συμβάλλουν στη βελτιωμένη απόδοση μετάδοσης και στη βελτιωμένη συνολική απόδοση στα ασύρματα δίκτυα.

5.3 Στρατηγικές κατανεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης

Οι στρατηγικές κατανεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτιστοποίηση της μετάδοσης ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα. Αυτές οι στρατηγικές στοχεύουν στη μείωση του όγκου των δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν μέσω του δικτύου αποθηκεύοντας προσωρινά τα δεδομένα σε κόμβους πιο κοντά στους τελικούς χρήστες ή σε στρατηγικές τοποθεσίες εντός του δικτύου. Ελαχιστοποιώντας την απόσταση που χρειάζονται για να διανύσουν τα δεδομένα, αυτές οι στρατηγικές μπορούν να μειώσουν σημαντικά την καθυστέρηση μετάδοσης, να βελτιώσουν τη χρήση των πόρων του δικτύου και να βελτιώσουν τη συνολική εμπειρία χρήστη. Σε αυτήν την ενότητα, θα παρουσιαστούν διάφορες στρατηγικές κατανεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας αντιγράφων δεδομένων, της προσωρινής αποθήκευσης σε σταθμούς βάσης ή συσκευών ακμής, της αποθήκευσης με επίκεντρο το περιεχόμενο και της συνεργατικής προσωρινής αποθήκευσης.

5.3.1 Δημιουργία αντιγράφων δεδομένων

Η αναπαραγωγή δεδομένων είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας των δεδομένων σε κατανεμημένα συστήματα με τη δημιουργία πολλαπλών αντιγράφων των δεδομένων και την αποθήκευσή τους σε διαφορετικούς κόμβους ή συσκευές εντός του δικτύου. Στο πλαίσιο της μετάδοσης ΜΔ, η αναπαραγωγή δεδομένων μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του χρόνου μετάδοσης επιτρέποντας στους χρήστες να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα από έναν κοντινό κόμβο ή συσκευή, αντί να τα ανακτούν από έναν απομακρυσμένο διακομιστή [63]. Επιπλέον, η δημιουργία αντιγράφων δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την ανοχή σφαλμάτων του συστήματος, καθώς οι χρήστες εξακολουθούν να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα ακόμα κι αν ένα από τα αντίγραφα δεν είναι διαθέσιμο λόγω αστοχιών δικτύου ή άλλων προβλημάτων. Υπάρχουν οι παρακάτω μέθοδοι δημιουργίας αντιγράφων:

- **Πλήρης αντιγραφή δεδομένων:** Κατά την πλήρη αντιγραφή δεδομένων, κάθε κόμβος ή συσκευή στο δίκτυο αποθηκεύει ένα πλήρες αντίγραφο των δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει υψηλή διαθεσιμότητα δεδομένων και χαμηλό λανθάνοντα χρόνο πρόσβασης, καθώς οι χρήστες μπορούν πάντα να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα από τον πλησιέστερο κόμβο. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος μπορεί να απαιτεί πόρους, καθώς απαιτεί μεγάλο χώρο αποθήκευσης και μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη κίνηση δικτύου λόγω της ανάγκης συγχρονισμού των αντιγράφων.
- **Μερική αντιγραφή δεδομένων:** Η μερική αντιγραφή δεδομένων περιλαμβάνει την αποθήκευση μόνο ενός υποσυνόλου δεδομένων σε κάθε κόμβο ή συσκευή στο δίκτυο. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να βοηθήσει στην εξισορρόπηση της αντιστάθμισης μεταξύ της διαθεσιμότητας δεδομένων και της χρήσης πόρων. Η μερική αντιγραφή δεδομένων μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες στρατηγικές, όπως η κατάτμηση των δεδομένων

βρίσκονται σε κοντινή γεωγραφική εγγύτητα. Με την αποθήκευση αυτών των στοιχείων δεδομένων σε σταθμούς βάσης ή ακραίες συσκευές, τα επόμενα αιτήματα για τα ίδια δεδομένα μπορούν να εξυπηρετηθούν τοπικά, μειώνοντας σημαντικά τη χρήση του λανθάνοντος χρόνου και του εύρους ζώνης.

Οι σταθμοί βάσης έχουν συνήθως περισσότερες δυνατότητες αποθήκευσης και επεξεργασίας σε σύγκριση με μεμονωμένες συσκευές χρήστη, γεγονός που τους καθιστά ιδανικές τοποθεσίες για την προσωρινή αποθήκευση δεδομένων. Επιπλέον, οι σταθμοί βάσης συνδέονται συνήθως στο κεντρικό δίκτυο μέσω ενσύρματων συνδέσεων υψηλής χωρητικότητας, επιτρέποντάς τους να ανακτούν και να ενημερώνουν τα αποθηκευμένα δεδομένα γρήγορα και αποτελεσματικά. Οι Edge συσκευές, από την άλλη πλευρά, αναφέρονται σε οποιεσδήποτε συσκευές χρησιμεύουν ως σημείο εισόδου στο κεντρικό δίκτυο. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν δρομολογητές, διακόπτες, πύλες, ακόμη και συσκευές χρήστη, όπως smartphone και συσκευές IoT. Η προσωρινή αποθήκευση σε συσκευές άκρης μπορεί να είναι ιδιαίτερα επωφελής σε σενάρια όπου οι χρήστες είναι κινητοί ή όταν χρειάζεται πρόσβαση στα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, όπως σε αυτόνομα οχήματα ή σε εφαρμογές παιχνιδιών σε πραγματικό χρόνο.

Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές για την κατηγοριοποίηση και λήψη απόφασης για προσωρινή αποθήκευση των δεδομένων σε σταθμούς βάσης ή συσκευές άκρων και παρουσιάζονται παρακάτω:

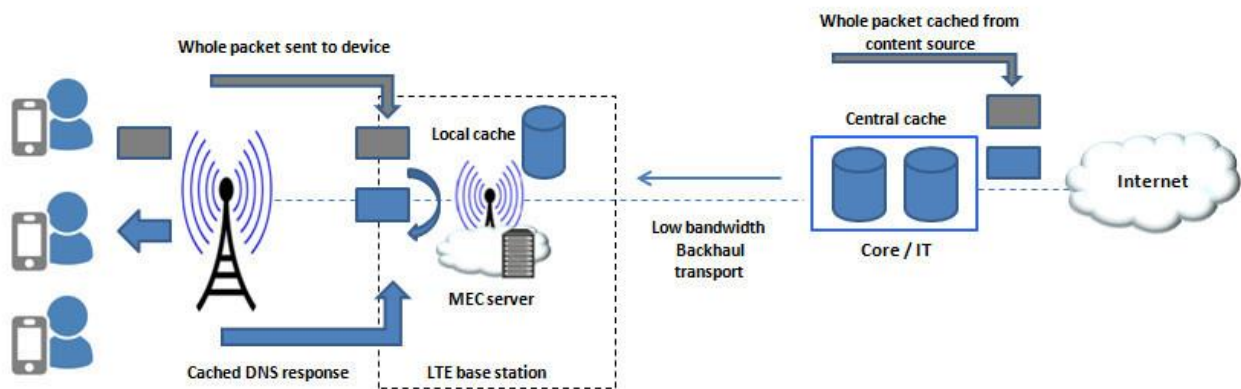
- **Προσωρινή αποθήκευση βάσει δημοτικότητα (Popularity-based Caching):** Σε αυτήν την προσέγγιση, τα στοιχεία δεδομένων που ζητούνται πιο συχνά αποθηκεύονται στην κρυφή μνήμη. Η δημοτικότητα των στοιχείων δεδομένων μπορεί να προσδιοριστεί με βάση τα ιστορικά μοτίβα πρόσβασης ή να προβλεφθεί χρησιμοποιώντας αλγόριθμους μηχανικής εκμάθησης.
- **Χρονικά ευαίσθητη προσωρινή αποθήκευση (Time-sensitive Caching):** Αυτή η στρατηγική περιλαμβάνει αποθήκευση δεδομένων που είναι ευαίσθητα στον χρόνο, όπως αποτελέσματα ζωντανών αθλητικών ή τιμές χρηματιστηρίου. Αποθηκεύοντας προσωρινά αυτά τα δεδομένα σε σταθμούς βάσης ή συσκευές άκρων, οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στις πιο πρόσφατες πληροφορίες με ελάχιστο λανθάνοντα χρόνο.
- **Προγνωστική προσωρινή αποθήκευση (Predictive Caching):** Η προγνωστική αποθήκευση στην κρυφή μνήμη περιλαμβάνει την πρόβλεψη μελλοντικών αιτημάτων δεδομένων βάσει ιστορικών μοτίβων πρόσβασης ή άλλων παρόμοιων πληροφοριών και την εκ των προτέρων αποθήκευση των προβλεπόμενων δεδομένων. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γίνουν αυτές οι προβλέψεις με υψηλή ακρίβεια.

5.3.3 Αποθήκευση με επίκεντρο το περιεχόμενο

Η αποθήκευση με επίκεντρο το περιεχόμενο είναι μια σύγχρονη προσέγγιση αποθήκευσης και ανάκτησης δεδομένων που εστιάζει στο ίδιο το περιεχόμενο και όχι στην τοποθεσία του [66]. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για ασύρματα δίκτυα, όπου η θέση των δεδομένων μπορεί

να αλλάξει δυναμικά λόγω της κινητικότητας των χρηστών, των αλλαγών της τοπολογίας του δικτύου ή άλλων παραγόντων. Στην αποθήκευση με επίκεντρο το περιεχόμενο, τα στοιχεία δεδομένων αναγνωρίζονται και ανακτώνται με βάση το περιεχόμενό τους ή τα μεταδεδομένα τους και όχι τη φυσική τους θέση στο δίκτυο. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την πιο αποτελεσματική ανάκτηση και μετάδοση δεδομένων, καθώς οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα από την πλησιέστερη διαθέσιμη πηγή, ανεξάρτητα από την τοποθεσία τους. Ένα παράδειγμα αυτής της αρχιτεκτονικής παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.6.

Σε αυτήν την ενότητα, θα παρουσιαστούν συνοπτικά διάφορες τεχνικές και μεθοδολογίες που σχετίζονται με την αποθήκευση με επίκεντρο το περιεχόμενο, όπως το Content-Centric Networking (CCN), την Epidemic Routing, το Distributed Hash Table (DHT) Caching και το Information-Centric Networking (ICN).



Εικόνα 5.6 Αρχιτεκτονική προσωρινής αποθήκευσης με βάση το περιεχόμενο (CDN) [67]

• Content-Centric Networking (CCN)

Το Content-Centric Networking (CCN) είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου που δίνει έμφαση στο περιεχόμενο καθιστώντας το άμεσα διευθυνσιοδοτούμενο και δρομολογήσιμο. Στο CCN, τα πακέτα δεδομένων ονομάζονται χρησιμοποιώντας ιεραρχικά δομημένα αναγνωριστικά μεταβλητού μήκους (HSVLI). Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές διευθύνσεις IP, οι οποίες προσδιορίζουν τα τελικά σημεία επικοινωνίας, τα HSVLI στο CCN προσδιορίζουν το ίδιο το περιεχόμενο. Αυτό επιτρέπει την αποθήκευση και ανάκτηση ενός τμήματος περιεχομένου από οπουδήποτε εντός του δικτύου, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα της διανομής δεδομένων, ειδικά για δημοφιλές περιεχόμενο.

• Epidemic Routing

Η μέθοδος Epidemic Routing είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται σε δίκτυα με ανοχή καθυστέρησης όπου δεν υπάρχει εγγύηση για μια πλήρη διαδρομή από την πηγή στον προορισμό. Βασίζεται στις αρχές των επιδημικών αλγορίθμων ή των πρωτοκόλλων κουτσομπολιού. Όταν δύο κόμβοι έρχονται σε επαφή, ανταλλάσσουν τις περιλήψεις του αποθηκευμένου περιεχομένου τους. Εάν ένας κόμβος ανακαλύψει ότι ο άλλος κόμβος έχει περιεχόμενο, δεν έχει, ανακτά αυτό το περιεχόμενο. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στο περιεχόμενο να εξαπλωθεί σε όλο το δίκτυο, όπως

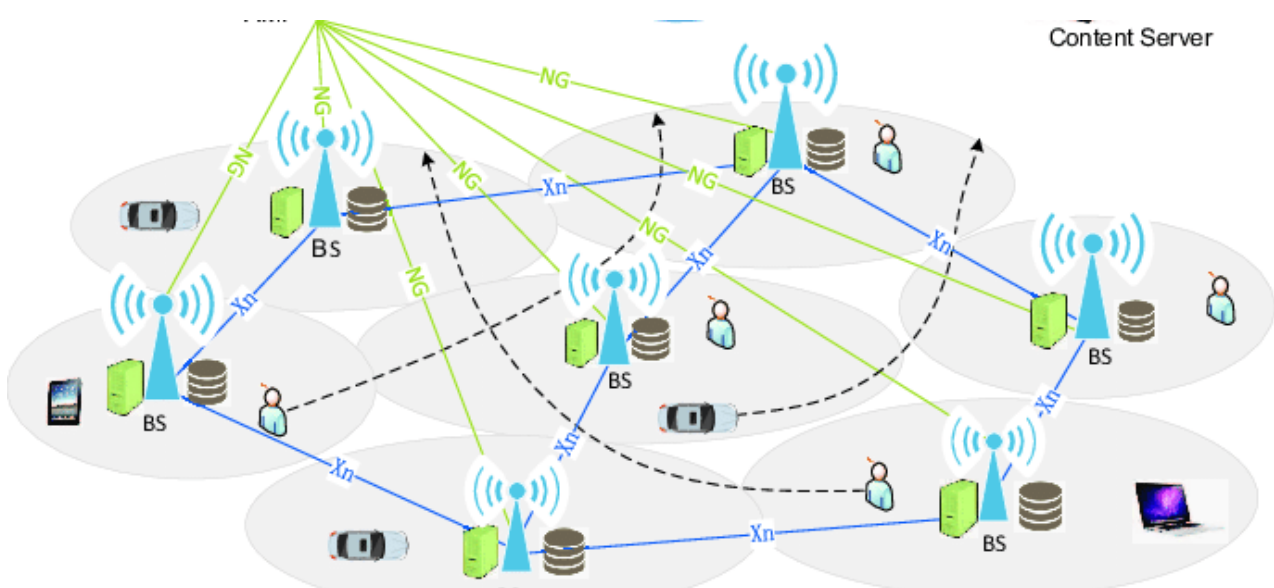
ένας ιός σε μια επιδημία, διασφαλίζοντας υψηλή διαθεσιμότητα δεδομένων ακόμη και σε δίκτυα υψηλής δυναμικής και διαμερισμάτων.

- **Προσωρινή αποθήκευση βάσει κατανεμημένου πίνακα κατακερματισμού (DHT Caching).**

Η προσωρινή αποθήκευση βάσει κατανεμημένου πίνακα κατακερματισμού (Dynamic Hash Table - DHT) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική ανάκτηση δεδομένων σε δίκτυα peer-to-peer. Στην προσωρινή αποθήκευση βάσει DHT, μια συνάρτηση κατακερματισμού χρησιμοποιείται για την εκχώρηση ενός μοναδικού αναγνωριστικού σε κάθε στοιχείο δεδομένων και αυτό το αναγνωριστικό καθορίζει πού αποθηκεύεται το στοιχείο δεδομένων στο δίκτυο. Η προσωρινή αποθήκευση βάσει DHT επιτρέπει την αποτελεσματική αποθήκευση με επίκεντρο το περιεχόμενο, επιτρέποντας την ανάκτηση στοιχείων δεδομένων με βάση τα αναγνωριστικά τους, ανεξάρτητα από τη φυσική τους

5.3.4 Συνεργατική προσωρινή αποθήκευση

Η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση (Cooperative Caching) είναι μια στρατηγική κατανεμημένης προσωρινής αποθήκευσης που επιτρέπει σε πολλούς κόμβους ή συσκευές εντός του δικτύου να συνεργάζονται και να μοιράζονται τα αποθηκευμένα δεδομένα τους μεταξύ τους [68]. Αυτή η στρατηγική είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στα ασύρματα δίκτυα, όπου οι διαθέσιμοι πόροι, όπως το εύρος ζώνης και η αποθήκευση, είναι συνήθως περιορισμένοι και πρέπει να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά. Ένα παράδειγμα αρχιτεκτονικής μια τέτοιας περίπτωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.7. Στη συνεργατική προσωρινή αποθήκευση, όταν ένας χρήστης ζητά ένα στοιχείο δεδομένων που δεν είναι διαθέσιμο στην τοπική κρυφή μνήμη, το αίτημα προωθείται σε γειτονικούς κόμβους ή συσκευές που ενδέχεται να έχουν τα ζητούμενα δεδομένα στη κρυφή μνήμη τους. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να μειώσει σημαντικά τον όγκο των δεδομένων που πρέπει



Εικόνα 5.7 Αρχιτεκτονική συνεργατικής προσωρινής αποθήκευσης σε ένα δίκτυο τηλεφώνου [69]

να μεταδοθούν μέσω του δικτύου, καθώς οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα από κοντινές κρυφές μνήμες αντί να τα ανακτούν από απομακρυσμένους διακομιστές.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές συνεργατικές στρατηγικές προσωρινής αποθήκευσης σε ασύρματα δίκτυα, ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, τη συμπεριφορά των χρηστών και τα πρότυπα πρόσβασης δεδομένων. Μερικές δημοφιλείς στρατηγικές συνεργατικής προσωρινής αποθήκευσης παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Προσωρινή αποθήκευση γειτόνων (Neighbor caching):** Σε αυτήν την προσέγγιση, κάθε κόμβος ή συσκευή διατηρεί μια λίστα με τους γειτονικούς κόμβους ή συσκευές και τα αποθηκευμένα στοιχεία δεδομένων τους. Όταν ένας χρήστης ζητά ένα στοιχείο δεδομένων, ο κόμβος ελέγχει πρώτα την τοπική του κρυφή μνήμη. Εάν το στοιχείο δεδομένων δεν είναι διαθέσιμο, ρωτά τους γείτονές του για να δει εάν έχουν τα ζητούμενα δεδομένα στις κρυφές μνήμες τους.
- **Προσωρινή αποθήκευση διαδρομής κρυφής μνήμη (Cache Path Caching):** Αυτή η στρατηγική περιλαμβάνει την προσωρινή αποθήκευση των διαδρομών προς τα αποθηκευμένα στοιχεία δεδομένων, αντί των ίδιων των στοιχείων δεδομένων. Όταν ένας χρήστης ζητά ένα στοιχείο δεδομένων, ο κόμβος ελέγχει την τοπική κρυφή μνήμη για τη διαδρομή προς το στοιχείο δεδομένων. Εάν η διαδρομή είναι διαθέσιμη, ο κόμβος μπορεί να ανακτήσει το στοιχείο δεδομένων από τον κόμβο στο τέλος της διαδρομής.
- **Προσωρινή αποθήκευση σύνοψης (Summary Caching):** Στην προσωρινή αποθήκευση σύνοψης, κάθε κόμβος ή συσκευή διατηρεί μια σύνοψη των αποθηκευμένων στοιχείων δεδομένων του και μοιράζεται αυτήν τη σύνοψη με τους γείτονές του. Όταν ένας χρήστης ζητά ένα στοιχείο δεδομένων, ο κόμβος ελέγχει την τοπική του κρυφή μνήμη και τις περιλήψεις της κρυφής μνήμης των γειτόνων του για να βρει τα ζητούμενα δεδομένα.
- **Συνεργατικές ζώνες προσωρινής αποθήκευσης (Zone Cooperative Caching):** Σε αυτή την προσέγγιση, το δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες και κάθε ζώνη έχει έναν καθορισμένο κόμβο ή συσκευή που συντονίζει τις δραστηριότητες αποθήκευσης στην κρυφή μνήμη εντός της ζώνης. Όταν ένας χρήστης ζητά ένα στοιχείο δεδομένων, το αίτημα προωθείται στον συντονιστή ζώνης, ο οποίος ελέγχει τις τοπικές κρυφές μνήμες όλων των κόμβων ή συσκευών στη ζώνη για να βρει τα ζητούμενα δεδομένα.

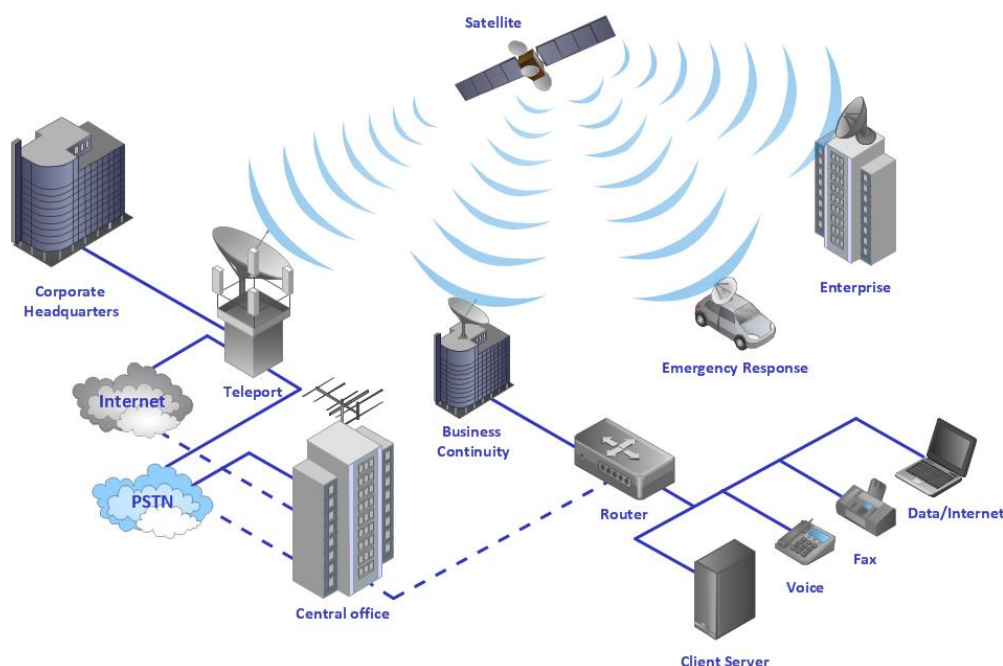
Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μειωμένη κίνηση δικτύου, η βελτιωμένη προσβασιμότητα δεδομένων και η βελτιωμένη απόδοση δικτύου. Ωστόσο, παρουσιάζει επίσης αρκετές προκλήσεις, όπως η διατήρηση της συνέπειας της κρυφής μνήμης και η διαχείριση της προσωρινής μνήμης

5.4 Υβριδικές λύσεις ενσύρματου-ασύρματου δικτύου

Οι λύσεις υβριδικού ενσύρματου-ασύρματου δικτύου συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα τόσο των ενσύρματων όσο και των ασύρματων δικτύων για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης ΜΔ. Αυτές οι λύσεις ενσύρματων δικτύων για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ χρησιμοποιούν την ευελιξία και την κινητικότητα των ασύρματων δικτύων για συνδεσιμότητα τελευταίου μιλίου. Με την ενσωμάτωση ενσύρματων και ασύρματων τεχνολογιών, οι λύσεις υβριδικού δικτύου μπορούν να παρέχουν βελτιωμένη απόδοση, μειωμένο λανθάνον χρόνο και βελτιωμένη επεκτασιμότητα για τη μετάδοση ΜΔ. Σε αυτήν την ενότητα, θα εξερευνήσουμε διάφορες μεθοδολογίες υβριδικού δικτύου, όπως η υβριδική δρομολόγηση, η υβριδική αυτόματη επανάληψη αιτήματος (HARQ), η δυναμική επιλογή δικτύου (DNS) και η μετάδοση πολλαπλών διαδρομών.

5.4.1 Υβριδική δρομολόγηση

Η υβριδική δρομολόγηση σε ασύρματα δίκτυα αναφέρεται σε μια προσέγγιση δρομολόγησης που συνδυάζει τη χρήση τόσο ενσύρματων όσο και ασύρματων συνδέσεων για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων. Αξιοποιεί τα δυνατά σημεία και των δύο τύπων δικτύων για την επίτευξη αποτελεσματικής και αξιόπιστης δρομολόγησης δεδομένων. Στην υβριδική δρομολόγηση, η υποδομή δικτύου αποτελείται από έναν συνδυασμό ενσύρματων συνδέσεων, όπως καλώδια οπτικών ινών, και ασύρματων συνδέσεων, όπως Wi-Fi ή κυψελοειδών δικτύων.



Εικόνα 5.8 Υβριδική δρομολόγηση για μεταφορά δεδομένων [70]

Η κύρια ιδέα πίσω από την υβριδική δρομολόγηση είναι η χρήση ενσύρματων συνδέσεων για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις, όπου προσφέρουν υψηλή χωρητικότητα και αξιοπιστία, ενώ

χρησιμοποιούνται ασύρματες συνδέσεις για συνδεσιμότητα τελευταίου μιλίου, παρέχοντας ευελιξία και κινητικότητα. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου και τη βελτιωμένη απόδοση. Οι υβριδικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η ποιότητα σύνδεσης, το διαθέσιμο εύρος ζώνης και η συμφόρηση δικτύου για να επιλέξουν δυναμικά την καταλληλότερη διαδρομή για τη μετάδοση δεδομένων. Με την έξυπνη δρομολόγηση δεδομένων μέσω του βέλτιστου συνδυασμού ενσύρματων και ασύρματων συνδέσεων, η υβριδική δρομολόγηση ενισχύει τη συνολική απόδοση, αξιοπιστία και επεκτασιμότητα της μετάδοσης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα.

Η υβριδική δρομολόγηση επηρεάζει σημαντικά τη μετάδοση ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση πόρων, την εξισορρόπηση φορτίου, τη βελτιωμένη αξιοπιστία και ανοχή σφαλμάτων, την προσαρμοστικότητα στις συνθήκες δικτύου και τη βελτιστοποίηση της Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS). Επιλέγοντας δυναμικά την καταλληλότερη διαδρομή με βάση τις συνθήκες δικτύου και τα χαρακτηριστικά δεδομένων, η υβριδική δρομολόγηση εξασφαλίζει αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου, εξισορροπεί το φορτίο στο δίκτυο, ενισχύει την αξιοπιστία και την ανοχή σφαλμάτων, προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου και βελτιστοποιεί τις παραμέτρους QoS. Αυτά τα οφέλη συμβάλλουν συλλογικά στην αποτελεσματική και επιτυχημένη μετάδοση Big Data σε ασύρματα δίκτυα.

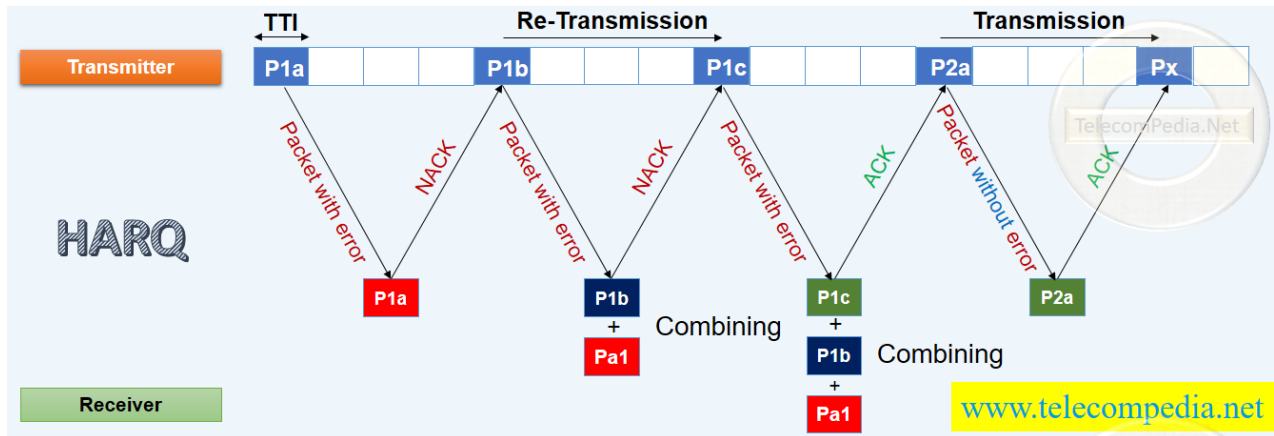
5.4.2 Υβριδικό αυτόματο αίτημα επανάληψης

Η μέθοδος του υβριδικού αυτόματου αιτήματος επανάληψης (Hybrid Automatic Repeat Request - HARQ) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε ασύρματα δίκτυα για τη βελτίωση της αξιοπιστίας της μετάδοσης δεδομένων [71]. Το HARQ συνδυάζει τα χαρακτηριστικά της κωδικοποίησης Automatic Repeat Request (ARQ) και Forward Error Correction (FEC) για να βελτιώσει τις δυνατότητες ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων. Η μέθοδος λειτουργίας του HARQ παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.9.

Στο HARQ, οι κωδικοί FEC χρησιμοποιούνται για να προσθέσουν πλεονασμό στα μεταδιδόμενα δεδομένα, επιτρέποντας τον εντοπισμό και τη διόρθωση σφαλμάτων στον δέκτη. Εάν εντοπιστούν σφάλματα και δεν μπορούν να διορθωθούν μόνο από τους κωδικούς FEC, ο δέκτης στέλνει αίτημα για αναμετάδοση στον αποστολέα χρησιμοποιώντας το ARQ. Στη συνέχεια, ο αποστολέας αναμεταδίδει τα ζητούμενα δεδομένα, παρέχοντας την ευκαιρία στον παραλήπτη να λάβει τα σωστά δεδομένα και να ανακτήσει από τα σφάλματα. Αυτή η διαδικασία συνδυασμού κωδικοποίησης FEC και ARQ επιτρέπει στο HARQ να επιτύχει υψηλότερη αξιοπιστία και βελτιωμένη απόδοση σε ασύρματα δίκτυα, όπου τα σφάλματα και η εξασθένηση του σήματος είναι κοινά.

Το HARQ προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στα ασύρματα δίκτυα. Βελτιώνει τη συνολική αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων παρέχοντας μηχανισμούς ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων. Συνδυάζοντας την κωδικοποίηση FEC και το ARQ, το HARQ μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά τις ποικίλες συνθήκες καναλιού και να μετριάσει τον αντίκτυπο των σφαλμάτων, οδηγώντας σε πιο ισχυρή και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Επιπλέον, το HARQ μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της μετάδοσης δεδομένων μειώνοντας την ανάγκη για περιττές

αναμεταδόσεις. Η δυνατότητα επιλεκτικής αναμετάδοσης του HARQ επιτρέπει την αναμετάδοση μόνο των εσφαλμένων τμημάτων των δεδομένων, ελαχιστοποιώντας τα γενικά έξοδα και μεγιστοποιώντας τη χρήση των πόρων του δικτύου. Συνολικά, το HARQ είναι μια πολύτιμη τεχνική στα ασύρματα δίκτυα για την επίτευξη αξιόπιστης και αποτελεσματικής μετάδοσης δεδομένων.



Εικόνα 5.9 Τρόπος λειτουργίας του HARQ [71]

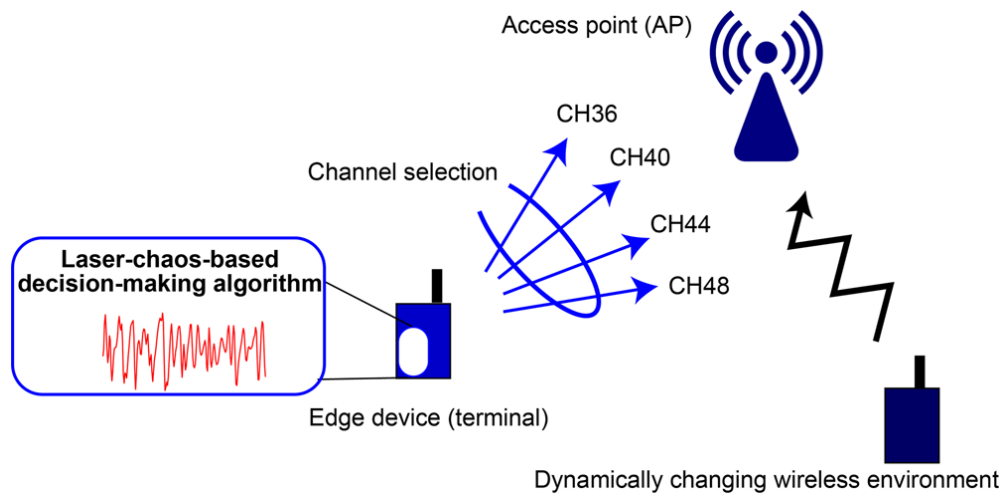
5.4.3 Δυναμική επιλογή δικτύου

Η δυναμική επιλογή δικτύου (Dynamic Network Selection - DNS) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε ασύρματα δίκτυα για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων επιλέγοντας δυναμικά το καταλληλότερο δίκτυο για μεταφορά δεδομένων με βάση διάφορους παράγοντες όπως οι συνθήκες δικτύου, οι προτιμήσεις των χρηστών και οι απαιτήσεις εφαρμογής. Οι αλγόριθμοι DNS παρακολουθούν συνεχώς τα διαθέσιμα δίκτυα και τις μετρήσεις απόδοσής τους, όπως το εύρος ζώνης, την καθυστέρηση και την αξιοπιστία, για να προσδιορίσουν το καλύτερο δίκτυο για μετάδοση δεδομένων [72].

Ο κύριος στόχος του DNS είναι να διασφαλίσει την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου και να παρέχει βελτιωμένη εμπειρία χρήστη προσαρμοζόμενος στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου. Επιλέγοντας δυναμικά το καταλληλότερο δίκτυο, το DNS μπορεί να βελτιστοποιήσει τη μετάδοση δεδομένων με βάση παράγοντες όπως το διαθέσιμο εύρος ζώνης, η συμφόρηση δικτύου και η ισχύς του σήματος. Για παράδειγμα, εάν ένας χρήστης βρίσκεται σε μια περιοχή με ισχυρό σήμα Wi-Fi, το DNS μπορεί να αλλάξει αυτόματα τη μετάδοση δεδομένων στο δίκτυο Wi-Fi για να εκμεταλλευτεί το υψηλότερο εύρος ζώνης και τη χαμηλότερη καθυστέρηση. Από την άλλη πλευρά, εάν το σήμα Wi-Fi εξασθενήσει ή συμφορηθεί, το DNS μπορεί να μεταφέρει απρόσκοπτα τη μετάδοση δεδομένων σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας για να διατηρεί μια αξιόπιστη και αδιάλειπτη σύνδεση.

Το DNS λαμβάνει επίσης υπόψη τις προτιμήσεις των χρηστών και τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Το DNS μπορεί να δώσει προτεραιότητα στην επιλογή των δικτύων που πληρούν τα κριτήρια για αυξημένη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) και τις επιλογές ρυθμίσεων του τελικού χρήστη.

Αυτό διασφαλίζει ότι η μετάδοση δεδομένων ευθυγραμμίζεται με τις προτιμήσεις του χρήστη και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής.

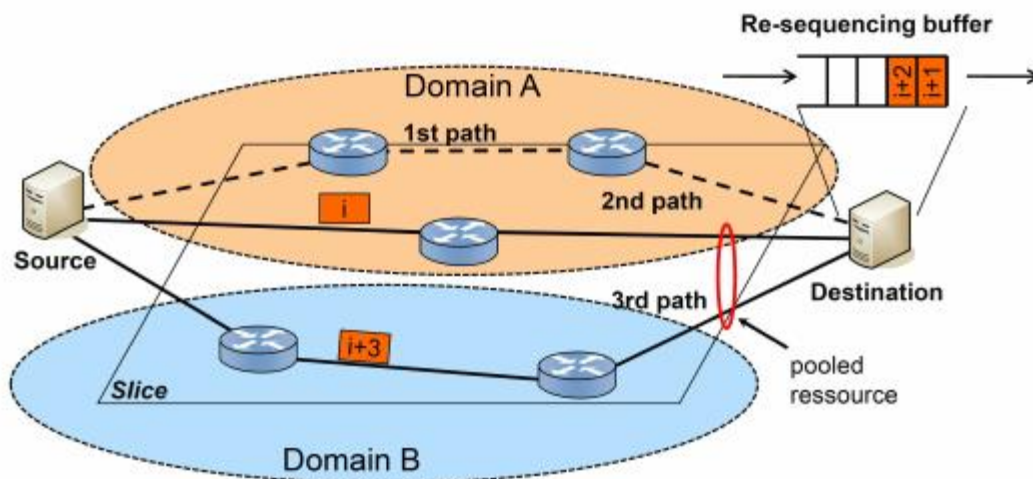


Εικόνα 5.10 Δυναμική επιλογή δικτύου στα ασύρματα δίκτυα [73]

5.4.4 Μετάδοση πολλαπλών διαδρομών

Η μετάδοση πολλαπλών διαδρομών (Multipath Transmission) σε ασύρματα δίκτυα αναφέρεται στην τεχνική μετάδοσης δεδομένων σε πολλαπλές διαδρομές ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό ενσύρματων και ασύρματων συνδέσεων [74]. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει τη διαίρεση των δεδομένων σε μικρότερα τμήματα και τη διανομή τους στα διαθέσιμα μονοπάτια. Κάθε τμήμα μεταδίδεται ανεξάρτητα και ο δέκτης συλλέγει και επανασυναρμολογεί τα τμήματα για να ανακατασκευάσει τα πλήρη δεδομένα. Η μετάδοση πολλαπλών διαδρομών συνήθως υλοποιείται χρησιμοποιώντας αλγόριθμους δρομολόγησης που κατανέμουν έξυπνα τα τμήματα δεδομένων σε όλες τις διαδρομές με βάση παράγοντες όπως η ποιότητα σύνδεσης, το διαθέσιμο εύρος ζώνης και η συμφόρηση δικτύου. Αυτοί οι αλγόριθμοι επιλέγουν δυναμικά τον βέλτιστο συνδυασμό μονοπατιών για τη μετάδοση των δεδομένων, διασφαλίζοντας την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου και την απρόσκοπτη παράδοση των δεδομένων.

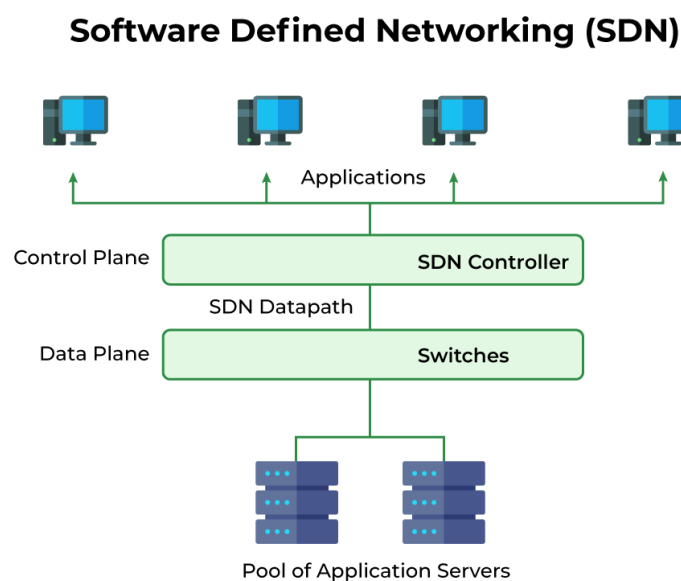
Τα πλεονεκτήματα της μετάδοσης πολλαπλών διαδρομών σε ασύρματα δίκτυα είναι σημαντικά. Πρώτον, βελτιώνει την αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων παρέχοντας πλεονασμό και εναλλακτικές διαδρομές. Εάν μια διαδρομή αντιμετωπίζει παρεμβολές, συμφόρηση ή υποβάθμιση του σήματος, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν μέσω των άλλων διαδρομών, μειώνοντας τον κίνδυνο απώλειας δεδομένων ή αστοχιών μετάδοσης. Δεύτερον, η μετάδοση πολλαπλών διαδρομών βελτιώνει τη συνολική χωρητικότητα και απόδοση του δικτύου. Χρησιμοποιώντας πολλαπλούς συνδέσμους ταυτόχρονα, αυξάνει το διαθέσιμο εύρος ζώνης για μετάδοση δεδομένων, επιτρέποντας ταχύτερη και αποτελεσματικότερη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων. Επιπλέον, η μετάδοση πολλαπλών διαδρομών μπορεί να βελτιώσει την εξισορρόπηση φορτίου στο δίκτυο κατανέμοντας την κίνηση δεδομένων σε πολλαπλές διαδρομές, μειώνοντας τη συμφόρηση και διασφαλίζοντας ομαλή μετάδοση. Αυτό οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση δικτύου και καλύτερη εμπειρία χρήστη.



Εικόνα 5.11 Μετάδοση πολλαπλών διαδρομών [74]

5.5 Δικτύωση καθορισμένη από λογισμικό

Η δικτύωση καθορισμένη από λογισμικό (Software Defined Networking - SDN) είναι ένα καινοτόμο πρότυπο δικτύωσης που αποσυνδέει το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων, επιτρέποντας τον κεντρικό και προγραμματιζόμενο έλεγχο των πόρων του δικτύου [75]. Το SDN έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα, καθώς επιτρέπει τη δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας, την αποτελεσματική κατανομή πόρων και τη βελτιωμένη επεκτασιμότητα του δικτύου. Ένα SDN αποτελείται από τους hosts, τους Servers, το Data Plane, το οποίο απασχολείται στην μεταφορά και διαμοιρασμό των πακέτων δεδομένων και το Control Plane, το οποίο καθορίζει προς τα που θα δρομολογηθούν τα πακέτα και με ποιες πολιτικές. Η αρχιτεκτονική ενός SDN παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12 Αρχιτεκτονική SDN [76]

Σε αυτή την ενότητα, θα παρουσιαστούν διάφορες αρχιτεκτονικές και μηχανισμούς ελέγχου που βασίζονται σε SDN που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της μετάδοσης μεγάλων όγκων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων της δρομολόγησης που καθορίζεται από λογισμικό, της δρομολόγησης ποιότητας υπηρεσίας (QoS), της μηχανικής κυκλοφορίας και της προσαρμοστικής Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση (AMC).

5.5.1 Δρομολόγηση που καθορίζεται από λογισμικό

Η δρομολόγηση που καθορίζεται από λογισμικό (Software Defined Routing - SDR) είναι μια προσέγγιση που αξιοποιεί τις αρχές του SDN για τη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Με το SDR, το επίπεδο ελέγχου αποσυνδέεται από το επίπεδο δεδομένων, επιτρέποντας τον κεντρικό έλεγχο και τον προγραμματισμό των αποφάσεων δρομολόγησης. Αυτό επιτρέπει τη δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας, την αποτελεσματική κατανομή πόρων και την ευελιξία στις αποφάσεις δρομολόγησης.

Στο SDR, ένας κεντρικός ελεγκτής έχει μια συνολική άποψη της τοπολογίας του δικτύου και λαμβάνει αποφάσεις δρομολόγησης με βάση παράγοντες όπως οι συνθήκες δικτύου, ο φόρτος κυκλοφορίας και οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Ο ελεγκτής επικοινωνεί με συσκευές δικτύου για να διαμορφώσει και να ενημερώσει δυναμικά τους πίνακες δρομολόγησης τους. Αυτός ο δυναμικός έλεγχος επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου, την εξισορρόπηση φορτίου και την προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου.

Το SDR προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα για τη μετάδοση δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Επιτρέπει τη δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας, επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου και την πρόληψη των σημείων συμφόρησης. Το SDR διευκολύνει επίσης την αποτελεσματική κατανομή πόρων, καθώς ο κεντρικός ελεγκτής μπορεί να εκχωρήσει πόρους δικτύου με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής ή τις προτιμήσεις του χρήστη. Επιπλέον, το SDR παρέχει ευελιξία και προσαρμοστικότητα στις αποφάσεις δρομολόγησης, επιτρέποντας την αποτελεσματική δρομολόγηση δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα με ποικίλη ισχύ σήματος, παρεμβολές και συμφόρηση δικτύου.

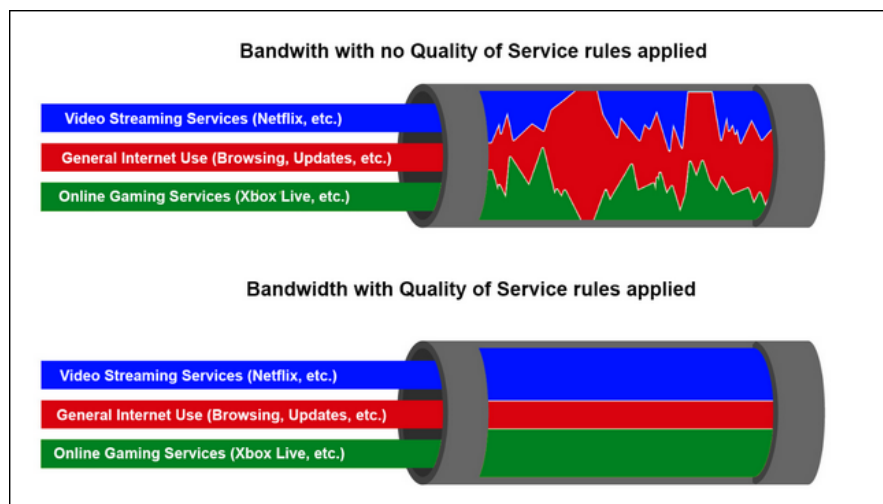
5.5.2 Δρομολόγηση Ποιότητας Υπηρεσίας

Η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) είναι μια θεμελιώδης έννοια στη δικτύωση που αναφέρεται στην ικανότητα παροχής διαφορετικών επιπέδων υπηρεσίας ή προτεραιότητας σε διαφορετικούς τύπους κίνησης δικτύου [77]. Περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών και μηχανισμών που διασφαλίζουν την έγκαιρη παράδοση πακέτων δεδομένων με συγκεκριμένες απαιτήσεις απόδοσης, όπως το εύρος ζώνης, την καθυστέρηση, το jitter και την αξιοπιστία. Το QoS διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διαχείριση και τη βελτιστοποίηση του δικτύου, επιτρέποντας στους διαχειριστές του δικτύου να κατανέμουν αποτελεσματικά τους πόρους του δικτύου και να δίνουν προτεραιότητα σε κρίσιμες εφαρμογές ή υπηρεσίες έναντι εκείνων που είναι λιγότερο ευαίσθητες στο χρόνο.

Στο πλαίσιο της δρομολόγησης, η δρομολόγηση ποιότητας υπηρεσίας (QoS) εστιάζει στην επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής για την κυκλοφορία δικτύου με βάση τις συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS διαφορετικών εφαρμογών ή υπηρεσιών. Οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι

δρομολόγησης, όπως οι δημοφιλείς αλγόριθμοι συντομότερης διαδρομής, λαμβάνουν υπόψη μόνο παράγοντες όπως ο αριθμός hop ή η τοπολογία δικτύου κατά τον καθορισμό της διαδρομής για τα πακέτα δεδομένων. Ωστόσο, σε σενάρια όπου ορισμένοι τύποι κυκλοφορίας απαιτούν συγκεκριμένες εγγυήσεις απόδοσης ή έχουν διαφορετικές απαιτήσεις QoS, καθίστανται απαραίτητοι αλγόριθμοι δρομολόγησης QoS.

Η δρομολόγηση QoS λαμβάνει υπόψη παραμέτρους όπως το εύρος ζώνης, την καθυστέρηση, την απώλεια πακέτων και το jitter, μαζί με συγκεκριμένες απαιτήσεις για την εφαρμογή, για να καθορίσει τη βέλτιστη διαδρομή για κάθε ροή κυκλοφορίας. Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις παραμέτρους QoS κατά τη διαδικασία επιλογής διαδρομής, οι αλγόριθμοι δρομολόγησης QoS στοχεύουν να μεγιστοποιήσουν την απόδοση του δικτύου και να ικανοποιήσουν τις συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS διαφορετικών κατηγοριών κυκλοφορίας. Αυτοί οι αλγόριθμοι λειτουργούν συνήθως σε συνδυασμό με μηχανισμούς μηχανικής κυκλοφορίας, οι οποίοι περιλαμβάνουν ταξινόμηση κυκλοφορίας, έλεγχο αποδοχής και κράτηση πόρων, για να διασφαλιστεί η παροχή επαρκών πόρων δικτύου για την κάλυψη των επιθυμητών επιπέδων QoS.



Εικόνα 5.13 Διαφορές εφαρμογής QoS και μη για μεταφορά δεδομένων [77]

5.5.3 Μηχανική Κυκλοφορίας

Η Μηχανική Κυκλοφορίας (Traffic Engineering - TE) σε ασύρματα δίκτυα είναι μια κρίσιμη πτυχή όταν πρόκειται για την αποτελεσματική μετάδοση ΜΔ. Περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση και τη διαχείριση των πόρων του δικτύου για την επίτευξη των επιθυμητών στόχων απόδοσης, όπως η μεγιστοποίηση της απόδοσης, η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και η εξασφάλιση υψηλής διαθεσιμότητας [78]. Οι τεχνικές TE έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτει η μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων μέσω ασύρματων δικτύων, όπου οι περιορισμοί εύρους ζώνης και οι διαφορετικές συνθήκες καναλιού μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου.

Στο πλαίσιο της μετάδοσης ΜΔ οι τεχνικές TE επικεντρώνονται στην αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας του δικτύου για την ελαχιστοποίηση της συμφόρησης και τη διασφάλιση της αποτελεσματικής χρήσης των διαθέσιμων πόρων. Αυτό περιλαμβάνει διάφορες

στρατηγικές, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης της κυκλοφορίας, της ιεράρχησης της κυκλοφορίας και της κατανομής εύρους ζώνης. Οι τεχνικές διαμόρφωσης κυκλοφορίας ρυθμίζουν τη ροή δεδομένων εξομαλύνοντας τις απότομες απαιτήσεις και ελέγχοντας τον ρυθμό με τον οποίο μεταδίδονται τα δεδομένα, αποτρέποντας έτσι τη συμφόρηση του δικτύου και διασφαλίζοντας δίκαιη κατανομή των πόρων. Δίνοντας προτεραιότητα στην κυκλοφορία, οι κρίσιμες μεταδόσεις ΜΔ μπορούν να έχουν υψηλότερη προτεραιότητα έναντι της μη κρίσιμης κυκλοφορίας ή της κυκλοφορίας στο παρασκήνιο, διασφαλίζοντας ότι λαμβάνουν το απαραίτητο εύρος ζώνης και μειωμένη καθυστέρηση για έγκαιρη παράδοση.

Η κατανομή εύρους ζώνης παίζει ζωτικό ρόλο στην ΤΕ για μετάδοση ΜΔ. Χρησιμοποιούνται μηχανισμοί δυναμικής κατανομής για την κατανομή εύρους ζώνης με βάση τη ζήτηση και την προτεραιότητα, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το μέγεθος των δεδομένων που μεταδίδονται και τις απαιτήσεις QoS των εφαρμογών. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική κατανομή πόρων και την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, οδηγώντας σε βελτιστοποιημένη απόδοση δικτύου και βελτιωμένη συνολική απόδοση μετάδοσης.

Επιπλέον, οι προηγμένες τεχνικές ΤΕ στα ασύρματα δίκτυα αξιοποιούν ευφυείς αλγόριθμους και διαδικασίες λήψης αποφάσεων για να προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου. Αυτή η προσαρμοστικότητα βοηθά στη βελτιστοποίηση των διαδρομών δρομολόγησης και μετάδοσης για Μεγάλα Δεδομένα, διασφαλίζοντας αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων δικτύου και ελαχιστοποιώντας τον αντίκτυπο των βλαβών στα ασύρματα κανάλια.

5.5.4 Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση

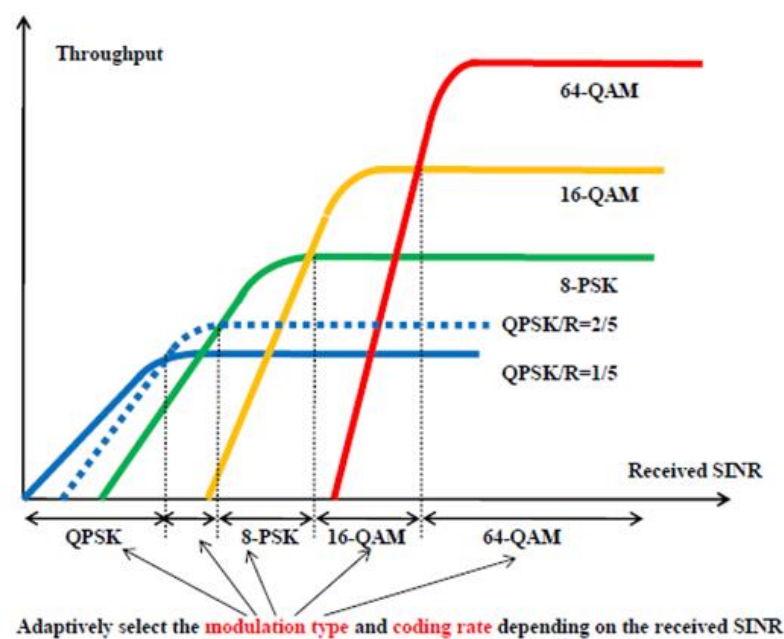
Η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding - AMC) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε ασύρματα δίκτυα για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων προσαρμόζοντας δυναμικά τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης με βάση τις συνθήκες του καναλιού που επικρατούν. Στοχεύει στην επίτευξη μιας βέλτιστης αντιστάθμισης μεταξύ του ρυθμού δεδομένων, της αξιοπιστίας και της φασματικής απόδοσης. Προσαρμόζοντας τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σε πραγματικό χρόνο, η AMC επιτρέπει στα ασύρματα συστήματα να μεγιστοποιήσουν τη χωρητικότητά τους και να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση μετάδοσης [79].

Στις ασύρματες επικοινωνίες, οι συνθήκες του καναλιού μπορεί να διαφέρουν λόγω παραγόντων όπως η απόσταση, οι παρεμβολές, το ξεθώριασμα και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτές οι παραλλαγές μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του σήματος και την αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων. Η AMC αντιμετωπίζει αυτήν την πρόκληση παρακολουθώντας συνεχώς την ποιότητα του καναλιού και προσαρμόζοντας ανάλογα τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.

Το σχήμα διαμόρφωσης καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα κωδικοποιούνται στο σήμα φορέα, ενώ το σχήμα κωδικοποίησης προσθέτει πλεονασμό στα μεταδιδόμενα δεδομένα για να επιτρέψει την ανίχνευση και τη διόρθωση σφαλμάτων. Οι αλγόριθμοι AMC αξιολογούν τις συνθήκες του καναλιού, όπως ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio - SNR) ή ο

ρυθμός σφάλματος bit (Bit Error Rate -BER), και επιλέγουν δυναμικά το καταλληλότερο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης.

Όταν οι συνθήκες του καναλιού είναι ευνοϊκές, με υψηλό SNR και χαμηλή παρεμβολή, το AMC μπορεί να χρησιμοποιήσει σχήματα διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης, όπως 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) ή 64-QAM, τα οποία μεταδίδουν περισσότερα bit ανά σύμβολο, οδηγώντας σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Αντίθετα, όταν οι συνθήκες του καναλιού επιδεινωθούν, το AMC μπορεί να μεταβεί σε σχήματα διαμόρφωσης χαμηλότερης τάξης, όπως QPSK (Quadratic Phase Shift Keying) ή το BPSK (Binary Phase Shift Keying), τα οποία παρέχουν καλύτερη αξιοπιστία σε βάρος των χαμηλότερων ρυθμών δεδομένων. Στην παρακάτω Εικόνα 5.14 παρουσιάζεται πως επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος κωδικοποίησης με βάση τον ρυθμό μετάδοσης και το λαμβανόμενο SNR.



Εικόνα 5.14 Επιλογή τύπου διαμόρφωσης με την μέθοδο AMC [80]

Επιπλέον, οι αλγόριθμοι AMC προσαρμόζουν δυναμικά το σχήμα κωδικοποίησης ώστε να ταιριάζει με τις συνθήκες του καναλιού. Υψηλότεροι ρυθμοί κωδικοποίησης, που επιτυγχάνονται μέσω περισσότερων περιττών κωδικών διόρθωσης σφαλμάτων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε καλές συνθήκες καναλιού για να παρέχουν υψηλότερη αξιοπιστία. Αντίθετα, χαμηλότεροι ρυθμοί κωδικοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κακές συνθήκες καναλιού για τη διατήρηση του εύρους ζώνης και τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης.

Προσαρμόζοντας τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης με βάση τις μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού, η AMC διασφαλίζει αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Μεγιστοποιεί τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ενώ διατηρεί αξιόπιστη επικοινωνία, ακόμη και σε δύσκολα περιβάλλοντα. Η προσαρμοστική φύση του AMC επιτρέπει στα ασύρματα συστήματα να προσαρμόζονται σε συνθήκες δυναμικού καναλιού, παρέχοντας βελτιωμένη φασματική απόδοση, υψηλότερη απόδοση και βελτιωμένη συνολική απόδοση για τη μετάδοση ΜΔ.

6

Συγκρίσεις Απόδοσης

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματεύεται την διεξοδική σύγκριση απόδοσης των μεθοδολογιών και των αλγορίθμων του προηγούμενου κεφαλαίου για την αποτελεσματική μετάδοση ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα. Αυτό το κεφάλαιο στοχεύει στην αξιολόγηση και σύγκριση αυτών των προσεγγίσεων με βάση προκαθορισμένα κριτήρια και μετρήσεις απόδοσης, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τα σχετικά δυνατά και αδύνατα σημεία τους. Η σημασία για σύγκριση των αποδόσεων κάθε μεθοδολογίας και αλγορίθμου καθίσταται μεγάλης σημασίας, καθώς παρέχει σημαντικές πληροφορίες για το πώς μπορούν να αξιοποιηθούν οι πλέον βέλτιστες τακτικές μετάδοσης ΜΔ στα ασύρματα δίκτυο όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά και αποτελεσματικά.

Για να επιτευχθεί αυτό, το συγκεκριμένο κεφάλαιο εμβαθύνει σε μια θεωρητική ανάλυση διαφόρων μετρήσεων απόδοσης που σχετίζονται με τη σύγκριση. Κάθε μέτρηση εξετάζεται διεξοδικά ως προς τις θεωρητικές της πτυχές και την ικανότητά της να καταγράφει την αποτελεσματικότητα, την επεκτασιμότητα, την προσαρμοστικότητα και άλλα επιθυμητά χαρακτηριστικά της μετάδοσης ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα. Με βάση αυτή τη θεωρητική βάση, το κεφάλαιο προχωρά στη διεξαγωγή μιας σχολαστικής συγκριτικής ανάλυσης των μεθοδολογιών και των αλγορίθμων του προηγούμενου κεφαλαίου.

6.1 Κριτήρια αξιολόγησης αποδοτικής μετάδοσης ΜΔ

Η συγκεκριμένη ενότητα παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα κριτήρια αξιολόγησης και οι παράγοντες που είναι κρίσιμοι για τη σύγκριση των επιδόσεων των εξεταζόμενων μεθοδολογιών και αλγορίθμων. Τα κριτήρια αυτά χρησιμεύουν ως σημεία αναφοράς για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας κάθε προσέγγισης. Επιπλέον, η παρούσα ενότητα υπογραμμίζει τη σημασία κάθε κριτηρίου και το ρόλο του στη διαδικασία αξιολόγησης. Επισημαίνεται η σημασία της επιλογής κατάλληλων κριτηρίων που ευθυγραμμίζονται με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και τους στόχους της αποδοτικής μετάδοσης ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα. Καθορίζοντας ένα πλήρες θεωρητικό πλαίσιο αξιολόγησης, το κεφάλαιο δημιουργεί μια ισχυρή βάση για την αντικειμενική σύγκριση της απόδοσης κάθε προσέγγισης που εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Τα κριτήρια αξιολόγησης που θα εξεταστούν και θα αναλυθούν παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω:

- **Χρήση εύρους ζώνης (Bandwidth Utilization):** Αυτό το κριτήριο αξιολόγησης επικεντρώνεται στην αποτελεσματική αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για τη μετάδοση μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Εξετάζει πόσο καλά κάθε μεθοδολογία και αλγόριθμος βελτιστοποιεί τη χρήση των πόρων εύρους ζώνης, ελαχιστοποιώντας τη σπατάλη και μεγιστοποιώντας την απόδοση [81]. Οι προσεγγίσεις που διαχειρίζονται και κατανέμουν αποτελεσματικά το εύρος ζώνης, δίνουν προτεραιότητα στις ροές δεδομένων και ελαχιστοποιούν την επιβάρυνση θεωρούνται ευνοϊκές όσον αφορά τη χρήση του εύρους ζώνης.
- **Καθυστέρηση (Latency):** Η καθυστέρηση αναφέρεται στην καθυστέρηση που παρατηρείται κατά τη μετάδοση δεδομένων. Στο πλαίσιο των μεγάλων δεδομένων, η χαμηλή καθυστέρηση είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου και δεδομένα ευαίσθητα στο χρόνο [82]. Η σύγκριση επιδόσεων αξιολογεί τον τρόπο με τον οποίο κάθε μεθοδολογία και αλγόριθμος ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση βελτιστοποιώντας τη δρομολόγηση δεδομένων, μειώνοντας τις καθυστερήσεις επεξεργασίας και χρησιμοποιώντας αποτελεσματικούς μηχανισμούς ουράς και χρονοπρογραμματισμού. Οι προσεγγίσεις που ελαχιστοποιούν την καθυστέρηση επιτρέπουν την έγκαιρη παράδοση των δεδομένων, εξασφαλίζοντας απόκριση και ικανοποιώντας τις αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης.
- **Ποσοστό απώλειας πακέτων (Packet Loss Rate):** Η απώλεια πακέτων μπορεί να συμβεί στα ασύρματα δίκτυα λόγω παραγόντων όπως η παρεμβολή σήματος, η εξασθένηση ή η συμφόρηση. Αυτό το κριτήριο αξιολόγησης εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο κάθε προσέγγιση μετριάξει τις απώλειες πακέτων για να εξασφαλίσει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων [83]. Οι αποτελεσματικές τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων, οι μηχανισμοί πλεονασμού και τα σχήματα ανίχνευσης και ανάκτησης σφαλμάτων θεωρούνται σημαντικά για τη μείωση της απώλειας πακέτων και τη διατήρηση της ακεραιότητας των δεδομένων. Οι προσεγγίσεις που παρουσιάζουν χαμηλότερα ποσοστά απώλειας πακέτων θεωρούνται πιο εύρωστες και αξιόπιστες.
- **Κατανάλωση ενέργειας (Energy Consumption):** Η ενεργειακή απόδοση είναι κρίσιμη για τα ασύρματα δίκτυα, ιδίως όταν μεταδίδονται μεγάλα δεδομένα για παρατεταμένες περιόδους. Αυτό το κριτήριο αξιολογεί πόσο αποτελεσματικά κάθε μεθοδολογία και αλγόριθμος χρησιμοποιεί τους πόρους ενέργειας. Προτιμώνται οι προσεγγίσεις που βελτιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας με την ελαχιστοποίηση των περιττών μεταδόσεων, την έξυπνη διαχείριση των καταστάσεων ισχύος και τη χρήση τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας [84]. Η μείωση της κατανάλωσης ισχύος συμβάλλει στη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, στη βελτίωση της βιωσιμότητας και στην οικονομική αποδοτικότητα στις αναπτύξεις ασύρματων δικτύων.

- **Επεκτασιμότητα (Scalability):** Η επεκτασιμότητα αξιολογεί την ικανότητα των μεθοδολογιών και των αλγορίθμων να διαχειρίζονται αυξανόμενο όγκο δεδομένων χωρίς να θυσιάζεται η απόδοση [85]. Η σύγκριση των επιδόσεων εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο κάθε προσέγγιση κλιμακώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος των δεδομένων, αξιολογώντας παράγοντες όπως η κατάτμηση δεδομένων, η παράλληλη επεξεργασία και οι μηχανισμοί εξισορρόπησης φορτίου. Οι προσεγγίσεις που παρουσιάζουν υψηλή επεκτασιμότητα μπορούν να χειριστούν αποτελεσματικά εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, ικανοποιώντας τις αυξανόμενες απαιτήσεις δεδομένων χωρίς συμβιβασμούς στην αποδοτικότητα.
- **Προσαρμοστικότητα (Adaptability):** Αυτό το κριτήριο επικεντρώνεται στην ευελιξία και την προσαρμοστικότητα των μεθοδολογιών και των αλγορίθμων σε ποικίλες συνθήκες δικτύου και δυναμικά περιβάλλοντα [86]. Αξιολογεί πόσο καλά μπορεί κάθε προσέγγιση να προσαρμόζει τις παραμέτρους, τις διαμορφώσεις ή τις στρατηγικές δρομολόγησης σε απόκριση στα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά του δικτύου. Οι προσεγγίσεις που μπορούν να προσαρμόζονται δυναμικά στις διακυμάνσεις του δικτύου, όπως η μεταβαλλόμενη διαθεσιμότητα εύρους ζώνης ή τα πρότυπα κινητικότητας, θεωρούνται πιο προσαρμοστικές και ικανές να διατηρούν τη βέλτιστη απόδοση.
- **Ανθεκτικότητα (Robustness):** Η ανθεκτικότητα μετρά την ανθεκτικότητα των μεθοδολογιών και των αλγορίθμων έναντι διαταραχών ή αστοχιών του δικτύου. Αξιολογεί την ικανότητα κάθε προσέγγισης να χειρίζεται δυσμενείς συνθήκες, όπως αποτυχίες συνδέσεων, συμφόρηση ή διακοπές κόμβων [87]. Οι προσεγγίσεις με ενσωματωμένους μηχανισμούς ανοχής σφαλμάτων, ανάκτησης σφαλμάτων και χαριστικής υποβάθμισης θεωρούνται ανθεκτικές. Οι ανθεκτικές μεθοδολογίες και αλγόριθμοι εξασφαλίζουν συνεχή και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων, ακόμη και σε δύσκολα περιβάλλοντα δικτύου.

6.2 Συγκριτική ανάλυση των μεθοδολογιών - αλγορίθμων

Στην προσπάθεια για αποτελεσματική μετάδοση ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα, είναι απαραίτητη η ενδεδειγμένη αξιολόγηση διαφόρων μεθοδολογιών και αλγορίθμων. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μια θεωρητική συγκριτική ανάλυση των διαφόρων προσεγγίσεων, με στόχο την αξιολόγηση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητάς τους με βάση τα κριτήρια αξιολόγησης που επιλέχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Αναλύεται και δίνεται έμφαση στην αξιολόγηση συγκεκριμένων μεθοδολογιών και αλγορίθμων, συμπεριλαμβανομένων μεθόδων τμηματοποίησης και παράλληλης μετάδοσης ΜΔ, τεχνικών συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων, στρατηγικών κατανομής αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης, υβριδικών μεθόδων ενσύρματου-ασύρματου δικτύου και δικτύωσης που καθορίζεται από λογισμικό (SDN). Με την κριτική εξέταση αυτών των προσεγγίσεων, καθίσταται εφικτή η ανάλυση και κατανόηση των διάφορων μεθόδων λαμβάνοντας πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τις δυνατότητες, τους περιορισμούς και τις πιθανές συνεισφορές τους στην επίτευξη αποδοτικής και αξιόπιστης μετάδοσης ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα.

6.2.1 Αξιολόγηση των μεθόδων τμηματοποίησης ΜΔ και παράλληλης μετάδοσης

Για την αξιολόγηση των μεθόδων τμηματοποίησης ΜΔ και παράλληλης μετάδοσης και με βάση τα επιλεγμένα κριτήρια αξιολόγησης προκύπτουν τα παρακάτω:

- **Χρήση εύρους ζώνης:** Όσον αφορά τη χρήση του εύρους ζώνης, η τμηματοποίηση με βάση το hash ξεχωρίζει ως αποδοτική μέθοδος. Με τη διαίρεση των δεδομένων σε τμήματα με βάση τις τιμές κατακερματισμού, διασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή των τμημάτων στο δίκτυο, βελτιστοποιώντας τη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί τις περιττές μεταδόσεις και διασφαλίζει ότι τα τμήματα μεταδίδονται παράλληλα, μεγιστοποιώντας τη συνολική χρήση του εύρους ζώνης. Από την άλλη πλευρά, η τμηματοποίηση βάσει εύρους προσφέρει επίσης αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης. Με την κατανομή τμημάτων βάσει συγκεκριμένων περιοχών, αποφεύγονται οι περιττές μεταδόσεις και διασφαλίζεται ότι τα τμήματα μεταδίδονται αποτελεσματικά εντός των αντίστοιχων περιοχών τους. Ωστόσο, η τμηματοποίηση Round-Robin δεν βελτιστοποιεί τη χρήση του εύρους ζώνης τόσο αποτελεσματικά όσο οι άλλες μέθοδοι, καθώς κατανέμει τα τμήματα διαδοχικά χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά ή τα μοτίβα τους.
- **Καθυστέρηση:** Όσον αφορά την καθυστέρηση, η τμηματοποίηση με βάση το hash προσφέρει χαμηλή καθυστέρηση στις περισσότερες περιπτώσεις. Τα τμήματα δεδομένων μπορούν να υποβάλλονται σε παράλληλη επεξεργασία και να μεταδίδονται ταυτόχρονα, ελαχιστοποιώντας τον συνολικό χρόνο επεξεργασίας και μετάδοσης. Ωστόσο, η καθυστέρηση μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την κατανομή των τμημάτων και τους αντίστοιχους χρόνους επεξεργασίας τους. Η τμηματοποίηση με βάση το εύρος στοχεύει επίσης στην ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης, κατανέμοντας τα τμήματα με βάση το εύρος τους. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ταχύτερη επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων εντός κάθε εύρους, μειώνοντας τη συνολική καθυστέρηση. Αντίθετα, η τμηματοποίηση Round-Robin εισάγει υψηλότερη καθυστέρηση σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους, καθώς τα τμήματα κατανέμονται διαδοχικά χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, προκαλώντας ενδεχομένως καθυστερήσεις στη μετάδοση δεδομένων.
- **Ποσοστό σφάλματος πακέτων:** Ο αντίκτυπος των μεθόδων τμηματοποίησης στον ρυθμό σφαλμάτων πακέτων δεν είναι άμεσος, αλλά εξαρτάται από τους συγκεκριμένους μηχανισμούς μετάδοσης και διόρθωσης σφαλμάτων που χρησιμοποιούνται. Η ίδια η τμηματοποίηση με βάση τον κατακερματισμό δεν επηρεάζει άμεσα το ποσοστό σφαλμάτων πακέτων, καθώς εστιάζει κυρίως στην τμηματοποίηση των δεδομένων. Ωστόσο, το ποσοστό σφάλματος μπορεί να επηρεαστεί από άλλους παράγοντες, όπως τα επιλεγμένα πρωτόκολλα μετάδοσης, οι μηχανισμοί διόρθωσης σφαλμάτων και οι συνθήκες του δικτύου. Παρομοίως, η τμηματοποίηση με βάση το εύρος μπορεί ενδεχομένως να βελτιώσει το ποσοστό σφάλματος πακέτων με την κατανομή τμημάτων με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Όταν τα τμήματα εντός του ίδιου εύρους έχουν παρόμοιες ιδιότητες, οι πιθανότητες σφαλμάτων μπορούν να μειωθούν. Από την άλλη πλευρά, η τμηματοποίηση με βάση το Round-Robin

δεν επηρεάζει άμεσα το ποσοστό σφάλματος πακέτων, καθώς καθορίζει τη σειρά κατανομής των τμημάτων, ενώ το ποσοστό σφάλματος παραμένει κυρίως εξαρτώμενο από άλλους παράγοντες, όπως οι συνθήκες μετάδοσης και οι μηχανισμοί διόρθωσης σφαλμάτων.

- Κατανάλωση ενέργειας:** Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, η τμηματοποίηση με βάση το hash απαιτεί πρόσθετους υπολογιστικούς πόρους για την τμηματοποίηση και την επανασυναρμολόγηση των δεδομένων, οδηγώντας ενδεχομένως σε υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Η διαδικασία υπολογισμού των τιμών κατακερματισμού και διανομής τμημάτων μπορεί να περιλαμβάνει μεγαλύτερη υπολογιστική επιβάρυνση, η οποία μπορεί να επηρεάσει την ενεργειακή απόδοση. Η τμηματοποίηση με βάση το εύρος, συγκριτικά, απαιτεί γενικά μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, καθώς περιλαμβάνει απλούστερη κατανομή με βάση προκαθορισμένα εύρη χωρίς εκτεταμένους υπολογισμούς. Η τμηματοποίηση Round-Robin θεωρείται ενεργειακά αποδοτική, καθώς δεν περιλαμβάνει πολύπλοκους υπολογισμούς ή μηχανισμούς κατανομής, με αποτέλεσμα χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.
- Επεκτασιμότητα:** Όσον αφορά την επεκτασιμότητα, η τμηματοποίηση με βάση το hash επιδεικνύει καλά χαρακτηριστικά επεκτασιμότητας. Ο αριθμός των τμημάτων μπορεί εύκολα να αυξηθεί ή να μειωθεί με βάση το μέγεθος των δεδομένων και τις απαιτήσεις του δικτύου, καθιστώντας την κατάλληλη για διαφορετικές ανάγκες κλιμάκωσης. Η τμηματοποίηση με βάση το εύρος προσφέρει επίσης επεκτασιμότητα, καθώς διαιρεί τα δεδομένα σε τμήματα με βάση προκαθορισμένα εύρη. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ευέλικτη προσαρμογή σε διαφορετικά μεγέθη δεδομένων και συνθήκες δικτύου, υποστηρίζοντας την κλιμακούμενη μετάδοση δεδομένων. Ωστόσο, η τμηματοποίηση με βάση το Round-Robin έχει ορισμένους περιορισμούς στην επεκτασιμότητα, καθώς διανέμει τα τμήματα διαδοχικά, δεν θεωρείται το ίδιο κατάλληλη για σενάρια μετάδοσης δεδομένων μεγάλης κλίμακας που απαιτούν αποτελεσματική επεκτασιμότητα και χρήση των πόρων συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους.
- Προσαρμοστικότητα:** Όσον αφορά την προσαρμοστικότητα, η τμηματοποίηση με βάση τον κατακερματισμό παρουσιάζει ισχυρή προσαρμοστικότητα, διανέμοντας τμήματα με βάση τις τιμές κατακερματισμού τους. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αποτελεσματική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και υποστηρίζει τη δυναμική προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες δεδομένων και δικτύου. Η τμηματοποίηση με βάση το εύρος παρέχει προσαρμοστικότητα κατανέμοντας τμήματα με βάση προκαθορισμένα εύρη, επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση των πόρων και την προσαρμογή στα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά των δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, η τμηματοποίηση Round-Robin έχει περιορισμένη προσαρμοστικότητα, καθώς κατανέμει τα τμήματα διαδοχικά χωρίς να λαμβάνει υπόψη συγκεκριμένες ιδιότητες δεδομένων ή συνθήκες δικτύου, καθιστώντας την λιγότερο ευέλικτη στην προσαρμογή σε δυναμικά περιβάλλοντα.

- **Ανθεκτικότητα:** Η τμηματοποίηση με βάση τον κατακερματισμό μπορεί να παρουσιάσει καλή ανθεκτικότητα, καθώς διανέμει τα τμήματα με βάση τις τιμές κατακερματισμού, γεγονός που μπορεί να εισάγει ένα επίπεδο πλεονασμού και ανοχής σε σφάλματα. Σε περίπτωση βλαβών του δικτύου ή απώλειας τμημάτων, η κατανομή τμημάτων με βάση τις τιμές κατακερματισμού μπορεί να διευκολύνει την ανάκτηση και την επαναμετάδοση των χαμένων τμημάτων. Η τμηματοποίηση με βάση το εύρος προσφέρει επίσης καλή ανθεκτικότητα με τη διαίρεση των δεδομένων σε τμήματα εντός συγκεκριμένων περιοχών. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την εντοπισμένη ανάκτηση και επαναμετάδοση χαμένων ή κατεστραμμένων τμημάτων, ελαχιστοποιώντας τον αντίκτυπο των αποτυχιών. Ωστόσο, η τμηματοποίηση Round-Robin μπορεί να έχει περιορισμένη ευρωστία, καθώς διανέμει τα τμήματα διαδοχικά χωρίς εγγενείς μηχανισμούς ανοχής σφαλμάτων ή ανάκτησης βλαβών δικτύου.

6.2.2 Αξιολόγηση των τεχνικών συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων

Για την αξιολόγηση των τεχνικών συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων και με βάση τα επιλεγμένα κριτήρια αξιολόγησης προκύπτουν τα παρακάτω:

- **Χρήση εύρους ζώνης:** Ο LZW Αλγόριθμος συμπιέζει τα δεδομένα μέσω της δημιουργίας ενός λεξικού συχνών μοτίβων. Το λεξικό ενημερώνεται δυναμικά κατά τη διάρκεια της συμπίεσης για την αποτελεσματική αναπαράσταση επαναλαμβανόμενων μοτίβων, με αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους των δεδομένων και τη βελτίωση της χρήσης του εύρους ζώνης. Η κωδικοποίηση Huffman επιτρέπει επίσης την αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης με την ανάθεση συντομότερων κωδικών σε συχνότερα σύμβολα στα δεδομένα. Αυτή η τεχνική στατιστικής κωδικοποίησης μειώνει το συνολικό μέγεθος των δεδομένων, με αποτέλεσμα τη βελτιστοποιημένη χρήση του εύρους ζώνης. Ο μετασχηματισμός Burrows-Wheeler αναδιατάσσει τα δεδομένα για να ομαδοποιήσει παρόμοιους χαρακτήρες μαζί, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα της συμπίεσης και στη συνέχεια να βελτιώσει τη χρήση του εύρους ζώνης. Η κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης μειώνει τη χρήση του εύρους ζώνης με την κωδικοποίηση διαδοχικών εμφανίσεων του ίδιου συμβόλου με μια μέτρηση, με αποτέλεσμα μικρότερο μέγεθος δεδομένων και βελτιωμένη χρήση του εύρους ζώνης.
- **Καθυστέρηση:** Ο αλγόριθμος LZW εισάγει κάποια καθυστέρηση κατά τις διαδικασίες συμπίεσης και αποσυμπίεσης λόγω της διαχείρισης λεξικού και των λειτουργιών αναζήτησης κώδικα. Ωστόσο, ο αντίκτυπος της καθυστέρησης είναι γενικά διαχειρίσιμος και αντισταθμίζεται από τα οφέλη του μειωμένου μεγέθους δεδομένων κατά τη μετάδοση. Η κωδικοποίηση Huffman έχει χαμηλή καθυστέρηση, καθώς περιλαμβάνει μια απλή διαδικασία κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης. Ο χρόνος συμπίεσης και αποσυμπίεσης εξαρτάται κυρίως από την πολυπλοκότητα της ανάλυσης της συχνότητας των συμβόλων και των λειτουργιών αναζήτησης κώδικα. Ο μετασχηματισμός Burrows-Wheeler μπορεί να εισάγει πρόσθετη καθυστέρηση κατά τη διαδικασία μετασχηματισμού, καθώς περιλαμβάνει

αναδιάταξη των δεδομένων. Ωστόσο, ο αντίκτυπος στην καθυστέρηση είναι γενικά ελάχιστος και δεν επηρεάζει σημαντικά το συνολικό χρόνο συμπίεσης και αποσυμπίεσης. Η κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης έχει χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση καθώς περιλαμβάνει μια απλή διαδικασία κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης που μετρά τις διαδοχικές εμφανίσεις συμβόλων. Ο χρόνος συμπίεσης και αποσυμπίεσης εξαρτάται κυρίως από τα πρότυπα μήκους εκτέλεσης των δεδομένων.

- **Ποσοστό σφάλματος πακέτων:** Ο αντίκτυπος αυτών των τεχνικών συμπίεσης στο ρυθμό σφαλμάτων πακέτων είναι γενικά αμελητέος. Ο LZW, η κωδικοποίηση Huffman, η BWT και η RLE είναι αλγόριθμοι συμπίεσης χωρίς απώλειες, πράγμα που σημαίνει ότι τα συμπιεσμένα δεδομένα μπορούν να ανακατασκευαστούν με ακρίβεια χωρίς την εισαγωγή σφαλμάτων. Το ποσοστό σφάλματος πακέτου εξαρτάται κυρίως από το μέσο μετάδοσης, τις συνθήκες δικτύου και τους χρησιμοποιούμενους μηχανισμούς διόρθωσης σφαλμάτων και όχι από τον συγκεκριμένο αλγόριθμο συμπίεσης που χρησιμοποιείται.
- **Κατανάλωση ενέργειας:** Ο αλγόριθμος LZW ενδέχεται να απαιτεί πρόσθετους υπολογιστικούς πόρους κατά τη διάρκεια των διαδικασιών συμπίεσης και αποσυμπίεσης, με πιθανό αποτέλεσμα υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με άλλους αλγορίθμους. Η κωδικοποίηση Huffman έχει γενικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθώς περιλαμβάνει απλές λειτουργίες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης που μπορούν να εκτελεστούν αποτελεσματικά. Ο μετασχηματισμός Burrows-Wheeler δύναται να απαιτεί πρόσθετους υπολογιστικούς πόρους κατά τη διαδικασία μετασχηματισμού, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ελαφρώς υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με απλούστερες τεχνικές κωδικοποίησης. Η κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης είναι μια υπολογιστικά ελαφριά τεχνική συμπίεσης, με αποτέλεσμα χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με πιο σύνθετους αλγορίθμους.
- **Επεκτασιμότητα:** Ο αλγόριθμος LZW παρουσιάζει καλή επεκτασιμότητα, καθώς μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά διάφορα μεγέθη δεδομένων. Το λεξικό συμπίεσης αυξάνεται δυναμικά κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, επιτρέποντας την προσαρμογή σε διαφορετικά μεγέθη δεδομένων. Η κωδικοποίηση Huffman είναι κλιμακούμενη και μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά διαφορετικά μεγέθη δεδομένων. Η διαδικασία κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί ομοιόμορφα σε διαφορετικά μεγέθη δεδομένων χωρίς σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση. Ο μετασχηματισμός Burrows-Wheeler είναι κλιμακούμενος και μπορεί να χειριστεί διαφορετικά μεγέθη δεδομένων. Ωστόσο, η διαδικασία μετασχηματισμού μπορεί να έχει μικρό αντίκτυπο στην απόδοση για μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων. Η κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης είναι κλιμακούμενη και μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά διαφορετικά μεγέθη δεδομένων. Ο χρόνος συμπίεσης και αποσυμπίεσης εξαρτάται κυρίως από το μήκος των διαδοχικών διαδρομών εντός των δεδομένων.

- Προσαρμοστικότητα:** Ο αλγόριθμος LZW επιδεικνύει καλή προσαρμοστικότητα σε διάφορους τύπους και κατανομές δεδομένων. Η δυναμική φύση του λεξικού συμπίεσης του επιτρέπει να προσαρμόζεται και να αναπαριστά αποτελεσματικά επαναλαμβανόμενα μοτίβα. Η κωδικοποίηση Huffman είναι προσαρμόσιμη σε διάφορους τύπους και κατανομές δεδομένων. Η διαδικασία κωδικοποίησης λαμβάνει υπόψη τη συχνότητα των συμβόλων, επιτρέποντας την αποτελεσματική αναπαράσταση των πιο συχνών συμβόλων. Ο μετασχηματισμός Burrows-Wheeler είναι προσαρμόσιμος σε διαφορετικούς τύπους και κατανομές δεδομένων. Αναδιατάσσει τα δεδομένα για να ομαδοποιήσει παρόμοιους χαρακτήρες, οι οποίοι μπορούν να συλλάβουν αποτελεσματικά τοπικά μοτίβα. Η κωδικοποίηση μήκους διαδρομής προσαρμόζεται σε δεδομένα με διαδοχικές διαδρομές του ίδιου συμβόλου. Μπορεί να κωδικοποιήσει και να αποκωδικοποιήσει αποτελεσματικά τέτοια μοτίβα, καθιστώντας την κατάλληλη για συγκεκριμένες κατανομές δεδομένων.
- Ανθεκτικότητα:** Ο αλγόριθμος LZW επιδεικνύει καλή ανθεκτικότητα στο χειρισμό διαφόρων τύπων δεδομένων και μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά θορυβώδη ή αλλοιωμένα δεδομένα. Διαθέτει ενσωματωμένες δυνατότητες ανίχνευσης σφαλμάτων λόγω της προσέγγισης συμπίεσης βάσει λεξικού, η οποία επιτρέπει την αξιόπιστη ανακατασκευή των αρχικών δεδομένων ακόμη και με την παρουσία σφαλμάτων. Η κωδικοποίηση Huffman είναι ανθεκτική έναντι σφαλμάτων σε κάποιο βαθμό. Αν και δεν διαθέτει ρητούς μηχανισμούς ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων, η στατιστική φύση της κωδικοποίησης επιτρέπει κάποια ανθεκτικότητα στα σφάλματα. Ωστόσο, η απουσία ανίχνευσης ή διόρθωσης σφαλμάτων μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη πιθανότητα αλλοίωσης των δεδομένων, εάν προκύψουν σφάλματα κατά τη μετάδοση. Ο μετασχηματισμός Burrows-Wheeler, από μόνος του, δεν παρέχει ενσωματωμένους μηχανισμούς ανίχνευσης ή διόρθωσης σφαλμάτων. Ωστόσο, όταν συνδυάζεται με άλλες τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων, μπορεί να συμβάλει στη συνολική ευρωστία της μετάδοσης δεδομένων, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη κωδικοποίηση κωδίκων διόρθωσης σφαλμάτων. Η κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης δεν διαθέτει ρητούς μηχανισμούς ανίχνευσης ή διόρθωσης σφαλμάτων.

6.2.3 Αξιολόγηση των στρατηγικών κατανεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης

Για την αξιολόγηση των στρατηγικών κατανεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης και με βάση τα επιλεγμένα κριτήρια αξιολόγησης προκύπτουν τα παρακάτω:

- Χρήση εύρους ζώνης:** Το Content-Centric Networking (CCN) επιδεικνύει αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης, καθώς αξιοποιώντας μηχανισμούς δρομολόγησης και προσωρινής αποθήκευσης με βάση το περιεχόμενο, το CCN ελαχιστοποιεί τις περιττές μεταδόσεις δεδομένων, βελτιστοποιώντας τη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η επιδημική δρομολόγηση, από την άλλη πλευρά, παρουσιάζει υψηλότερη χρήση εύρους ζώνης λόγω της προσέγγισής της που βασίζεται στην πλημμύρα, η οποία διαδίδει δεδομένα σε όλους

τους προσβάσιμους κόμβους. Αυτή η συμπεριφορά πλημμύρας μπορεί να οδηγήσει σε συμφόρηση του δικτύου και αυξημένη κατανάλωση εύρους ζώνης. Η προσωρινή αποθήκευση με βάση τον κατανεμημένο πίνακα κατακερματισμού (DHT) επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης καθώς μειώνει τις περιττές μεταφορές δεδομένων και προωθεί την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση συμβάλλει επίσης στην αποδοτικότητα του εύρους ζώνης επιτρέποντας την τοπική αποθήκευση και ανάκτηση περιεχομένου, μειώνοντας την ανάγκη για απομακρυσμένες μεταφορές δεδομένων.

- Καθυστέρηση:** Το CCN μειώνει την καθυστέρηση επιτρέποντας την προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου σε κοντινότερη απόσταση από τους κόμβους που υποβάλλουν αίτηση. Διευκολύνει την άμεση ανάκτηση περιεχομένου από κοντινές κρυφές μνήμες, ελαχιστοποιώντας τις καθυστερήσεις κυκλικής διαδρομής και βελτιώνοντας τις συνολικές επιδόσεις καθυστέρησης. Αντίθετα, η επιδημική δρομολόγηση μπορεί να εισάγει αυξημένη καθυστέρηση λόγω της διάδοσης που βασίζεται στην πλημμύρα. Η συμπεριφορά πλημμύρας περιλαμβάνει τη διάδοση δεδομένων σε όλους τους κόμβους, με αποτέλεσμα υψηλότερες καθυστερήσεις διάδοσης και πιθανά προβλήματα καθυστέρησης. Η προσωρινή αποθήκευση με βάση το DHT αντιμετωπίζει τα προβλήματα καθυστέρησης παρέχοντας αποτελεσματική αναζήτηση και ανάκτηση περιεχομένου μέσω μηχανισμών κατανεμημένης αποθήκευσης. Ελαχιστοποιεί τις καθυστερήσεις στην πρόσβαση στο επιθυμητό περιεχόμενο. Η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση συμβάλλει επίσης στη μείωση της καθυστέρησης επιτρέποντας την τοπική αποθήκευση και ανάκτηση περιεχομένου, αποφεύγοντας την ανάγκη για απομακρυσμένη ανάκτηση δεδομένων και μειώνοντας τη συνολική καθυστέρηση.
- Ποσοστό σφάλματος πακέτων:** Το CCN παρουσιάζει εγγενή ανθεκτικότητα σε σφάλματα πακέτων μέσω των μηχανισμών ονοματοδοσίας και προσωρινής αποθήκευσης που βασίζονται στο περιεχόμενο. Εάν ένα πακέτο χαθεί ή καταστραφεί κατά τη μετάδοση, το CCN μπορεί να ανακτήσει το περιεχόμενο από εναλλακτικές κρυφές μνήμες ή πηγές, μειώνοντας τον αντίκτυπο των σφαλμάτων πακέτων. Ωστόσο, η επιδημική δρομολόγηση μπορεί να είναι πιο ευάλωτη σε σφάλματα πακέτων λόγω της πλημμυρικής φύσης της. Καθώς τα δεδομένα διαδίδονται σε όλους τους κόμβους, αυξάνεται η πιθανότητα σφαλμάτων ή απωλειών μετάδοσης. Η προσωρινή αποθήκευση με βάση το DHT βελτιώνει το ποσοστό σφαλμάτων πακέτων παρέχοντας πλεονασμό μέσω κατανεμημένης αποθήκευσης. Εάν ένα αντίγραφο της προσωρινής αποθήκευσης είναι κατεστραμμένο ή χαμένο, μπορούν να ανακτηθούν εναλλακτικά αντίγραφα από άλλους κόμβους. Η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση συμβάλλει επίσης στη μείωση των σφαλμάτων πακέτων επιτρέποντας την τοπική αποθήκευση και ανάκτηση περιεχομένου, ελαχιστοποιώντας την εξάρτηση από απομακρυσμένες πηγές και μειώνοντας την πιθανότητα σφαλμάτων κατά τη μετάδοση δεδομένων.

- **Κατανάλωση ενέργειας:** Το CCN προωθεί ενεργειακά αποδοτικές λειτουργίες αξιοποιώντας την προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου και την εντοπισμένη ανάκτηση δεδομένων. Ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για μεταφορές δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, το CCN μειώνει την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Αντίθετα, η επιδημική δρομολόγηση τείνει να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια λόγω της φύσης της που βασίζεται στην πλημμύρα, η οποία περιλαμβάνει τη μετάδοση δεδομένων σε όλους τους κόμβους. Η προσωρινή αποθήκευση με βάση το DHT συμβάλλει στην ενεργειακή αποδοτικότητα επιτρέποντας την τοπική αποθήκευση και ανάκτηση περιεχομένου, μειώνοντας τις ενεργοβόρες μεταφορές δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση εξοικονομεί επίσης ενέργεια διευκολύνοντας την εντοπισμένη αποθήκευση και ανάκτηση περιεχομένου, επιτρέποντας στους κόμβους να έχουν πρόσβαση σε περιεχόμενο από κοντινές κρυφές μνήμες και μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις.
- **Επεκτασιμότητα:** Το CCN παρουσιάζει καλή επεκτασιμότητα, καθώς λειτουργεί με βάση ονόματα περιεχομένου και όχι διευθύνσεις κόμβων. Επιτρέπει την αποτελεσματική δρομολόγηση και ανάκτηση περιεχομένου, επιτρέποντας στο δίκτυο να διαχειρίζεται αυξανόμενο αριθμό κόμβων και αιτήσεων περιεχομένου. Ωστόσο, η επιδημική δρομολόγηση μπορεί να αντιμετωπίσει προκλήσεις κλιμάκωσης καθώς αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου. Η πλημμύρα δεδομένων σε όλους τους κόμβους μπορεί να οδηγήσει σε συμφόρηση του δικτύου και περιορισμούς κλιμάκωσης. Η προσωρινή αποθήκευση με βάση το DHT προσφέρει επεκτασιμότητα μέσω μηχανισμών κατανεμημένης αποθήκευσης και ανάκτησης περιεχομένου. Μπορεί να χειριστεί αυξημένες απαιτήσεις αποθήκευσης και ανάκτησης περιεχομένου καθώς το δίκτυο επεκτείνεται. Η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση υποστηρίζει την επεκτασιμότητα επιτρέποντας την τοπική αποθήκευση και ανάκτηση περιεχομένου, επιτρέποντας σε περισσότερους κόμβους να συμμετέχουν στην προσωρινή αποθήκευση και την κοινή χρήση περιεχομένου, ενισχύοντας την επεκτασιμότητα.
- **Προσαρμοστικότητα:** Το CCN επιδεικνύει προσαρμοστικότητα αξιοποιώντας μηχανισμούς δρομολόγησης και προσωρινής αποθήκευσης βάσει περιεχομένου. Μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά στις αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου και στη διαθεσιμότητα του περιεχομένου, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική παράδοση περιεχομένου. Η επιδημική δρομολόγηση παρουσιάζει περιορισμένη προσαρμοστικότητα, καθώς βασίζεται στη διάδοση με βάση την πλημμύρα. Δύναται να δυσκολευτεί να προσαρμοστεί σε δυναμικές συνθήκες δικτύου και μεταβαλλόμενη διαθεσιμότητα περιεχομένου. Η προσωρινή αποθήκευση με βάση το DHT προσφέρει προσαρμοστικότητα παρέχοντας κατανεμημένη αποθήκευση και ανάκτηση περιεχομένου. Μπορεί να χειριστεί αλλαγές στη διαθεσιμότητα των κόμβων και τη διανομή του περιεχομένου, εξασφαλίζοντας αποτελεσματικές λειτουργίες προσωρινής αποθήκευσης. Η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση επιτρέπει την προσαρμοστικότητα επιτρέποντας στους κόμβους να συνεργάζονται δυναμικά στην αποθήκευση και ανάκτηση περιεχομένου. Μπορεί να

προσαρμόζεται στις αλλαγές στη διαθεσιμότητα των κόμβων και στη ζήτηση περιεχομένου, ενισχύοντας την προσαρμοστικότητα.

- **Ανθεκτικότητα:** Το CCN παρουσιάζει ανθεκτικότητα με τη χρήση προσωρινής αποθήκευσης περιεχομένου και αποκεντρωμένης ανάκτησης περιεχομένου. Εάν ένας κόμβος ή μια κρυφή μνήμη δεν είναι διαθέσιμος, το CCN μπορεί να ανακτήσει το περιεχόμενο από εναλλακτικές κρυφές μνήμες ή πηγές, εξασφαλίζοντας συνεχή διαθεσιμότητα περιεχομένου. Η επιδημική δρομολόγηση αντιμετωπίζει προκλήσεις όσον αφορά την ευρωστία, καθώς βασίζεται στη διάδοση με βάση την πλημμύρα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ή διακοπή δεδομένων εάν οι κόμβοι αποτύχουν ή γίνουν μη προσβάσιμοι. Η προσωρινή αποθήκευση με βάση το DHT ενισχύει την ευρωστία μέσω της κατανομημένης αποθήκευσης περιεχομένου. Ακόμη και αν μια κρυφή μνήμη ή ένας κόμβος καταστεί μη διαθέσιμος, άλλοι κόμβοι μπορούν να παρέχουν εναλλακτικά αντίγραφα του περιεχομένου. Η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση συμβάλλει επίσης στην ευρωστία επιτρέποντας την τοπική αποθήκευση και ανάκτηση περιεχομένου. Εάν μια κρυφή μνήμη ή ένας κόμβος καταστεί μη διαθέσιμος, οι κοντινές κρυφές μνήμες μπορούν να παράσχουν το ζητούμενο περιεχόμενο, εξασφαλίζοντας ισχυρή διαθεσιμότητα περιεχομένου.

6.2.4 Αξιολόγηση των υβριδικών μεθόδων ενσύρματου – ασύρματου δικτύου

Για την αξιολόγηση των υβριδικών μεθόδων ενσύρματου – ασύρματου δικτύου και με βάση τα επιλεγμένα κριτήρια αξιολόγησης προκύπτουν τα παρακάτω:

- **Χρήση εύρους ζώνης:** Η υβριδική αυτόματη αίτηση επανάληψης (HARQ) είναι αποτελεσματική στη χρήση του εύρους ζώνης με τη χρήση τεχνικών διόρθωσης σφαλμάτων και αναμεταδόσεων. Ελαχιστοποιεί τις περιττές αναμεταδόσεις, επανεκπέμποντας επιλεκτικά μόνο τα κατεστραμμένα πακέτα, βελτιστοποιώντας έτσι τη χρήση του εύρους ζώνης. Η δυναμική επιλογή δικτύου (DNS) επικεντρώνεται στην επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής δικτύου με βάση τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου. Με τη δυναμική προσαρμογή της διαδρομής δικτύου, στοχεύει στη βελτιστοποίηση της χρήσης του εύρους ζώνης. Η μετάδοση πολλαπλών μονοπατιών χρησιμοποιεί πολλαπλές παράλληλες διαδρομές για τη διανομή δεδομένων, επιτρέποντας την αποτελεσματική αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Με την κατανομή των δεδομένων σε πολλαπλές διαδρομές, αυξάνει τη συνολική απόδοση και βελτιστοποιεί τη χρήση του εύρους ζώνης.
- **Καθυστέρηση:** Το HARQ εισάγει καθυστέρηση λόγω της ανάγκης για αναμεταδόσεις. Όταν συμβαίνουν σφάλματα, ο αποστολέας πρέπει να περιμένει τον παραλήπτη να ζητήσει επαναμετάδοση, προκαλώντας πρόσθετες καθυστερήσεις. Ωστόσο, οι μηχανισμοί HARQ είναι σχεδιασμένοι για να ελαχιστοποιούν την καθυστέρηση με τον γρήγορο εντοπισμό και τη διόρθωση των σφαλμάτων, μειώνοντας τον αντίκτυπο στη συνολική καθυστέρηση. Ο DNS στοχεύει στη μείωση της καθυστέρησης επιλέγοντας δυναμικά την πιο βέλτιστη διαδρομή δικτύου. Επιλέγοντας μονοπάτια με χαμηλότερη καθυστέρηση, το DNS μειώνει

τη συνολική καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων. Η μετάδοση πολλαπλών μονοπατιών μπορεί ενδεχομένως να μειώσει την καθυστέρηση με την κατανομή των δεδομένων σε πολλαπλά μονοπάτια, επιτρέποντας την παράλληλη μετάδοση δεδομένων και μειώνοντας το συνολικό χρόνο που απαιτείται για την παράδοση των δεδομένων.

- **Ποσοστό σφάλματος πακέτων:** Το HARQ είναι αποτελεσματικό στη μείωση των σφαλμάτων πακέτων με τη χρήση μηχανισμών διόρθωσης σφαλμάτων και αναμεταδόσεων. Όταν συμβαίνουν σφάλματα, το HARQ ζητά επαναμετάδοση συγκεκριμένων πακέτων, βελτιώνοντας το ποσοστό σφάλματος πακέτου. Το DNS δεν επηρεάζει άμεσα το ποσοστό σφάλματος πακέτων, καθώς επικεντρώνεται στην επιλογή διαδρομής δικτύου και όχι στη διόρθωση σφαλμάτων. Ωστόσο, επιλέγοντας αξιόπιστα μονοπάτια δικτύου, συμβάλλει έμμεσα στη μείωση των σφαλμάτων πακέτων. Η μετάδοση πολλαπλών μονοπατιών μπορεί να βελτιώσει το ποσοστό σφαλμάτων πακέτων με τη χρήση πολλαπλών παράλληλων μονοπατιών. Εάν ένα μονοπάτι παρουσιάζει σφάλματα ή συμφόρηση, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν μέσω εναλλακτικών μονοπατιών, μειώνοντας το συνολικό ποσοστό σφάλματος πακέτου.
- **Κατανάλωση ενέργειας:** Το HARQ μπορεί να καταναλώνει πρόσθετη ενέργεια λόγω της ανάγκης για επαναμεταδόσεις. Η διαδικασία εντοπισμού σφαλμάτων, η αίτηση επαναμετάδοσης και η εκ νέου αποστολή πακέτων αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Το DNS επικεντρώνεται στην επιλογή διαδρομής και δεν επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, επιλέγοντας αποδοτικές διαδρομές δικτύου, μπορεί να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ελαχιστοποιώντας το χρόνο και τους πόρους που απαιτούνται για τη μετάδοση δεδομένων. Η μετάδοση πολλαπλών μονοπατιών μπορεί να καταναλώσει πρόσθετη ενέργεια, καθώς περιλαμβάνει τη μετάδοση δεδομένων μέσω πολλαπλών μονοπατιών ταυτόχρονα. Η χρήση πολλαπλών μονοπατιών αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας, αλλά μπορεί να μετριαστεί με έξυπνους αλγορίθμους δρομολόγησης και μηχανισμούς ενεργειακά αποδοτικής μετάδοσης.
- **Επεκτασιμότητα:** Το HARQ παρουσιάζει καλά επίπεδα επεκτασιμότητας, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες αρχιτεκτονικές δικτύων και μπορεί να διαχειριστεί τις αυξανόμενες απαιτήσεις μετάδοσης δεδομένων. Είναι μια ευρέως υιοθετημένη τεχνική που μπορεί να ενσωματωθεί απρόσκοπτα στα υπάρχοντα συστήματα επικοινωνίας. Το DNS προσφέρει επεκτασιμότητα επιλέγοντας δυναμικά μονοπάτια δικτύου με βάση τις τρέχουσες συνθήκες. Μπορεί να προσαρμοστεί σε μεταβαλλόμενες τοπολογίες δικτύου και να εξυπηρετήσει τις αυξανόμενες απαιτήσεις μετάδοσης δεδομένων. Η μετάδοση πολλαπλών μονοπατιών μπορεί να αντιμετωπίσει προκλήσεις κλιμάκωσης, καθώς απαιτεί συντονισμό και συγχρονισμό μεταξύ πολλαπλών μονοπατιών. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των παράλληλων μονοπατιών, η πολυπλοκότητα της διαχείρισης και του συντονισμού τους μπορεί να περιορίσει την επεκτασιμότητα.

- Προσαρμοστικότητα:** Το HARQ επιδεικνύει προσαρμοστικότητα προσαρμόζοντας τη στρατηγική μετάδοσης με βάση την ανατροφοδότηση σφαλμάτων. Προσαρμόζεται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου και βελτιστοποιεί τη μετάδοση δεδομένων για τη βελτίωση της συνολικής αξιοπιστίας. Το DNS επιδεικνύει προσαρμοστικότητα επιλέγοντας δυναμικά μονοπάτια δικτύου με βάση τις τρέχουσες συνθήκες, όπως η ποιότητα της σύνδεσης, η συμφόρηση ή η διαθεσιμότητα. Μπορεί να προσαρμοστεί στις μεταβολές των συνθηκών του δικτύου για να εξασφαλίσει αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων. Η μετάδοση πολλαπλών μονοπατιών παρουσιάζει προσαρμοστικότητα χρησιμοποιώντας πολλαπλά μονοπάτια και προσαρμόζοντας δυναμικά τη διανομή δεδομένων με βάση τις συνθήκες του δικτύου. Μπορεί να προσαρμοστεί σε μεταβαλλόμενη ποιότητα σύνδεσης ή διαθεσιμότητα διαδρομής, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων.
- Ανθεκτικότητα:** HARQ ενισχύει την ανθεκτικότητα με τη χρήση μηχανισμών διόρθωσης σφαλμάτων. Μπορεί να ανακάμψει από σφάλματα πακέτων και να εξασφαλίσει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων ακόμη και παρουσία διαταραχών του δικτύου. DNS ενισχύει την ανθεκτικότητα επιλέγοντας δυναμικά την πιο βέλτιστη διαδρομή δικτύου. Μπορεί να προσαρμοστεί σε βλάβες του δικτύου ή αλλαγές στις συνθήκες σύνδεσης, εξασφαλίζοντας συνεχή μετάδοση δεδομένων. Η μετάδοση πολλαπλών μονοπατιών βελτιώνει την ανθεκτικότητα με τη χρήση πολλαπλών παράλληλων μονοπατιών. Εάν ένα μονοπάτι καταστεί μη διαθέσιμο ή παρουσιάσει διαταραχές, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν μέσω εναλλακτικών μονοπατιών, διατηρώντας τη συνδεσιμότητα των δεδομένων και την ανθεκτικότητα.

6.2.5 Αξιολόγηση της δικτύωσης καθορισμένης από λογισμικό (SDN)

Για την αξιολόγηση των μεθόδων τμηματοποίησης ΜΔ και παράλληλης μετάδοσης και με βάση τα επιλεγμένα κριτήρια αξιολόγησης προκύπτουν τα παρακάτω:

- Χρήση εύρους ζώνης:** Η δρομολόγηση καθορισμένου λογισμικού έχει σχεδιαστεί για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του εύρους ζώνης με τη δυναμική προσαρμογή των διαδρομών του δικτύου βάσει των συνθηκών πραγματικού χρόνου. Μπορεί να δρομολογήσει έξυπνα την κυκλοφορία μέσω λιγότερο συμφορημένων μονοπατιών, μεγιστοποιώντας τη χρήση του εύρους ζώνης. Η δρομολόγηση QoS δίνει προτεραιότητα στην κυκλοφορία βάσει προκαθορισμένων απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας, διασφαλίζοντας ότι τα κρίσιμα δεδομένα λαμβάνουν επαρκές εύρος ζώνης, ενώ η λιγότερο σημαντική κυκλοφορία λαμβάνει λιγότερους πόρους. Η μηχανική κυκλοφορίας (TE) επικεντρώνεται στην αποτελεσματική κατανομή πόρων και δρομολόγηση για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του εύρους ζώνης στην υποδομή δικτύου. Το AMC προσαρμόζει δυναμικά τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης με βάση τις συνθήκες του καναλιού για τη μεγιστοποίηση των ρυθμών δεδομένων και της φασματικής απόδοσης, αξιοποιώντας έτσι αποτελεσματικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

- **Καθυστέρηση:** Η δρομολόγηση καθορισμένη από λογισμικό στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης επιλέγοντας έξυπνα τις βέλτιστες διαδρομές με βάση τις συνθήκες πραγματικού χρόνου, αποφεύγοντας τις υπερφορτωμένες συνδέσεις ή τις συνδέσεις υψηλής καθυστέρησης. Η δρομολόγηση QoS θεωρεί την καθυστέρηση ως μία από τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας και διασφαλίζει ότι η ευαίσθητη στον χρόνο κυκλοφορία δρομολογείται κατά προτεραιότητα, μειώνοντας την καθυστέρηση για κρίσιμες εφαρμογές. Το TE βελτιστοποιεί τα μονοπάτια και τους πόρους του δικτύου για την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων. Το AMC μπορεί να συμβάλει στη μείωση της καθυστέρησης προσαρμόζοντας τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης στις συνθήκες του καναλιού, βελτιώνοντας τη συνολική ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων.
- **Ποσοστό σφάλματος πακέτων:** Η δρομολόγηση καθορισμένη από λογισμικό δεν επηρεάζει άμεσα τον ρυθμό σφαλμάτων πακέτων, καθώς επικεντρώνεται στην επιλογή διαδρομής και τη βελτιστοποίηση του δικτύου. Η δρομολόγηση QoS μπορεί να επηρεάσει έμμεσα το ποσοστό σφαλμάτων πακέτων, δίνοντας προτεραιότητα σε μονοπάτια υψηλής ποιότητας για κρίσιμη κυκλοφορία, μειώνοντας την πιθανότητα σφαλμάτων πακέτων. Η τεχνική διαχείρισης της κυκλοφορίας βελτιστοποιεί τους πόρους του δικτύου, η οποία συμβάλλει έμμεσα στη μείωση του ποσοστού σφαλμάτων πακέτων ελαχιστοποιώντας τη συμφόρηση και βελτιώνοντας την ποιότητα μετάδοσης δεδομένων. Το AMC μπορεί να βελτιώσει το ποσοστό σφαλμάτων πακέτων προσαρμόζοντας δυναμικά τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης με βάση τις συνθήκες του καναλιού, ενισχύοντας την αξιοπιστία των δεδομένων.
- **Κατανάλωση ενέργειας:** Η καθοριζόμενη από λογισμικό δρομολόγηση μπορεί να συμβάλει στην ενεργειακή απόδοση επιλέγοντας δυναμικά ενεργειακά αποδοτικές διαδρομές και αποφεύγοντας κόμβους ή συνδέσεις που καταναλώνουν ενέργεια. Μπορεί να βελτιστοποιήσει τη χρήση των πόρων του δικτύου, οδηγώντας σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Η δρομολόγηση QoS θεωρεί την ενεργειακή απόδοση ως μία από τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσιών και διασφαλίζει ότι οι αποφάσεις δρομολόγησης λαμβάνουν υπόψη την κατανάλωση ενέργειας. Η μηχανική κίνησης στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας με τη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων και της επιλογής διαδρομής. Η AMC, ως τεχνική διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, δεν επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση ενέργειας, αλλά μπορεί να επηρεάσει έμμεσα την ενεργειακή απόδοση βελτιώνοντας τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και μειώνοντας το χρόνο μετάδοσης.
- **Επεκτασιμότητα:** Η δρομολόγηση καθορισμένη από λογισμικό προσφέρει επεκτασιμότητα παρέχοντας ένα κεντρικό επίπεδο ελέγχου για τη διαχείριση του δικτύου. Απλοποιεί τη διαχείριση του δικτύου, διευκολύνοντας την κλιμάκωση και τη διαχείριση μεγάλων δικτύων. Η δρομολόγηση QoS υποστηρίζει την επεκτασιμότητα, προσαρμόζοντας τις αποφάσεις δρομολόγησης στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και απαιτήσεις του δικτύου.

Μπορεί να φιλοξενήσει την αυξημένη κυκλοφορία και να προσαρμόσει δυναμικά την κατανομή των πόρων. Το TE εστιάζει στον κλιμακούμενο σχεδιασμό του δικτύου και τη διαχείριση των πόρων για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων απαιτήσεων και την προσαρμογή στην επέκταση του δικτύου. Η AMC, ως τεχνική διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, δεν επηρεάζει άμεσα την επεκτασιμότητα, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί σε μια επεκτάσιμη υποδομή δικτύου.

- **Προσαρμοστικότητα:** Η δρομολόγηση που καθορίζεται από λογισμικό παρουσιάζει υψηλή προσαρμοστικότητα, επιτρέποντας ευέλικτη διαμόρφωση και έλεγχο του δικτύου. Μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου, στα πρότυπα κίνησης και στις απαιτήσεις των εφαρμογών. Η δρομολόγηση QoS επιδεικνύει προσαρμοστικότητα με την ιεράρχηση και δρομολόγηση της κυκλοφορίας βάσει παραμέτρων QoS σε πραγματικό χρόνο, προσαρμοζόμενη στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της κυκλοφορίας. Το TE επιδεικνύει προσαρμοστικότητα προσαρμόζοντας δυναμικά τις διαδρομές και τους πόρους του δικτύου με βάση τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Το AMC επιδεικνύει προσαρμοστικότητα προσαρμόζοντας σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης με βάση τις συνθήκες του καναλιού για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων σε ποικίλα περιβάλλοντα.
- **Ανθεκτικότητα:** Η δρομολόγηση καθορισμένη από λογισμικό ενισχύει την ανθεκτικότητα του δικτύου επιτρέποντας την ταχεία αναδιαμόρφωση του δικτύου και την ανοχή σε σφάλματα. Μπορεί να ανακατευθύνει την κυκλοφορία και να προσαρμόζεται δυναμικά σε βλάβες του δικτύου, εξασφαλίζοντας συνεχή συνδεσιμότητα. Η δρομολόγηση QoS βελτιώνει την ανθεκτικότητα παρέχοντας διαφοροποιημένη δρομολόγηση για διαφορετικές κατηγορίες κυκλοφορίας, διασφαλίζοντας ότι η κρίσιμη κυκλοφορία είναι ανθεκτική στις διαταραχές του δικτύου. Το TE ενισχύει την ανθεκτικότητα βελτιστοποιώντας τις διαδρομές και τους πόρους του δικτύου για την αντιμετώπιση αποτυχιών και συμφόρησης, διατηρώντας τη συνδεσιμότητα δεδομένων. Το AMC συμβάλλει στην ανθεκτικότητα με την προσαρμογή των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης στις συνθήκες του καναλιού, βελτιώνοντας την αξιοπιστία των δεδομένων και την ανθεκτικότητα στις παρεμβολές.

6.3 Συζήτηση των ευρημάτων

Συλλέγοντας όλα τα δεδομένα και αξιολογώντας τις διάφορες μεθόδους αποδοτικής μετάδοσης ΜΔ στα ασύρματα δίκτυα προκύπτουν τα παρακάτω για κάθε κατηγορία:

- **Τμηματοποίηση ΜΔ και παράλληλη μετάδοση:** Η τμηματοποίηση βάσει κατακερματισμού υπερέχει όσον αφορά τη χρήση εύρους ζώνης και την προσαρμοστικότητα, ενώ η τμηματοποίηση βάσει εύρους προσφέρει πλεονεκτήματα όσον αφορά την καθυστέρηση, το ποσοστό σφάλματος πακέτων και την ανθεκτικότητα. Η

τμηματοποίηση Round-Robin παρέχει απλότητα αλλά μπορεί να έχει περιορισμούς όσον αφορά την καθυστέρηση, την επεκτασιμότητα και την προσαρμοστικότητα.

- **Τεχνικές συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων:** Ο αλγόριθμος LZW και η κωδικοποίηση Huffman υπερέχουν όσον αφορά τη χρήση εύρους ζώνης, την προσαρμοστικότητα και την επεκτασιμότητα. Ο μετασχηματισμός Burrows-Wheeler παρέχει πλεονεκτήματα όσον αφορά τη χρήση του εύρους ζώνης, την καθυστέρηση και την προσαρμοστικότητα. Η κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης προσφέρει απλότητα, χαμηλή καθυστέρηση και ενεργειακή απόδοση.
- **Στρατηγικές κατανεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης:** Συνοπτικά, η CCN και η DHT επιδεικνύουν πλεονεκτήματα όσον αφορά τη χρήση του εύρους ζώνης, την καθυστέρηση, το ποσοστό σφάλματος πακέτων, την κατανάλωση ενέργειας, την επεκτασιμότητα, την προσαρμοστικότητα και την ανθεκτικότητα. Η επιδημική δρομολόγηση, αν και απλή στην προσέγγισή της, μπορεί να έχει περιορισμούς όσον αφορά τη χρήση του εύρους ζώνης, την καθυστέρηση και την προσαρμοστικότητα. Η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση, αν και επωφελής για τη χρήση του εύρους ζώνης και την καθυστέρηση, μπορεί να αντιμετωπίσει προκλήσεις όσον αφορά το ποσοστό σφαλμάτων πακέτων και την προσαρμοστικότητα.
- **Υβριδικές λύσεις ενσύρματου-ασύρματου δικτύου:** Το HARQ είναι αποτελεσματικό όσον αφορά τη χρήση του εύρους ζώνης, τη μείωση του ποσοστού σφάλματος πακέτων και την προσαρμοστικότητα, αλλά μπορεί να εισάγει καθυστέρηση και να καταναλώνει πρόσθετη ενέργεια. Το DNS επικεντρώνεται στη μείωση της καθυστέρησης, την προσαρμοστικότητα και την ανθεκτικότητα, ενώ η μετάδοση πολλαπλών διαδρομών υπερέχει στη χρήση εύρους ζώνης, τη μείωση της καθυστέρησης και την ανθεκτικότητα.
- **Δικτύωση καθορισμένη από λογισμικό (SDN):** Η δρομολόγηση καθορισμένη από λογισμικό υπερέχει στη χρήση εύρους ζώνης και στην προσαρμοστικότητα. Η δρομολόγηση QoS επικεντρώνεται στην καθυστέρηση, το ποσοστό σφαλμάτων πακέτων και την κατανάλωση ενέργειας. Το TE δίνει έμφαση στην επεκτασιμότητα και την ανθεκτικότητα. Το AMC βελτιώνει τη χρήση εύρους ζώνης, την καθυστέρηση και το ποσοστό σφάλματος πακέτων.

Κατά τη σύγκριση των μεθοδολογιών και αλγορίθμων που εξετάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα όσο αφορά την αποτελεσματική μετάδοση ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα, μπορούν να γίνουν διάφορες βασικές παρατηρήσεις. Πρώτον, όσον αφορά τη χρήση του εύρους ζώνης, οι μέθοδοι τμηματοποίησης ΜΔ και παράλληλης μετάδοσης επιδεικνύουν αποδοτική χρήση με το διαχωρισμό των δεδομένων σε μικρότερα υποσύνολα και τη δυνατότητα παράλληλης μετάδοσης. Από την άλλη πλευρά, οι τεχνικές συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων διαφέρουν ως προς την απόδοσή τους. Η κωδικοποίηση Huffman ξεχωρίζει για την αποτελεσματική κωδικοποίηση συχνών

συμβόλων, ενώ ο αλγόριθμος LZW και η BWT προσφέρουν προσαρμοστικότητα και επεκτασιμότητα.

Όσον αφορά την καθυστέρηση, οι μέθοδοι τμηματοποίησης ΜΔ, όπως η τμηματοποίηση βάσει εύρους, παρέχουν χαμηλότερη καθυστέρηση λόγω της διαδοχικής φύσης των υποσυνόλων δεδομένων. Ομοίως, τεχνικές συμπίεσης δεδομένων όπως η κωδικοποίηση Huffman και η RLE συμβάλλουν στη μείωση της καθυστέρησης ελαχιστοποιώντας το μέγεθος των μεταδιδόμενων δεδομένων. Οι στρατηγικές κατανεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης, όπως το CCN και η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση, βελτιστοποιούν την καθυστέρηση χρησιμοποιώντας τοπική προσωρινή αποθήκευση και προσεγγίσεις επικεντρωμένες στο περιεχόμενο. Οι υβριδικές μέθοδοι ενσύρματου-ασύρματου δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των HARQ και της μετάδοσης πολλαπλών διαδρομών, αντιμετωπίζουν επίσης τις ανησυχίες σχετικά με την καθυστέρηση, επιτρέποντας την ανίχνευση και την επαναμετάδοση σφαλμάτων και χρησιμοποιώντας πολλαπλές διαδρομές για τη μετάδοση δεδομένων. Οι μέθοδοι δικτύωσης που καθορίζονται από λογισμικό (SDN), όπως η δρομολόγηση QoS και η μηχανική της κυκλοφορίας, συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της καθυστέρησης μέσω της δυναμικής διαχείρισης της κυκλοφορίας και της αποδοτικής δρομολόγησης.

Για το ποσοστό σφάλματος πακέτων η τμηματοποίηση με βάση το Hash, ο αλγόριθμος LZW και η BWT επιδεικνύουν ανθεκτικότητα ως προς την ικανότητά τους να χειρίζονται σφάλματα και να διατηρούν την ακεραιότητα των δεδομένων. Ομοίως, οι στρατηγικές κατανεμημένης αποθήκευσης, όπως η προσωρινή αποθήκευση με βάση το DHT και η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση, προσφέρουν ανθεκτικότητα μέσω μηχανισμών κατανεμημένης αποθήκευσης και ανάκτησης δεδομένων. Οι υβριδικές μέθοδοι ενσύρματου-ασύρματου δικτύου, όπως το HARQ, συμβάλλουν στη μείωση των σφαλμάτων και ενισχύουν την ανθεκτικότητα.

Όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας η τμηματοποίηση ΜΔ και οι μέθοδοι παράλληλης μετάδοσης μπορούν να συμβάλουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα επιτρέποντας την παράλληλη επεξεργασία και μειώνοντας το συνολικό χρόνο μετάδοσης. Ορισμένες τεχνικές συμπίεσης δεδομένων, όπως η κωδικοποίηση Huffman και η RLE, απαιτούν λιγότερους υπολογιστικούς πόρους, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, οι στρατηγικές κατανεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης, οι υβριδικές μέθοδοι ενσύρματου-ασύρματου δικτύου και οι προσεγγίσεις SDN ενδέχεται να απαιτούν πρόσθετους πόρους για τη διατήρηση κατανεμημένης αποθήκευσης, πολλαπλών διαδρομών και δυναμικής διαχείρισης της κυκλοφορίας, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας.

Όσο αφορά την επεκτασιμότητα η τμηματοποίηση ΜΔ και οι μέθοδοι παράλληλης μετάδοσης προσφέρουν καλή επεκτασιμότητα με τη διαίρεση των δεδομένων σε μικρότερα υποσύνολα, επιτρέποντας την αποτελεσματική διανομή μεταξύ των παράλληλων καναλιών. Οι τεχνικές συμπίεσης δεδομένων, όπως ο αλγόριθμος LZW και η BWT, παρουσιάζουν επεκτασιμότητα στον αποτελεσματικό χειρισμό διαφορετικών τύπων δεδομένων. Οι στρατηγικές κατανεμημένης αποθήκευσης, όπως το CCN και η προσωρινή αποθήκευση με βάση το DHT, παρέχουν επεκτασιμότητα μέσω των κατανεμημένων προσεγγίσεών τους. Οι μέθοδοι SDN προσφέρουν επεκτασιμότητα επιτρέποντας τη δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας και την κατανομή των πόρων.

Όσον αφορά την προσαρμοστικότητα οι μέθοδοι τμηματοποίησης ΜΔ, όπως η τμηματοποίηση με βάση το εύρος και η τμηματοποίηση Round-Robin προσφέρουν προσαρμοστικότητα όσον αφορά το χειρισμό διαφορετικών μεγεθών και κατανομών δεδομένων. Οι τεχνικές συμπίεσης δεδομένων όπως ο αλγόριθμος LZW και η BWT είναι προσαρμόσιμες σε διάφορους τύπους δεδομένων. Οι στρατηγικές κατανεμημένης αποθήκευσης όπως το CCN και η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση επιδεικνύουν προσαρμοστικότητα μέσω των συνεργατικών προσεγγίσεών τους. Οι μέθοδοι SDN επιτρέπουν την προσαρμοστικότητα μέσω της δυναμικής διαχείρισης της κυκλοφορίας και των πόρων με βάση τις συνθήκες του δικτύου.

Τέλος, οι μέθοδοι τμηματοποίησης ΜΔ και παράλληλης μετάδοσης προσφέρουν ανθεκτικότητα μέσω της ικανότητάς τους να χειρίζονται την τμηματοποίηση δεδομένων και να ανακάμπτουν από σφάλματα μετάδοσης. Οι τεχνικές συμπίεσης δεδομένων συμβάλλουν στην ανθεκτικότητα με τη χρήση σχημάτων κωδικοποίησης που μπορούν να χειριστούν διακυμάνσεις και σφάλματα στα μεταδιδόμενα δεδομένα. Οι στρατηγικές κατανεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης εξασφαλίζουν ανθεκτικότητα με την κατανομή των δεδομένων σε πολλαπλούς κόμβους και κρυφές μνήμες, επιτρέποντας την ανάκτηση από εναλλακτικές πηγές σε περίπτωση σφαλμάτων. Οι υβριδικές μέθοδοι ενσύρματων-ασύρματων δικτύων ενισχύουν την ανθεκτικότητα μέσω μηχανισμών όπως η αναμετάδοση, η δυναμική επιλογή δικτύου και η μετάδοση πολλαπλών διαδρομών. Οι μέθοδοι δικτύωσης καθορισμένου λογισμικού (SDN) παρέχουν ανθεκτικότητα με τη δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας, των πόρων και των διαμορφώσεων του δικτύου. Η εξέταση του επιθυμητού επιπέδου ανθεκτικότητας είναι ζωτικής σημασίας κατά την επιλογή μιας μεθοδολογίας ή ενός αλγορίθμου για τη μετάδοση μεγάλων δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα.

Συνοψίζοντας, οι κατηγορίες που αξιολογήθηκαν διαφέρουν ως προς τις επιδόσεις τους στα επιλεγμένα κριτήρια. Κάθε κατηγορία έχει τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία της και η επιλογή της μεθοδολογίας ή του αλγορίθμου εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και προτεραιότητες του περιβάλλοντος του ασύρματου δικτύου. Ο συνδυασμός διαφόρων τεχνικών μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την αποτελεσματική μετάδοση ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα. Κάθε τεχνική φέρνει μοναδικά πλεονεκτήματα και δυνατότητες που, όταν ενσωματώνονται, δημιουργούν ένα πιο ισχυρό και αποδοτικό σύστημα μετάδοσης.

7

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία που επικεντρώθηκε στην επίτευξη αποδοτικής μετάδοσης σε ασύρματα δίκτυα με τη χρήση ΜΔ, προέκυψαν διάφορα βασικά συμπεράσματα. Πρώτον, η σε βάθος διερεύνηση των ΜΔ ανέδειξε τη σημασία τους και τις προκλήσεις που θέτουν σε περιβάλλοντα ασύρματων δικτύων. Η κατανόηση της φύσης των ΜΔ και των επιπτώσεών τους είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών μετάδοσης.

Η ανάλυση των ασύρματων δικτύων αποκάλυψε τις πολυπλοκότητες που συνεπάγεται η ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Παράγοντες όπως το περιορισμένο εύρος ζώνης, η καθυστέρηση και η πιθανότητα σφαλμάτων πακέτων θέτουν σημαντικά εμπόδια. Οι προκλήσεις αυτές αναλύθηκαν εκτενώς και εντοπίστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτική μετάδοση ΜΔ στα ασύρματα δίκτυα.

Στην συνέχεια και στο κύριο κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάστηκαν οι μεθοδολογίες και οι αλγόριθμοι που συμβάλλουν στην αποδοτική μετάδοση των ΜΔ, καθώς και υλοποιήθηκε η σύγκριση απόδοσης μεταξύ των διάφορων μεθόδων και με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Διερευνήθηκαν διάφορες τεχνικές, όπως η τμηματοποίηση δεδομένων, η συμπίεση, η κωδικοποίηση, η καταναεμημένη αποθήκευση, η προσωρινή αποθήκευση, οι υβριδικές λύσεις ενσύρματης-ασύρματης επικοινωνίας και η δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό. Αυτές οι τεχνικές αξιολογήθηκαν με βάση βασικά κριτήρια: χρήση εύρους ζώνης, καθυστέρηση, ρυθμός σφάλματος πακέτων, κατανάλωση ενέργειας, επεκτασιμότητα, προσαρμοστικότητα και ανθεκτικότητα.

Μέσω θεωρητικής ανάλυσης και συγκρίσεων επιδόσεων, έγιναν εμφανή τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί κάθε τεχνικής. Η αξιολόγηση αποκάλυψε ότι ορισμένες μέθοδοι υπερείχαν σε συγκεκριμένους τομείς. Οι τεχνικές συμπίεσης και κωδικοποίησης δεδομένων, όπως ο αλγόριθμος Lempel-Ziv-Welch (LZW), η κωδικοποίηση Huffman, ο μετασχηματισμός Burrows-Wheeler (BWT) και η κωδικοποίηση μήκους εκτέλεσης (RLE), επέδειξαν αποτελεσματικότητα στη χρήση του εύρους ζώνης και στην κατανάλωση ενέργειας. Από την άλλη, οι στρατηγικές καταναεμημένης αποθήκευσης και προσωρινής αποθήκευσης, όπως το Content-Centric Networking (CCN) και η προσωρινή αποθήκευση με βάση τον Distributed Hash Table (DHT), επέδειξαν επεκτασιμότητα και

προσαρμοστικότητα. Επιπλέον, οι υβριδικές μέθοδοι ενσύρματου-ασύρματου δικτύου και η δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό (SDN) έδειξαν πολλά υποσχόμενες δυνατότητες για την επίτευξη αποδοτικής μετάδοσης. Αυτές οι προσεγγίσεις παρουσίασαν αξιοσημείωτες βελτιώσεις στην καθυστέρηση, το ποσοστό σφάλματος πακέτων και την προσαρμοστικότητα.

Τα ευρήματα της παρούσας διπλωματικής υπογράμμισαν τη σημασία της εξέτασης πολλαπλών τεχνικών και των αντίστοιχων πλεονεκτημάτων τους προκειμένου να ενισχυθεί η αποτελεσματική μετάδοση ΜΔ σε ασύρματα δίκτυα. Με την αξιοποίηση του σωστού συνδυασμού μεθοδολογιών, καθίσταται δυνατή η αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτουν οι διάφοροι περιορισμοί μετάδοσης δεδομένων. Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από την παρούσα έρευνα μπορούν να καθοδηγήσουν τις μελλοντικές προσπάθειες για την επιλογή και την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένα σενάρια δικτύων και απαιτήσεις εφαρμογών, προωθώντας τελικά τον τομέα της αποδοτικής μετάδοσης σε ασύρματα δίκτυα για εφαρμογές μεγάλων δεδομένων.

7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η παρούσα διατριβή ανοίγει διάφορους δρόμους για μελλοντική ανάλυση και επέκταση στον τομέα της αποδοτικής μετάδοσης σε ασύρματα δίκτυα με τη χρήση μεγάλων δεδομένων. Με βάση τα βασικά ευρήματα και τις γνώσεις που αποκτήθηκαν, θα μπορούσαν να διερευνηθούν οι ακόλουθοι τομείς:

- **Βελτιστοποίηση επιδόσεων:** Μπορεί να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των τεχνικών που αξιολογήθηκαν. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη λεπτομερή ρύθμιση των παραμέτρων, τη διερεύνηση νέων αλγορίθμων ή τον συνδυασμό πολλαπλών προσεγγίσεων για την επίτευξη ακόμη καλύτερων αποτελεσμάτων όσον αφορά τους περιορισμούς μετάδοσης.
- **Εξέταση του επιπέδου ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής:** Δεδομένης της ευαίσθητης φύσης των ΜΔ στα ασύρματα δίκτυα, είναι ζωτικής σημασίας η αντιμετώπιση των ζητημάτων ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εμβαθύνει στην ανάλυση ισχυρών μηχανισμών ασφαλείας και τεχνικών κρυπτογράφησης στη διαδικασία μετάδοσης.
- **Εφαρμογές σε πραγματικό κόσμο:** Ενώ η παρούσα διατριβή επικεντρώθηκε στη θεωρητική ανάλυση και τις συγκρίσεις, οι μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν πρακτικές υλοποιήσεις και εμπειρικές αξιολογήσεις των προτεινόμενων τεχνικών. Οι δοκιμές και ο πειραματισμός σε πραγματικό κόσμο θα παρείχαν πολύτιμες γνώσεις σχετικά με την απόδοση αυτών των μεθοδολογιών σε πρακτικά σενάρια, λαμβάνοντας υπόψη πραγματικά σύνολα δεδομένων και συνθήκες δικτύου.
- **Μηχανική μάθηση και τεχνητή νοημοσύνη:** Με τον αυξανόμενο ρόλο της μηχανικής μάθησης και της τεχνητής νοημοσύνης σε διάφορους τομείς, η πιθανή ενσωμάτωσή τους σε

αποτελεσματικές μεθόδους μετάδοσης χρήζει διερεύνησης. Η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να βελτιστοποιήσουν την τμηματοποίηση των δεδομένων, τη συμπίεση ή τις αποφάσεις δρομολόγησης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε σημαντικές βελτιώσεις της συνολικής απόδοσης.

- **Περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους:** Η ανάλυση που παρουσιάστηκε στην παρούσα διατριβή επικεντρώθηκε κυρίως σε συμβατικά ασύρματα δίκτυα. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να την επεκτείνει εξετάζοντας περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους, όπως τα δίκτυα Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) ή τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Με την αντιμετώπιση αυτών των μελλοντικών ερευνητικών κατευθύνσεων, η παρούσα διατριβή μπορεί να θέσει τα θεμέλια για περαιτέρω πρόοδο στον τομέα της αποδοτικής μετάδοσης σε ασύρματα δίκτυα με χρήση μεγάλων δεδομένων. Οι προτεινόμενες αναλύσεις και επεκτάσεις θα συμβάλουν στην ανάπτυξη νέων τεχνικών, στη βελτίωση των επιδόσεων, στην ενίσχυση της ασφάλειας και στην πρακτική εφαρμογή λύσεων αποδοτικής μετάδοσης σε σενάρια του πραγματικού κόσμου.

Βιβλιογραφία

- [1] “Big data analytics market size worldwide 2029,” Statista. <https://www.statista.com/statistics/1336002/big-data-analytics-market-size/> (Accessed May 02, 2023).
- [2] S. Batistič and P. van der Laken, “History, Evolution and Future of Big Data and Analytics: A Bibliometric Analysis of Its Relationship to Performance in Organizations”, British Journal of Management, vol. 30, no. 2, pp. 229–251, 2019, DOI: 10.1111/1467-8551.12340.
- [3] “3D Data Management: Controlling Data Volume, Velocity, and Variety,” studylib.net. <https://studylib.net/doc/8647594/3d-data-management--controlling-data-volume--velocity--an> (Accessed May 02, 2023).
- [4] K. Cukier and V. Mayer-Schönberger, “The Rise of Big Data: How It’s Changing the Way We Think about the World,” M. Pitici, Ed., Princeton University Press, Dec. 2014, pp. 20–32. DOI: 10.1515/9781400865307-003.
- [5] “Definition of Big Data - Gartner Information Technology Glossary,” Gartner. <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data> (Accessed May 09, 2023).
- [6] “What Is Big Data?”, Oracle, <https://www.oracle.com/big-data/what-is-big-data/> (Accessed May 02, 2023).
- [7] “What Is Big Data, and Why Is it Important? - Intel.” <https://www.intel.com/content/www/us/en/artificial-intelligence/analytics/what-is-big-data.html> (Accessed May 02, 2023).
- [8] “What is Big Data Analytics? | Microsoft Azure.” <https://azure.microsoft.com/en-us/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-big-data-analytics> (Accessed May 02, 2023).
- [9] “What Is Big Data?,” Google Cloud. <https://cloud.google.com/learn/what-is-big-data> (Accessed May 02, 2023).
- [10] “Unstructured Data: A Guide for How to Tap Into its Power.”, Bisok, <https://www.bisok.com/analytics-and-business-intelligence/unstructured-data/> (Accessed May 05, 2023).

- [11] “What is Structured Data? - Structured Data Explained - AWS,” Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/what-is/structured-data/> (Accessed May 02, 2023).
- [12] “Structured vs. Unstructured Data: What’s the Difference?” Jun. 29, 2021. <https://www.ibm.com/cloud/blog/structured-vs-unstructured-data> (Accessed May 02, 2023).
- [13] “Metadata,” Wikipedia. Apr. 24, 2023. Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Metadata&oldid=1151450808>
- [14] “What Is Metadata: Definition and Meaning,” What Is Metadata: Definition and Meaning. <https://www.avast.com/c-what-is-metadata> (Accessed May 02, 2023).
- [15] “Apache Hadoop”, Apache, <https://hadoop.apache.org/> (Accessed May 02, 2023).
- [16] “Hadoop - Architecture,” GeeksforGeeks, Jun. 27, 2020. <https://www.geeksforgeeks.org/hadoop-architecture/> (Accessed May 10, 2023).
- [17] “MapReduce,” Wikipedia. Apr. 01, 2023. Accessed: May 10, 2023. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=MapReduce&oldid=1147699831>
- [18] “Introduction to MapReduce for .NET Developers | by Eran Kampf | DeveloperZen.” <https://developerzen.com/introduction-to-mapreduce-for-net-developers-1030e070698a> (accessed May 11, 2023).
- [19] “What is Apache MapReduce? | IBM.” <https://www.ibm.com/topics/mapreduce> (Accessed May 02, 2023).
- [20] “Apache Hive - Apache Software Foundation.”, Apache, <https://cwiki.apache.org/confluence/display/Hive/> (accessed May 10, 2023).
- [21] “Apache Hive Architecture - TAE.”, Apache <https://www.tutorialandexample.com/apache-hive-architecture> (Accessed May 02, 2023).
- [22] “Apache Sqoop.”, Sqoop, <https://sqoop.apache.org/> (Accessed May 02, 2023).
- [23] “Big Data Sqoop | SQL to Hadoop | Big Data Tool – Happiest Minds,” HappiestMinds. <https://www.happiestminds.com/insights/big-data-sqoop/> (Accessed May 02, 2023).
- [24] “Apache ZooKeeper Security and its Architecture | Complete Guide.”, Xenonstack, <https://www.xenonstack.com/insights/apache-zookeeper> (Accessed May 02, 2023).
- [25] “ProjectDescription - Apache ZooKeeper - Apache Software Foundation.” <https://cwiki.apache.org/confluence/display/ZOOKEEPER/ProjectDescription> (accessed May 11, 2023).

- [26] J. Wielki, “Implementation of the Big Data concept in organizations - Possibilities, impediments and challenges,” presented at the 2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2013, Sep. 2013.
- [27] “6 Phases of Data Analytics LifeCycle You Should Know,” Intellipaat Blog. <https://intellipaat.com/blog/tutorial/data-analytics-tutorial/data-analytics-lifecycle/> (Accessed May 02, 2023).
- [28] Neelay Jagani, Parthil Jagani, Suril Shah, “BIG DATA IN CLOUD COMPUTING: A LITERATURE REVIEW”, ResearchGate, March 2021, DOI: 10.33564/IJEAST.2021.v05i11.029, https://www.researchgate.net/publication/352607258_BIG_DATA_IN_CLOUD_COMPUTING_A_LITERATURE_REVIEW/link/60d17b4e299bf1cd71e97a84/download (Accessed May 04, 2023).
- [29] “Wireless network,” Wikipedia. Apr. 27, 2023. Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wireless_network&oldid=1152029707
- [30] “A history of wireless for business and a look forward | TechTarget,” Networking. <https://www.techtarget.com/searchnetworking/tip/A-history-of-wireless-for-business-and-a-look-forward> (Accessed May 04, 2023).
- [31] C. MODELS and I. Communication, “Shannon and Weaver Model of Communication,” *Communication Theory*, Jun. 13, 2011. <https://www.communicationtheory.org/shannon-and-weaver-model-of-communication/> (accessed May 13, 2023).
- [32] “The 4 different types of wireless networks | TechTarget.” <https://www.techtarget.com/searchnetworking/tip/The-4-different-types-of-wireless-networks> (Accessed May 04, 2023).
- [33] “Overview of Wireless Personal Area Network (WPAN),” GeeksforGeeks, Mar. 01, 2021. <https://www.geeksforgeeks.org/overview-of-wireless-personal-area-network-wpan/> (Accessed May 04, 2023).
- [34] I. Burn, “Everything about WPAN: Wireless Personal Area Network,” Aug. 30, 2022. <https://ccm.net/computing/networks/9763-wpan-wireless-personal-area-network/> (Accessed May 04, 2023).
- [35] “Wireless Local Area Network (WLAN)-Architecture - Huawei Enterprise Support Community.” <https://forum.huawei.com/enterprise/en/wireless-local-area-network-wlan-architecture/thread/833939-869> (Accessed May 04, 2023).

- [36] V. Alagesan and B. Natarajan, “Data Collection In Wireless Sensor Network Through Hybrid Mac Protocol,” *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 29, pp. 4229–4238, Jan. 2020.
- [37] “Overview of Wireless Metropolitan Area Network (WMAN),” GeeksforGeeks, Apr. 01, 2021. <https://www.geeksforgeeks.org/overview-of-wireless-metropolitan-area-network-wman/> (Accessed May 04, 2023).
- [38] “Overview of Wireless Wide Area Network (WWAN) - GeeksforGeeks.” <https://www.geeksforgeeks.org/overview-of-wireless-wide-area-network-wwan/> (Accessed May 04, 2023).
- [39] “An overview of wireless WAN | TechTarget,” Networking. <https://www.techtarget.com/searchnetworking/tip/As-wireless-WAN-matures-benefits-and-challenges-emerge> (Accessed May 04, 2023).
- [40] “Cellular network,” Wikipedia. Apr. 17, 2023. Accessed: May 05, 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Cellular_network&oldid=1150252362
- [41] “Cellular Network - an overview | ScienceDirect Topics.” <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/cellular-network> (Accessed May 04, 2023).
- [42] “2G,” Wikipedia. May 13, 2023. Accessed: May 15, 2023. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2G&oldid=1154606234>
- [43] “High-level architecture of Mobile Cellular Networks from 2G to 5G.” <https://www.3g4g.co.uk/Training/intermediate0001.html> (Accessed May 04, 2023).
- [44] “3G,” Wikipedia. May 13, 2023. Accessed: May 15, 2023. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=3G&oldid=1154610908>
- [45] “4G,” Wikipedia. May 07, 2023. Accessed: May 15, 2023. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=4G&oldid=1153725642>
- [46] “4G LTE and IMS Wireless Network Simulation.”, GL Communication Inc. <https://www.gl.com/telecom-test-solutions/4G-LTE-communication-network-lab.html> (Accessed May 04, 2023).
- [47] “5G,” Wikipedia. May 09, 2023. Accessed: May 15, 2023. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=5G&oldid=1154048325>

- [48] D. Sanyal, U. Kar, and M. Roy, “Mobile Communications and Computing: A Broad Review with a Focus on Smart Healthcare,” 2020, pp. 9–33. DOI: [10.1007/978-3-030-37551-5_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37551-5_2).
- [49] “Wireless Network Applications :: Chapter 1. The Wireless World: An Introduction to Concepts :: Wireless networks first-step :: Networking :: eTutorials.org.” <https://etutorials.org/Networking/wn/Chapter+1.+The+Wireless+World+An+Introduction+to+Concepts/Wireless+Network+Applications/> (accessed May 15, 2023).
- [50] “Wireless ad hoc network,” Wikipedia. Apr. 28, 2023. Accessed: May 05, 2023. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wireless_ad_hoc_network&oldid=1152117886
- [51] “What is a Wireless Ad Hoc Network and How Does it Work? | TechTarget,” Mobile Computing. <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/ad-hoc-network> (Accessed May 05, 2023).
- [52] D. B. da Costa and H.-C. Yang, “Grand Challenges in Wireless Communications,” Frontiers in Communications and Networks, vol. 1, 2020, Accessed: Jun. 08, 2023. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frcmn.2020.00001>
- [53] M. Haque, A.K.Sinha, K.M.Singh, and N.K.Singh, “Security Issues of Wireless Communication Networks,” Oct. 2014. Available: https://www.researchgate.net/publication/344610909_Security_Issues_of_Wireless_Communication_Networks
- [54] S. Kumar and P. Crowley, “Segmented hash: an efficient hash table implementation for high performance networking subsystems,” in Proceedings of the 2005 ACM symposium on Architecture for networking and communications systems, in ANCS '05. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Jul. 2005, pp. 91–103. DOI: 10.1145/1095890.1095904.
- [55] “What is Hashing Algorithm & How Does It Work? - AboutSSL,” About SSL. <https://aboutssl.org/what-is-hashing-algorithm-how-does-it-work/> (accessed Jun. 20, 2023).
- [56] A. Clementi, A. Monti, and R. Silvestri, “Round Robin is optimal for fault-tolerant broadcasting on wireless networks,” Journal of Parallel and Distributed Computing, vol. 64, pp. 89–96, Jan. 2004, DOI: 10.1016/j.jpdc.2003.09.002.
- [57] “What is a round robin?,” WhatIs.com. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/round-robin> (accessed Jun. 20, 2023).
- [58] N. Kimura and S. Latifi, “A survey on data compression in wireless sensor networks,” in International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'05) - Volume II, Apr. 2005, pp. 8-13 Vol. 2. DOI: 10.1109/ITCC.2005.43.

- [59] “Computer Science - 19. Compression Diagram,” Quizlet. <https://quizlet.com/gb/284040095/computer-science-19-compression-diagram/> (accessed Jun. 21, 2023).
- [60] “Lossless compression,” Wikipedia. Jun. 18, 2023. Accessed: Jun. 21, 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lossless_compression&oldid=1160779778
- [61] “Error correction code,” Wikipedia. Jun. 03, 2023. Accessed: Jun. 21, 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Error_correction_code&oldid=1158413565
- [62] T. Gupta, “Error Detection and Correction in Computer Networks,” Scaler Topics, Dec. 16, 2022. <https://www.scaler.com/topics/error-detection-and-correction-in-computer-networks/> (accessed Jun. 21, 2023).
- [63] K. K. Leung and Y. Levy, “Data replication schemes for global networks,” in Teletraffic Science and Engineering, V. Ramaswami and P. E. Wirth, Eds., in Teletraffic Contributions for the Information Age, vol. 2. Elsevier, 1997, pp. 211–222. DOI: 10.1016/S1388-3437(97)80026-1.
- [64] Y. Wang and V. Friderikos, “A Survey of Deep Learning for Data Caching in Edge Network,” Informatics, vol. 7, p. 43, Oct. 2020, DOI: 10.3390/informatics7040043.
- [65] D. Liu, B. Chen, C. Yang, and A. F. Molisch, “Caching at the wireless edge: design aspects, challenges, and future directions,” IEEE Commun. Mag., vol. 54, no. 9, pp. 22–28, Sep. 2016, DOI: 10.1109/MCOM.2016.7565183.
- [66] “Caching - Content Distribution Network (CDN),” Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/caching/cdn/> (accessed Jun. 21, 2023).
- [67] H. A. Belghol and A. Idrissi, “MEC towards 5G: A Survey of Concepts, Use Cases, Location Tradeoffs,” Transactions on Machine Learning and Artificial Intelligence, vol. 5, Aug. 2017, DOI: 10.14738/tmlai.54.3215.
- [68] S. H. Shah, Perspectives of Cooperative Caching. 2018. Accessed: Jun. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.grin.com/document/438062>
- [69] S. Chen, Z. Yao, X. Jiang, J. Yang, and L. Hanzo, “Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Based Cooperative Edge Caching for Ultra-Dense Next-Generation Networks,” IEEE Transactions on Communications, vol. PP, pp. 1–1, Dec. 2020, DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3044298.

- [70] “Using Both Wired and Wireless Connections | ConceptDraw DIAGRAM is an advanced tool for professional network diagrams creation,” <https://www.conceptdraw.com/How-To-Guide/using-both-wired-and-wireless-connections> (accessed Jun. 21, 2023)
- [71] “HARQ & ARQ,” Telecompedia, Jan. 14, 2018. <https://telecompedia.net/harq-and-arq/> (accessed Jun. 21, 2023).
- [72] A. Abdellatif, A. Mohamed, and C.-F. Chiasserini, “Dynamic Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks: A user-centric scheme for improved delivery,” IEEE Consumer Electronics Magazine, vol. 6, pp. 53–60, Jan. 2017, DOI: 10.1109/MCE.2016.2614419.
- [73] “Dynamic channel selection in wireless communications via a multi-armed bandit algorithm using laser chaos time series | Scientific Reports.” <https://www.nature.com/articles/s41598-020-58541-2> (accessed Jun. 21, 2023).
- [74] T. Zseby et al., “Multipath Routing Slice Experiments in Federated Testbeds,” May 2011, pp. 247–258. DOI: 10.1007/978-3-642-20898-0_18.
- [75] “Software-defined networking - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_networking (accessed Jun. 21, 2023).
- [76] “Software defined Networking(SDN),” GeeksforGeeks, Jul. 02, 2019. <https://www.geeksforgeeks.org/software-defined-networking/> (accessed Jun. 21, 2023).
- [77] J. Fitzpatrick, “How to Use Quality of Service (QoS) to Get Faster Internet When You Really Need It,” How-To Geek, Jul. 03, 2017. <https://www.howtogeek.com/75660/the-beginners-guide-to-qos-on-your-router/> (accessed Jun. 21, 2023).
- [78] V. B. Iversen, “Traffic Engineering of Cellular Wireless Communication Systems,” in Modeling and Simulation Environment for Satellite and Terrestrial Communications Networks: Proceedings of the European COST Telecommunications Symposium, A. N. Ince, Ed., in The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 2002, pp. 49–64. DOI: 10.1007/978-1-4615-0863-2_4.
- [79] S. S. Hadi and T. C. Tjong, “Adaptive Modulation and Coding for LTE Wireless Communication,” IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 78, no. 1, p. 012016, Nov. 2015, DOI: 10.1088/1757-899X/78/1/012016.
- [80] A. Agarwal and K. Agarwal, “The Next Generation Mobile Wireless Cellular Networks – 4G and Beyond,” American Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 2, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2014, DOI: 10.12691/ajeee-2-3-6.

- [81] “What Is Bandwidth & Why Is It Important For Business? | Bionic.” <https://bionic.co.uk/business-connectivity/guides/what-is-bandwidth/> (accessed Jun. 22, 2023).
- [82] “What is Latency? - Network Latency Explained - AWS,” Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/what-is/latency/> (accessed Jun. 22, 2023).
- [83] R. Khalili and K. Salamatian, “EVALUATION OF PACKET ERROR RATE IN WIRELESS NETWORKS,” Jan. 2004, ResearchGate
- [84] “Energy Consumption of 5G, Wireless Systems and the Digital Ecosystem,” Environmental Health Trust. <https://ehtrust.org/science/reports-on-power-consumption-and-increasing-energy-use-of-wireless-systems-and-digital-ecosystem/> (accessed Jun. 22, 2023).
- [85] P. R. Jelenković, P. Momčilović, and M. S. Squillante, “Scalability of wireless networks,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 15, no. 2, pp. 295–308, Dec. 2007, DOI: 10.1109/TNET.2007.892846.
- [86] A. Vecchio, “Adaptability in wireless sensor networks,” in 2008 15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Dec. 2008, pp. 1261–1264. DOI: 10.1109/ICECS.2008.4675089.
- [87] C. Deng, “The Robustness Analysis of Wireless Sensor Networks under Uncertain Interference,” The Scientific World Journal, vol. 2013, p. e185970, Nov. 2013, DOI: 10.1155/2013/185970.