



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
“ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ”

Μελέτη του Πρωτοκόλλου TCP στα Μικροκυματικά
(mmWave) Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας Πέμπτης Γενιάς
(5G)

Διπλωματική Εργασία

ΤΟΥ

Μπαλή Ραφαήλ

Επιβλέπων : Σκούτας Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής: A) Κορμέτζας Γεώργιος, Καθηγητής
B) Κωστούλας Θεόδωρος, Αν. Καθηγητής

Η ΣΕΛΙΔΑ ΑΥΤΗ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος μεταπτυχιακών σπουδών μου στο ΠΜΣ «Πληροφοριακά & Επικοινωνιακά Συστήματα» του τμήματος Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Καταρχάς, θα ήθελα πάνω από όλα να ευχαριστήσω τον Θεό που με αξίωσε να εισέλθω στο εν λόγω μεταπτυχιακό πρόγραμμα και να το ολοκληρώσω έχοντας λάβει πάρα πολλές γνώσεις αλλά και εμπειρίες.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Δημήτριο Σκούτα, ο οποίος από τις αρχές του μεταπτυχιακού έως και την περάτωση της εργασίας με καθοδηγούσε συνεχώς και έδινε λύσεις εκεί όπου απαιτούνταν.

Επίσης, ένα τεράστιο ευχαριστώ στους φίλους μου οι οποίοι με το ενδιαφέρον τους μου έδιναν συνεχώς δύναμη να συνεχίσω και να προσπαθήσω ακόμα περισσότερο για την επιτυχία.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα τεράστιο ευχαριστώ στους γονείς και τα πέντε αδέρφια μου, οι οποίοι με το έντονο ενδιαφέρον τους, την αγωνία αλλά και τη μεγάλη τους αγάπη συνέβαλαν τα μέγιστα ώστε να φτάσω στο τέλος αυτής της πολύ έντονης και όμορφης περιπέτειας. Τους αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία γιατί το αξίζουν.

© 2023

του Μπαλή Ραφαήλ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών Και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Πανεπιστήμιο Αιγαίου

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

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.

Υπογραφή

Ραφαήλ Μπαλής

Η ΣΕΛΙΔΑ ΑΥΤΗ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Δίκτυα και Τηλεπικοινωνίες	1
1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής	1
1.3 Δομή της Διπλωματικής	2
2. Δίκτυα κινητής Τηλεφωνίας Πέμπτης γενιάς (5G)	3
2.1 Ιστορική Αναδρομή	3
2.1.1 Κινητή Τηλεφωνία πριν τα κυψελωτά δίκτυα	3
2.1.2 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 1 ^{ης} Γενιάς (1G).....	4
2.1.3 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2 ^{ης} Γενιάς (2G).....	5
2.1.4 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3 ^{ης} Γενιάς (3G).....	7
2.1.5 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4 ^{ης} Γενιάς (4G).....	8
2.2 Σύντομη Περιγραφή των 5G.....	10
2.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά 5G	12
2.3.1 Δίκτυο πρόσβασης 5G RAN.....	13
2.3.2 Αρχιτεκτονική Fronthaul & Backhaul	15
2.3.3 Τεχνολογία SDN (Software Defined Networks).....	15
2.3.4 Τεχνολογία NFV (Network Functions Virtualization)	17
2.3.5 Network Slicing.....	17
2.4 Massive MIMO	19
2.5 Μικροκυματική ζώνη (mmWave) των 5G.....	20
3. Πρωτόκολλο TCP	22
3.1 Μοντέλο TCP/IP	22
3.2 Σύντομη Περιγραφή Πρωτοκόλλου IP	24
3.3 Σύντομη Περιγραφή Πρωτοκόλλου TCP.....	25
3.4 Χαρακτηριστικά TCP	26
3.4.1 Κεφαλίδα TCP	26
3.4.2 TCP Σύνδεση.....	28
3.4.3 TCP και Έλεγχος Ροής.....	30
3.4.4 TCP και Έλεγχος Συμφόρησης.....	31
3.5 Αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης (CC) TCP	34
3.5.1 TCP Tahoe	35
3.5.2 TCP Reno & New Reno.....	35
3.5.3 TCP BIC.....	35

3.5.4 TCP CUBIC	36
3.5.5 TCP HighSpeed	37
3.5.6 TCP BBR	37
4. Μηχανική Μάθηση (ML)	39
4.1 Εισαγωγή στη Μηχανική Μάθηση (ML)	39
4.2 Είδη Μηχανικής Μάθησης	40
4.2.1 Επιβλεπόμενη Μάθηση (Supervised Learning).....	40
4.2.2 Μη Επιβλεπόμενη Μάθηση (Unsupervised Learning).....	43
4.2.3 Ενισχυτική Μάθηση (Reinforcement Learning)	44
4.3 Νευρωνικά Δίκτυα	45
4.3.1 Βαθιά Μάθηση (Deep Learning).....	47
5. Επίδραση του TCP στα δίκτυα 5G (mmWave).....	48
5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του TCP	48
5.1.1 Τοποθεσία διακομιστών (Servers).....	48
5.1.2 Αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης (CC).....	49
5.1.3 Μέγεθος πακέτου TCP (MSS).....	49
5.1.4 Radio Link Control (RLC) Buffer size	50
5.2 Σενάρια εφαρμογής TCP πάνω σε δίκτυα 5G.....	51
5.2.1 Σενάριο εφαρμογής TCP σε τρένο υψηλής ταχύτητας.....	51
5.2.2 Σενάριο εφαρμογής TCP σε αστικό περιβάλλον	52
5.3 Αποτελέσματα Σεναρίων εφαρμογής TCP σε δίκτυα 5G	53
5.3.1 Αποτελέσματα σεναρίου σε τρένο υψηλής ταχύτητας	53
5.3.2 Αποτελέσματα σεναρίου σε αστικό περιβάλλον	58
5.4 Συμπεράσματα / Διαπιστώσεις.....	59
6. Τρόποι βελτίωσης μηχανισμών του TCP	64
6.1 Multi-Path TCP (MPTCP).....	64
6.2 Χρήση Τεχνικών Μηχανικής Μάθησης (ML).....	66
6.2.1 Loss Predictor TCP (LP-TCP).....	66
6.2.2 Reinforcement Learning TCP (RL-TCP).....	68
6.2.3 Deep Learning TCP (DL-TCP).....	68
6.2.4 Τυχαία Δασικά Μοντέλα (Random Forests).....	70
6.3 Σύγκριση τεχνικών βελτίωσης μηχανισμών του TCP	72
Βιβλιογραφία	74

Η ΣΕΛΙΔΑ ΑΥΤΗ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Κυψελωτό Δίκτυο [2]	4
Εικόνα 2: Διαφορά OFDM και OFDMA [8]	9
Εικόνα 3: Αρχιτεκτονική 5G δικτύου [14].....	13
Εικόνα 4: Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης D-RAN [15]	14
Εικόνα 5: Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης C-RAN [15]	14
Εικόνα 6:Υποδομή Fronthaul & Backhaul [16]	15
Εικόνα 7: Δομή της Αρχιτεκτονικής SDN [17].....	16
Εικόνα 8: 5G Network Slicing [51].....	18
Εικόνα 9: Τεχνολογία massive MIMO [21]	20
Εικόνα 10: Λειτουργία 5G στο φάσμα mmWave [22]	21
Εικόνα 11: Επίπεδα Μοντέλου TCP/IP [25]	22
Εικόνα 12: Κεφαλίδα IP για IPv4 [28]	24
Εικόνα 13: Κεφαλίδα TCP [30].....	26
Εικόνα 14: Χαιρετισμός τριών τρόπων – Έναρξη σύνδεσης TCP [31].....	29
Εικόνα 15: Χαιρετισμός τεσσάρων τρόπων – Τερματισμός σύνδεσης TCP [31].....	30
Εικόνα 16: Κυλιόμενο παράθυρο TCP [33]	30
Εικόνα 17: Αλγόριθμος Αργής Εκκίνησης (Slow Start) [36].....	33
Εικόνα 18: Γρήγορη επαναμετάδοση (Fast Retransmit) [37]	34
Εικόνα 19: Λειτουργία αλγορίθμου BIC TCP [41].....	36
Εικόνα 20: Λειτουργία TCP CUBIC [43]	36
Εικόνα 21: Λειτουργία TCP BBR [46].....	38
Εικόνα 22: Επιβλεπόμενη Μάθηση (Supervised Learning) [54].....	41
Εικόνα 23: Δέντρα Απόφασης με χρήση αλγορίθμου ID3 [58]	42

Εικόνα 24: Αλγόριθμος Q-Learning Ενισχυτικής Μάθησης [56].....	44
Εικόνα 25: Επίπεδα Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (ΤΝΔ) [60].....	45
Εικόνα 26: Επίπεδα σε Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα (ΒΝΔ) [61].....	46
Εικόνα 27: Μέγεθος πακέτου TCP [49].....	50
Εικόνα 28: Απεικόνιση Λειτουργίας MPTCP [66]	66
Εικόνα 29: Μέθοδος LP-TCP [67].....	67
Εικόνα 30: Λειτουργία μεθόδου DL-TCP [69].....	69
Εικόνα 31: Απεικόνιση τυχαίου δασικού μοντέλου (Random Forest) [70].....	71

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ 4G και 5G	10
Πίνακας 2: Θύρες που χρησιμοποιούνται από το TCP	25
Πίνακας 3: Δεδομένα για σενάριο εφαρμογής TCP σε τρένο υψηλής ταχύτητας (MSS=14KB)	54
Πίνακας 4: Δεδομένα για σενάριο εφαρμογής TCP σε τρένο υψηλής ταχύτητας (MSS=1.4KB)	56
Πίνακας 5: Αποτελέσματα σύγκρισης LTE (4G) με mmWave (5G)	57
Πίνακας 6: Δεδομένα για σενάριο εφαρμογής TCP σε αστικό περιβάλλον	59
Πίνακας 7: Σύγκριση τεχνικών βελτίωσης μηχανισμών TCP	73

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

3GPP	Third Generation Partnership Project
5G PPP	5G Infrastructure Public Private Partnership
AIMD	Additive Increase / Multiplicative Decrease
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ANN	Artificial Neural Networks
AQM	Active Queue Management
API	Application Programming Interface
BBR	Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time
BBU	Baseband Unit
BNA	Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα
BS	Base Station
BTS	Base Transceiver Station
CART	Classification And Regression Trees
C-RAN	Cloud Radio Access Networks
CPRI	Common Public Radio Interface
CWND	Congestion Window
D-RAN	Distributed Ran
DHCP	Dynamic, Host Configuration Protocol
DMS	Data And Message Service
DNN	Deep Neural Networks
DNS	Domain Name System
e-NB	evolved Node Base
EETT	Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείου
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiplexing Access
FTP	File Transfer Protocol
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
ID3	Iterative Dichotomizer 3
IEEE	Institute Of Electrical And Electronics Engineers
IMT	International Mobile Telecommunications
IMT-A	International Advanced Mobile Telecommunications
IMTS	Improved Mobile Telephone System
IOT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LDAP	Lightweight Directory Authentication Protocol
LPI	Low Probability Of.....

LTE	Long Term Evolution
m-MIMO	Massive Multiple Input – Multiple Output
MIMO	Multiple Input – Multiple Output
ML	Machine Learning
MP-TCP	Multi Path – Transmission Control Protocol
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center
MSS	Maximum Segment Size
MTS	Mobile Telephone System
NB	Node Base
NFV	Network Functions Virtualization
NG-RAN	Next Generation Ran
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OSI	Open System Interconnection
PCA	Principal Component Analysis
PSTN	Public Switched Telephone Network
RAN	Radio Access Network
RL	Reinforcement Learning
RRH	Remote Radio Head
RTO	Retransmission Timeout
RTT	Round Trip Time
RWND	Receiver Window
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SDN	Software Defined Networking
SL	Supervised Learning
SMSS	Sender Maximum Segment Size
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
SNR	Signal to Noise Ratio
SSH	Secure Shell Protocol
SSTHRESH	Slow Start Threshold
SVM	Support Vector Machine
TACS	Total Access Communication System
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
ΤΝΔ	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
USL	Unsupervised Learning
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
WAN	Wide Area Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WIMAX	Worldwide interoperability Microwave Access

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι γνωστό ότι πλέον το μεγαλύτερο μέρος της σύγχρονης κοινωνίας που ζούμε χρησιμοποιεί και εξυπηρετείται από πληροφοριακά συστήματα και γενικότερα τεχνολογίες πληροφορικής. Η επικοινωνία μεταξύ των ανθρώπων καθώς και η ολοκλήρωση των καθημερινών εργασιών ή εκκρεμοτήτων βασίζεται σχεδόν καθολικά στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και την υψηλή απόδοση αυτών. Κάθε εργαζόμενος πλέον απαιτείται να διαθέτει μία κινητή συσκευή για την καθημερινότητα του. Συνεπώς, η τηλεπικοινωνίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη καθημερινή ζωή του ανθρώπου και πρέπει συνεχώς να εξελίσσονται, με σκοπό την ομαλή και ασφαλή εξυπηρέτηση αυτού.

Ωστόσο, ενώ τα πρώτα χρόνια εμφάνισης των τηλεπικοινωνιών η επιτυχής εξασφάλιση ομιλίας και αποστολής μηνυμάτων ήταν αρκετή, τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα και ενδιαφέρον για τις υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων. Η έλευση του διαδικτύου και ακολούθως ποικίλων διαδικτυακών εφαρμογών (web apps) έχει δημιουργήσει την ανάγκη για νέους τρόπους γρήγορης και ασφαλούς μεταφοράς δεδομένων. Επίσης, η ραγδαία και ταχεία εμφάνιση πολύπλοκων και απαιτητικών εφαρμογών όπως η τηλεδιάσκεψη, η τηλεϊατρική, το online gaming, το διαδίκτυο των πραγμάτων (IOT) και πολλές άλλες, απαιτούν τεράστιο όγκο δεδομένων με μεγάλες ταχύτητες αλλά ταυτόχρονα μικρούς χρόνους απόκρισης.

Συνεπώς, ο κλάδος των τηλεπικοινωνιών έχει έρθει αντιμέτωπος με νέες μεγάλες προκλήσεις, καθώς απαιτείται η εύρεση νέων καινοτόμων τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών, με σκοπό την εξυπηρέτηση όλων αυτών των νέων απαιτήσεων.

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς (5G) παρέχουν τεράστιες ταχύτητες και ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν τον χρόνο απόκρισης, δίνοντας έτσι την δυνατότητα για εφαρμογή και υλοποίηση νέων πολύπλοκων και απαιτητικών εφαρμογών. Αρκεί να αναφερθεί ότι τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς στη μικροκυματική ζώνη (mmWave) μπορούν να παρέχουν ταχύτητες έως και 20Gb/s με χρόνο απόκρισης της τάξεως του 1ms, μεγέθη τα οποία είναι είκοσι (20) φορές μεγαλύτερα από τις παλαιότερες γενιές κινητής τηλεφωνίας 4G (LTE).

Ωστόσο, η εφαρμογή και υλοποίηση των νέων δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς στη μικροκυματική ζώνη (mmWave) δημιουργεί ορισμένες δυσλειτουργίες και ευπάθειες στη μεταφορά των δεδομένων με αποτέλεσμα οι ανωτέρω ταχύτητες και χρόνοι απόκρισης να μην μπορούν να επιτευχθούν. Έτσι, για την επίτευξη των δυνατοτήτων των δικτύων 5G πρέπει να βρεθούν νέοι τρόποι και μέθοδοι για την απρόσκοπτη μεταφορά των δεδομένων, όπου υπεύθυνα για αυτό αποτελούν τα πρωτόκολλα μεταφοράς.

Το πρωτόκολλο TCP, το οποίο αποτελεί και το βασικότερο πρωτόκολλο μεταφοράς στον κόσμο των δικτύων είναι υπεύθυνο για την ομαλή και ασφαλή μεταφορά των δεδομένων από ένα χρήστη σε έναν άλλο. Ωστόσο, το TCP δεν μπορεί να ανταπεξέλθει πλήρως στα προβλήματα που δημιουργούνται από τις ευπάθειες και αδυναμίες των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς.

Συνεπώς, είναι απαραίτητη η μελέτη εφαρμογής του πρωτοκόλλου TCP στα μικροκυματικά (mmWave) δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς (5G), και η εκτέλεση δοκιμών με διαφορετικές παραμέτρους, ώστε να εντοπιστούν και να αναλυθούν οι αδυναμίες και τα προβλήματα που παρουσιάζει. Τέλος, είναι αναγκαία η εύρεση τρόπων, μεθόδων καθώς και μηχανισμών για την αποδοτικότερη χρήση του πρωτόκολλου TCP σε δίκτυα 5^{ης} γενιάς.

Η ανάγκη για καθολική χρήση των νέων δικτύων 5^{ης} γενιάς είναι αναγκαία καθώς οι απαιτήσεις ολοένα και αυξάνονται, με αποτέλεσμα οι παλαιότερες γενιές δικτύων να μην μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της σημερινής κοινωνίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς (5G), Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4^{ης} γενιάς (4G), LTE, mmWave, MIMO, Fronthaul, Backhaul, SDN, NFV, CPRI, C-RAN, IP, Πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης (TCP), MSS, Αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης (CC), RLC Buffer, Edge Server, Remote Server, CWND, Μηχανική μάθηση, Νευρωνικά δίκτυα, Δέντρα Απόφασης.

ABSTRACT

It is well known that most of the modern society we live in uses and is served by information systems and information technologies in general. Communication between people as well as the completion of daily tasks or unfinished business is almost universally based on mobile networks and their high performance. Every employee is now required to have a mobile device for his or her daily life. Therefore, telecommunication plays a crucial role in the daily life of people and must constantly evolve in order to serve them smoothly and securely.

However, while in the early years of telecommunications, successfully securing voice and messaging was sufficient, in recent years there has been a particular emphasis and interest in data transfer services. The advent of the internet and subsequently of a variety of web apps has created the need for new ways of fast and secure data transfer. Also, the rapid and rapid emergence of complex and demanding applications such as teleconferencing, telemedicine, online gaming, internet of things (IOT) and many others require huge amounts of data with high speeds but at the same time small latency.

Therefore, the telecommunications industry has been confronted with major new challenges, as new innovative technologies and architectures are needed to meet all these new requirements.

The 5th generation mobile networks (5G) provide huge speeds and at the same time minimize latency, enabling the application and implementation of new complex and demanding applications. Suffice it to say that 5th generation networks in the microwave band (mmWave) can provide speeds of up to 20Gb/s with a response time of 1ms, which is twenty (20) times higher than the older 4G (LTE) mobile generation.

However, the application and implementation of the new 5th generation mobile communication networks in the microwave band (mmWave) creates certain glitches and vulnerabilities in data transmission, with the result that the above speeds and response times cannot be achieved. Thus, to achieve the potential of 5G networks, new ways and methods must be found for the seamless transfer of data, where transport protocols are responsible for this.

The TCP protocol, which is the most basic transport protocol in the world of networks, is responsible for the smooth and secure transfer of data from one user to another. However, TCP cannot fully cope with the problems created by the vulnerabilities and weaknesses of 5th generation mobile networks.

Therefore, it is necessary to study the application of the TCP protocol in 5th generation (5G) microwave (mmWave) mobile communication networks, and to perform tests with different parameters, in order to identify and analyze the weaknesses and problems it presents. Finally, it is necessary to find ways, methods and mechanisms for the more efficient use of the TCP protocol in 5th generation networks.

The need for universal use of the new 5th generation networks is necessary as the demands are increasing, with the result that older generations of networks cannot cope with the requirements of today's society.

KEYWORDS: 5th generation mobile networks (5G), 4th generation mobile networks (4G), LTE, mmWave, MIMO, Fronthaul, Backhaul, SDN, NFV, CPRI, C-RAN, IP, Transmission Control Protocol (TCP), MSS, Congestion Control Algorithms (CC), RLC Buffer, Edge Server, Remote Server, CWND, Machine-Learning, Neural Networks Decision Trees.

1. Εισαγωγή

1.1 Δίκτυα και Τηλεπικοινωνίες

Το πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης γνωστό και ως πρωτόκολλο TCP αποτελεί ένα από τα βασικότερα και πιο σημαντικά πρωτόκολλα στο χώρο του διαδικτύου αλλά και των δικτύων γενικότερα. Είναι το υπεύθυνο πρωτόκολλο για την ομαλή και επιτυχή μεταφορά των δεδομένων από ένα πληροφοριακό σύστημα σε ένα άλλο. Στον ασύρματο κόσμο των τηλεπικοινωνιών, το TCP συνεργάζεται με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας για την μεταφορά των δεδομένων, με αποτέλεσμα να υπάρχει πλήρης αλληλεξάρτηση μεταξύ τους.

Ακόμα, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς αποτελούν μία τεράστια εξέλιξη στο χώρο των τηλεπικοινωνιών καθώς αυξάνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις ταχύτητες μετάδοσης των δεδομένων και ταυτόχρονα μειώνουν πολύ τον χρόνο απόκρισης (latency). Έτσι η 5^η γενιά αποτελεί βασικό θεμέλιο για την βελτίωση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Ωστόσο, τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς χρησιμοποιούν φάσμα συχνοτήτων στη μικροκυματική ζώνη και συγκεκριμένα στη ζώνη των χιλιοστομετρικών μικροκυμάτων (mmWave), όπου παρουσιάζονται κάποιες σημαντικές ευπάθειες. Συγκεκριμένα, σε αυτό το φάσμα παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε εμπόδια καθώς και μεγάλους χρόνους απόκρισης κατά την κατευθυντική αναζήτηση. Έτσι, η μεταφορά των δεδομένων γίνεται αρκετά δυσχερής και ανώμαλη, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αρκετές προκλήσεις για τα πρωτόκολλα μεταφοράς και ιδιαίτερα για το πρωτόκολλο TCP που αποτελεί το βασικότερο πρωτόκολλο σήμερα.

1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής

Η ανάγκη για την πλήρη εκμετάλλευση των νέων δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς, λόγω της απαίτησης των σύγχρονων εφαρμογών για μεταφορά τεράστιου όγκου δεδομένων σε πολύ μικρό χρόνο, καλεί την επιστημονική κοινότητα προς εύρεση νέων καινοτόμων λύσεων, με σκοπό την αποδοτική εφαρμογή του πρωτοκόλλου TCP στη μικροκυματική ζώνη (mmWave) των εν λόγω δικτύων.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσει το πρωτόκολλο TCP και πως επηρεάζει την απόδοση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων πέμπτης γενιάς (5G) στη μικροκυματική ζώνη (mmWave). Θα παρουσιασθούν τεχνικές και τρόποι παραμετροποίησης του πρωτοκόλλου TCP για βελτίωση της απόδοσης των μικροκυματικών δικτύων πέμπτης γενιάς (5G), με νέες προσεγγίσεις που βασίζονται στη μηχανική μάθηση (Machine Learning).

1.3 Δομή της Διπλωματικής

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο αναγράφεται η εισαγωγή της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο εκτελείται μία σύντομη ιστορική αναδρομή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και αναλύεται η 5^η γενιά (5G) κινητής τηλεφωνίας.

Ακολούθως, στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται το μοντέλο TCP/IP το οποίο αποτελεί το βασικότερο μοντέλο για την επικοινωνία μεταξύ δύο πληροφοριακών συστημάτων και στη συνέχεια αναλύεται το πρωτόκολλο TCP και οι δυνατότητες αυτού. Ακόμα, στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται ο τομέας της μηχανικής μάθησης (ML), οι βασικοί τύποι της καθώς και οι βασικότεροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται, με τους οποίους θα ασχοληθούμε για τη μελέτη βελτίωσης του πρωτοκόλλου TCP πάνω στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς.

Εν συνεχεία, στο πέμπτο κεφάλαιο μελετώνται δύο σενάρια εφαρμογής του πρωτοκόλλου TCP πάνω σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς, από τα οποία εξάγονται κάποια συμπεράσματα / παρατηρήσεις για το πώς επιδρά αυτό στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς. Σε αυτό το σημείο αναλύονται και οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη συνεργασία των εν λόγω τεχνολογιών.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται τρόποι βελτίωσης των μηχανισμών του πρωτοκόλλου TCP με νέες προσεγγίσεις που βασίζονται στη μηχανική μάθηση (machine-learning). Παρουσιάζονται τεχνικές για την καλύτερη απόδοση και λειτουργία του πρωτοκόλλου TCP πάνω σε δίκτυα 5^{ης} γενιάς (5G).

2. Δίκτυα κινητής Τηλεφωνίας Πέμπτης γενιάς (5G)

2.1 Ιστορική Αναδρομή

2.1.1 Κινητή Τηλεφωνία πριν τα κυψελωτά δίκτυα

Η ανάγκη των ανθρώπων για τη δημιουργία αποτελεσματικών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας είχε ήδη αρχίσει από τις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα. Με τις αναλογικές ραδιοεπικοινωνίες να έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στις επικοινωνίες κυρίως πλοίων και τρένων, η προσπάθεια για τη δημιουργία πραγματικών τηλεφωνικών συνδέσεων για την απομακρυσμένη επικοινωνία μεταξύ των ανθρώπων ήταν έντονη.

Μετά τη λήξη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου ξεκίνησαν οι πρώτες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας οι οποίες βασίζονταν σε τεχνολογίες όπως η PtT (Push to Talk), το κινητό τηλεφωνικό σύστημα (MTS – Mobile Telephone System) και μετέπειτα τα προηγμένα κινητά τηλεφωνικά συστήματα (IMTS – Improved Mobile Telephone System).

Αρχικά, το πρώτο κινητό τηλεφωνικό σύστημα ή αλλιώς MTS λειτούργησε το 1946 στο Μιζούρι των Η.Π.Α. όπου και πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες κλήσεις. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιούσε ένα μεγάλο πομπό στην κορυφή ενός ψηλού κτιρίου, ενώ διέθετε μόνο μία συχνότητα (κανάλι) επικοινωνίας η οποία ήταν υπεύθυνη για την αποστολή αλλά και τη λήψη δεδομένων. Η μετάδοση επικοινωνίας ήταν αναλογική και η υπήρχε μόνο η δυνατότητα για μεταφορά φωνής. Ακόμη, ο χρήστης για να απαντήσει σε μία κλήση έπρεπε να πατήσει ένα πλήκτρο ώστε να απενεργοποιήσει τον πομπό και να ενεργοποιήσει τον δέκτη της συσκευής του, ιδιαιτερότητα από την οποία δόθηκε και η ονομασία για την τεχνολογία Push-to-Talk.

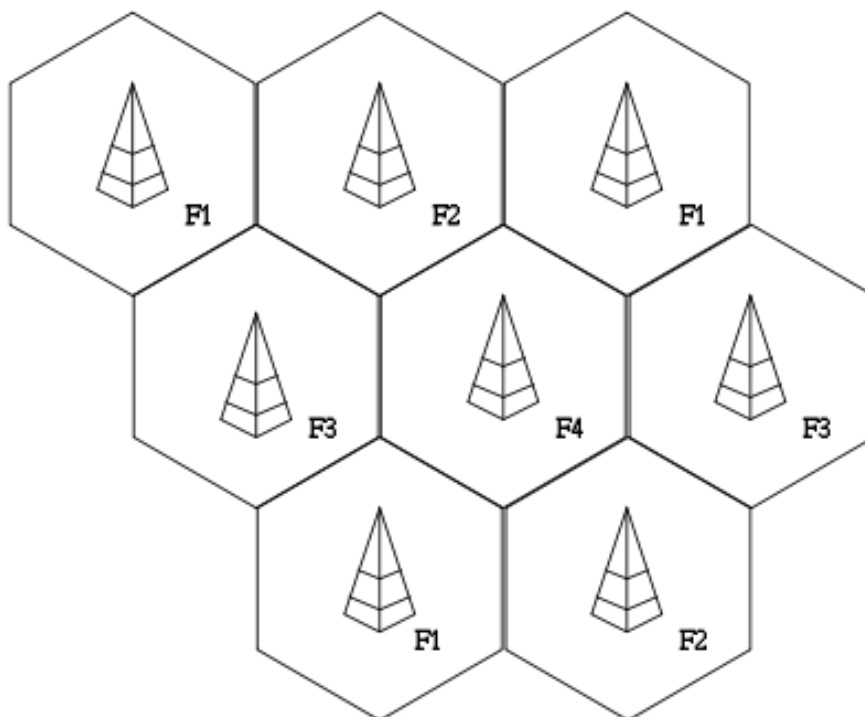
Ωστόσο, το σύστημα MTS αντιμετώπισε αρκετές δυσκολίες και προβλήματα λόγω του μικρού αριθμού συνδρομητών που μπορούσε να φιλοξενήσει καθώς και της πολύ μικρής χωρητικότητας του μοναδικού καναλιού επικοινωνίας που διέθετε. Έτσι, αναπτύχθηκε το σύστημα IMTS το οποίο διέθετε δύο συχνότητες επικοινωνίας, όπου η μία ήταν υπεύθυνη για την αποστολή ενώ η άλλη για τη λήψη της πληροφορίας. Με αυτό τον τρόπο η τεχνολογία PtT καταργήθηκε ενώ δεδομένου ότι τα κανάλια επικοινωνίας ήταν περισσότερα, μπορούσε να φιλοξενήσει μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Το σύστημα IMTS ήταν ένα ραδιοσύστημα συχνοτήτων VHF – UHF όπου συνδεόταν με PSTN (Public Switched Telephone Network) και δεν χρησιμοποιούσε σύνδεση ζωντανού παρόχου όπως το πρόδρομο MTS αλλά εκτελούσε απευθείας κλήση.

Με την πάροδο των ετών, παρόλο που τα παραπάνω συστήματα λειτουργούσαν ταυτόχρονα, δεν μπορούσαν να εξυπηρετήσουν μεγάλο αριθμό συνδρομητών και σε καμία περίπτωση να καλύψουν της ανάγκες της κοινωνίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι τις δεκαετίες '60, '70 όπου η ανάγκη για υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας είχε γίνει μεγάλη, ένας χρήστης για να αποκτήσει την ανωτέρω υπηρεσία έπρεπε να περιμένει στη λίστα αναμονής τουλάχιστον 2 έτη.

2.1.2 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 1^{ης} Γενιάς (1G)

Η άφιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 1^{ης} γενιάς (1G) βελτίωσε πολύ τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ των συνδρομητών, αφού η μετακίνηση των συνδρομητών σε άλλες περιοχές δεν αποτελούσε πλέον πρόβλημα. Η τεχνολογία αυτή γνωστή και ως “**τεχνολογία κυψελοειδών δικτύων**” (cellular networks) έδωσε ένα μεγάλο προβάδισμα στις ασύρματες επικοινωνίες καθώς χάρη στην οργανωμένη της δομή αυξάνει κατά πολύ τη συνδρομητική χωρητικότητα του συστήματος και εκμεταλλεύεται το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων στο έπακρο.[1]

Τα κυψελοειδή δίκτυα χρησιμοποιούν τη βασική ιδέα του **Frequency – Reuse** όπου μία μεγάλη περιοχή διαιρείται σε μικρά κελιά (γνωστές και ως κυψέλες) όπου κάθε κελί χρησιμοποιεί το δικό του πομπό – κεραία. Το μέγεθος κάθε κελιού καθορίζεται από την ισχύ μετάδοσης του πομπού και από την ευαισθησία λήψης του δέκτη. Έτσι, κάθε κελί χρησιμοποιεί μία συχνότητα η οποία όμως μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε άλλο κελί εντός της περιοχής του κυψελωτού δικτύου, αφού η ισχύς μετάδοσης του πομπού είναι ανάλογη του μεγέθους του κελιού του και δεν μπορεί να μεταδοθεί πιο μακριά. Συνεπώς η επαναχρησιμοποίηση των ίδιων συχνοτήτων αυξάνει κατά πολύ τη συνδρομητική χωρητικότητα και δίνει παράλληλα δυνατότητα ραδιοκάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών. Τα κυψελωτά δίκτυα χρησιμοποιούνται έως και σήμερα στις τελευταίες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας (4G, 5G).[2]



Εικόνα 1: Κυψελωτό Δίκτυο [2]

Το πρώτο κυψελοειδές δίκτυο 1^{ης} γενιάς (1G) ξεκίνησε στην περιοχή του Τόκιο της Ιαπωνίας, το 1979 απ’ τη Nippon Telegraph and Telephone (NTT). Το δίκτυο αυτό της NTT κατάφερε να εδραιωθεί σε όλη την Ιαπωνία καθιστώντας το ως το πρώτο

επιτυχημένο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 1^{ης} γενιάς. Το 1981 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το πρότυπο NMT (Nordic Mobile Telephone) στις Σκανδιναβικές χώρες (Σουηδία, Νορβηγία, Δανία, Φιλανδία), όπου βασίστηκε στην αναλογική τεχνολογία 1G και λειτούργησε με δύο μοντέλα: το NMT-450 (459MHz) και το NMT-900 (900MHz). Αυτή η τεχνολογία υιοθετήθηκε και από άλλες χώρες εκτός των Σκανδιναβικών όπως η Ρωσία, η Βουλγαρία και η Πολωνία οι οποίες μάλιστα κατάφεραν την επιπρόσθετη υποστήριξη της λειτουργίας μεταφοράς δεδομένων DMS (Data & Message Service), όπου ήταν και ο πρόδρομος του πρότυπου GSM (Global System for Mobile Communication – 2G).

Το πρότυπο AMPS (Advanced Mobile Phone System) ήταν ένα προηγμένο σύστημα κινητής τηλεφωνίας όπου χρησιμοποιούσε αναλογικές τεχνολογίες 1^{ης} γενιάς (1G) στις Η.Π.Α. Αναπτύχθηκε από τη Bell Labs στα μέσα της δεκαετίας του 1970 στο Σικάγο, ενώ το 1992 ήταν πλέον πλήρως διαθέσιμο εμπορικά, με τη Motorola να πουλάει τα πρώτα κινητά τηλέφωνα. Το πρότυπο AMPS αποτελούταν από κελιά μήκους περί των 20 χλμ., ενώ χρησιμοποιούσε συχνότητες μεταξύ 824MHz και 894MHz. Ακόμα, χρησιμοποιούσε την τεχνολογία FDMA (Frequency Division Multiplexing Access) η οποία διαχωρίζει τα κανάλια ώστε οι χρήστες να έχουν πρόσβαση στο τηλεφωνικό δίκτυο χωρίς να υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ τους.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας 1G συνεχίστηκε και από άλλες χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο με το πρότυπο TACS (Total Access Communication System) ή το πρότυπο C-Netz όπου αναπτύχθηκε στη Γερμανία, την Πορτογαλία και τη Νότια Αφρική. Ωστόσο, η μη συμβατότητα των ανωτέρω προτύπων μεταξύ τους, η μικρή παροχή υπηρεσιών, η μικρή χωρητικότητα του δικτύου καθώς και η αναλογική τεχνολογία του σήματος που απαιτούσε τεράστια ισχύ, ήταν οι βασικοί λόγοι για τη μετάβαση στις επόμενες τεχνολογίες που ανέπτυξαν τα ψηφιακά δίκτυα.

2.1.3 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2^{ης} Γενιάς (2G)

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2^{ης} γενιάς σκοπό είχαν την αντικατάσταση του αναλογικού κυψελοειδούς δικτύου σε ψηφιακό. Αρχικά, εισήχθησαν στο εμπόριο το 1991 στη Φινλανδία, από τις εταιρίες Telenokia και Siemens και είχαν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των προηγούμενων, μερικά εκ των οποίων είναι η ψηφιακή μετάδοση των δεδομένων, η κρυπτογράφηση των τηλεφωνικών συνομιλιών, το καλύτερο φάσμα που λειτουργούν, καθώς και η δυνατότητα υπηρεσιών αποστολής δεδομένων (SMS/MMS). Το βασικό πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ευρέως γνωστό **GSM**, πρότυπο όπου χρησιμοποιείται έως και σήμερα. [1], [3]

Το πρότυπο GSM ξεκίνησε ως Ευρωπαϊκό πρότυπο και είχε στόχο τη δημιουργία ενός πανευρωπαϊκού συστήματος κινητής τηλεφωνίας όπου όλες οι Ευρωπαϊκές χώρες θα μπορούσαν να επικοινωνούν μεταξύ τους. Το βασικότερο χαρακτηριστικό του GSM είναι δημιουργία της μονάδα ταυτοποίησης συνδρομητή (κάρτα SIM), η οποία είναι μια αποσπώμενη κάρτα που περιέχει πληροφορίες για το συνδρομητή και είναι μοναδική για αυτόν. Με την κάρτα αυτή οι τηλεφωνικές κλήσεις μπορούν να δρομολογηθούν αυτοματοποιημένα στο συνδρομητή που έχει επιλεγεί.

Το GSM αποτελείται από ένα δίκτυο το οποίο χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη:

- Ο κινητός σταθμός (MS) όπου είναι οι κινητές συσκευές που κατέχουν όλοι οι συνδρομητές συμπεριλαμβανομένης της κάρτας SIM.
- Ο σταθμός βάσης (BS) ο οποίος περιλαμβάνει όλο τον εξοπλισμό όπου χρειάζεται για να δέχεται και να διαχειρίζεται τις κλήσεις από τους συνδρομητές (MS) μέσα σε μία κυψέλη.
- Το κέντρο κινητών επικοινωνιών (MSC) όπου κύρια λειτουργία είναι να λάβει την κλήση του συνδρομητή από το BS και ακολούθως να τη μεταβιβάσει στον κατάλληλο δέκτη – συνδρομητή. Η μεταβίβαση γίνεται είτε μέσω άλλου MSC, εάν ο συνδρομητής βρίσκεται σε άλλη κυψέλη, είτε μέσω του BS, εάν ο συνδρομητής βρίσκεται στην ίδια κυψέλη.

Το GSM χρησιμοποιεί διαίρεση χρόνου γνωστή και ως τεχνολογία TDMA (Time Division Multiple Access), ενώ όπως και οι προηγούμενες τεχνολογίες (0G & 1G) αρχικά λειτουργούσε με την τεχνική μεταγωγής κυκλώματος (circuit switching). Το πρώτο δίκτυο GSM ονομάστηκε GSM900 λόγω του ότι λειτουργούσε στη συχνότητα των 900MHz, και ακολούθως αναπτύχθηκαν και άλλα όπως το GSM1800 (1800MHz).

Τα δίκτυα 2G εξελίχθηκαν ακόμα περισσότερο με την τεχνολογία GPRS (General Packet Radio Service) η οποία είναι μία κινητή υπηρεσία δεδομένων που δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες για μεταφορά δεδομένων σε μορφή πακέτων. Με την τεχνολογία GPRS η αποστολή της πληροφορίας γίνεται με διαιρεμένα πακέτα τα οποία είναι πολύ μικρού μεγέθους (λίγα Kbytes) και έτσι το δίκτυο απασχολείται μόνο όταν ο χρήστης θέλει να αποστείλει δεδομένα. Για τη δρομολόγηση των πακέτων στον κατάλληλο χρήστη το GPRS χρησιμοποιεί διευθύνσεις IP όπου κάθε διεύθυνση είναι μοναδική για τον κάθε χρήστη.

Οι υπηρεσίες που προσφέρει το GPRS είναι η αποστολή μηνυμάτων SMS/MMS, η πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω των διευθύνσεων IP καθώς και υπηρεσίες PtP (Point to Point). Τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς σε συνδυασμό με το GPRS ονομάστηκαν δίκτυα 2.5G αφού αποτέλεσαν το ενδιάμεσο διάστημα για τη μετάβαση στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς (3G).

Ακόμα, το 2003 στις Η.Π.Α. αναπτύχθηκε μία προέκταση του GSM γνωστή και ως τεχνολογία EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) η οποία επιτυγχάνει πολύ υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και χωρητικότητας στο δίκτυο. Το EDGE λειτουργεί συνεργατικά με το GSM και το GPRS και η βασική του τεχνική είναι ότι άλλαξε τον τρόπο διαμόρφωσης των δεδομένων που μεταφέρονται (διαμόρφωση 8-PSK) με τη μορφή πακέτων. Το EDGE αποτελεί ένα βήμα πριν την τεχνολογία 3^{ης} γενιάς (3G) για αυτό και έχει μείνει γνωστό ως δίκτυο 2.75G. [3]

2.1.4 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} Γενιάς (3G)

Η ραγδαία αύξηση της χρήσης και ζήτησης νέων υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας οδήγησε στην προτυποποίηση της επόμενης γενιάς δικτύων κινητής τηλεφωνίας (3^η γενιά). Ο βασικός στόχος των δικτύων 3G ήταν η παροχή ενός μεγάλου αριθμού υπηρεσιών οπουδήποτε βρίσκεται ο χρήστης και σε κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, με τη χρήση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς κάθε χρήστης είχε τη δυνατότητα να εξυπηρετείται παντού, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου δεν υπήρχε κάλυψη δικτύων 3G στην περιοχή του, αφού θα εξυπηρετούταν από έτερα ασύρματα δίκτυα όπως οικιακά ασύρματα δίκτυα, δορυφορικά δίκτυα ή άλλα κυψελωτά δίκτυα.

Αρχικά, το 1998 δημιουργήθηκε ο Οργανισμός 3GPP (3rd Generation Partnership Project) ο οποίος ήταν υπεύθυνος για την ανάπτυξη των προδιαγραφών του δικτύου 3G. Στον οργανισμό αυτό συμμετείχαν αρκετοί οργανισμοί από διάφορες χώρες όπως ο ARIB και ο TTC της Ιαπωνίας, ο ETSI της Ευρώπης, ο TTA της Κορέας, καθώς και ο T1P1 των Η.Π.Α. Μέσα από τον οργανισμό 3GPP δημιουργήθηκε το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών ή UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Το UMTS είναι το σύστημα 3^{ης} γενιάς που επικράτησε σε Ευρώπη και Ιαπωνία.[4]

Το σύστημα UMTS αποτελείται από την ακόλουθη δομή:

- Εξοπλισμό χρήστη – UE (User Equipment). Αποτελείται από τον εξοπλισμό της κινητής συσκευής, καθώς και την κάρτα USIM η οποία είναι αντίστοιχη της κάρτας SIM του δικτύου GSM.
- Δίκτυο ασύρματης πρόσβασης – UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network). Διαχειρίζεται τους ασύρματους πόρους του δικτύου.
- Κεντρικό δίκτυο – CN (Core Network). Είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση, την ταυτοποίηση και τον εντοπισμό των χρηστών.

Το σύστημα UMTS χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες GSM και WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Η τεχνολογία WCDMA η οποία εξελίχθηκε και αυτή από τον οργανισμό 3GPP, χρησιμοποιεί εύρος ζώνης τα 5 MHz, κάτι το οποίο έδωσε πολύ μεγάλες ταχύτητες (της τάξεως των Mbps) στα δίκτυα 3^{ης} γενιάς. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί δύο διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας: Την FDD (Frequency Division Duplex) και την TDD (Time Division Duplex). Η FDD διαχωρίζει σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων τη μετάδοση λήψης (downlink) με τη μετάδοση αποστολής (uplink) της πληροφορίας. Έτσι, κάθε χρονική στιγμή μπορεί να πραγματοποιείται αποστολή και λήψη πληροφορίας αλλά με μικρότερο εύρος ζώνης. Αντιθέτως, η TDD χρησιμοποιεί την ίδια ζώνη συχνοτήτων για τη μετάδοση λήψης και αποστολής χρησιμοποιώντας χρονοθυρίδες για το καθένα. Έτσι επιτυγχάνει πιο μεγάλες ταχύτητες αλλά με ενδεχόμενη καθυστέρηση είτε στην αποστολή είτε στη λήψη πληροφορίας. Η τεχνολογία WCDMA χρησιμοποιεί είτε FDD είτε TDD, αναλόγως της περιοχής και του διαθέσιμου φάσματος. [5]

Περί το 2007 ο οργανισμός 3GPP ανέπτυξε τη μέθοδο HSPA (High Speed Packet Access) η οποία εξέλιξε τα δίκτυα 3G σε δίκτυα 3,5G. Πρόκειται για μία συλλογή

πρωτοκόλλων κινητής τηλεφωνίας όπου βελτίωσε πολύ τις επιδόσεις του συστήματος UMTS. Σκοπός του HSPA ήταν η προσθήκη ενός νέου τύπου ευρυζωνικού καναλιού το οποίο θα είναι βελτιστοποιημένο για πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Μέσα από αυτή τη μέθοδο αναπτύχθηκαν διάφορες λειτουργίες με επικρατέστερη στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες την HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) όπου έφτανε ταχύτητες μετάδοσης τα 7,2 Mbps. [6]

Αντίστοιχα το 1998 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής αναπτύχθηκε ο οργανισμός 3GPP2 ο οποίος αποσκοπούσε και αυτός στην ανάπτυξη δικτύων 3^{ης} γενιάς. Ο οργανισμός αυτός ανέπτυξε το σύστημα CDMA2000 όπου δραστηριοποιήθηκε κυρίως στην Ασία και την Αμερική. Συνοπτικά, το σύστημα CDMA2000 αποτελείται από μία υβριδική 2.5G/3G τεχνολογία όπου χρησιμοποιεί εύρος ζώνης μικρότερο από το UMTS και συνεπώς προσφέρει μικρότερες ταχύτητες. Αργότερα, πολλές εταιρίες των Η.Π.Α. επέλεξαν το σύστημα UMTS λόγω των ανώτερων χαρακτηριστικών του. Τα συστήματα UMTS και CDMA2000 χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων των 2GHz.

Τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς ήταν μία μεγάλη εξέλιξη για τις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας καθώς έδωσαν τη δυνατότητα για την ανάπτυξη πολύ σημαντικών υπηρεσιών μερικές εκ των οποίων είναι η υπηρεσίες ευρέσεως θέσης (Global Positioning System – GPS), υπηρεσίες βιντεοκλήσεων, καθώς και υπηρεσίες βίντεο συνεχούς ροής (Video Streaming).

2.1.5 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4^{ης} Γενιάς (4G)

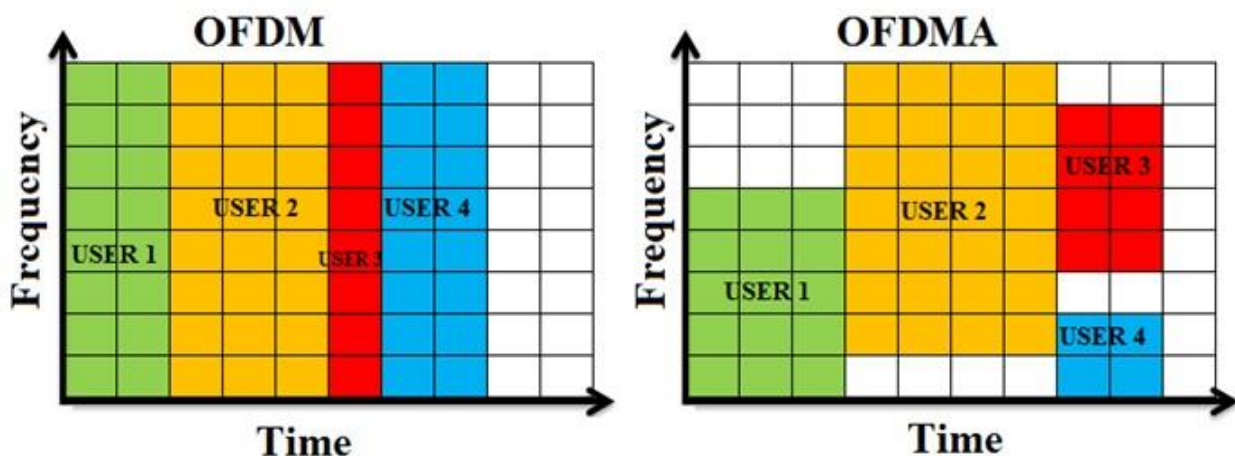
Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4^{ης} γενιάς ήταν η επόμενη ολοκληρωμένη εξέλιξη στις ασύρματες επικοινωνίες μετά τα δίκτυα 3G. Αρχικά, το 2004 ο οργανισμός 3GPP ξεκίνησε μία μελέτη για την ανάπτυξη της τεχνολογίας LTE (Long Term Evolution) η οποία θα βελτίωνε την τεχνολογία UMTS (3G) σε συνδυασμό με τη GSM (2G). Βασικός στόχος ήταν τα συστήματα επικοινωνιών τους να παραμείνουν ανταγωνιστικά και να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των χρηστών. Η τεχνολογία LTE άλλαξε τον τρόπο μετάδοσης των δεδομένων καθώς η μετάδοση όλων των πληροφοριών (ομιλία και δεδομένα) πραγματοποιούταν με την τεχνολογία μεταγωγής πακέτου (All-in-IP). Ακόμη, αυξήθηκε κατά πολύ η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων όπου ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης έφτασε τα 300 Mbps στην κάτω ζεύξη (downlink) και τα 75 Mbps στην άνω ζεύξη (uplink).

Ωστόσο, η ανάγκη για μετάδοση μεγάλου όγκου πληροφοριών στους χρήστες καθώς και παροχής υπηρεσιών υψηλής ποιότητας, κατέστησε επιτακτική την ανάγκη για υψηλότερες ταχύτητες. Έτσι, στις αρχές του 2008 ξεκίνησε ο πρώτος σχεδιασμός για τα δίκτυα 4G, όπου ο διεθνής τηλεπικοινωνιακός σύνδεσμος (ITU-R – International Telecommunication Union) καθόρισε ένα σύνολο απαιτήσεων με το όνομα International Advanced Mobile Telecommunications (IMT-A). Μία από τις απαιτήσεις που καθορίστηκε ήταν τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς να δουλεύουν με 100Mbit/s ταχύτητα δεδομένων για επικοινωνίες υψηλής κινητικότητας (π.χ. αυτοκίνητα - τρένα) και 1Gbit/s για επικοινωνίες χαμηλής κινητικότητας (π.χ. πεζούς χρήστες), ταχύτητες στις οποίες η τεχνολογία LTE δεν ανταποκρινόταν και συνεπώς έπρεπε να αναβαθμιστεί.

Το φθινόπωρο του 2009, η 3GPP υπέβαλε ένα βελτιωμένο σύστημα που ανταποκρινόταν στις απαιτήσεις της ITU, γνωστό και ως LTE-Advanced. Το LTE-A τεχνικά δεν είχε μεγάλες διαφορές από το LTE αλλά ουσιαστικά προσέφερε υψηλότερες ταχύτητες κάτι το οποίο απαιτούσαν για να πληροί τα κριτήρια της ITU. Οι δύο βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιεί η τεχνολογία LTE-A είναι η MIMO (Multiple Input – Multiple Output) και η OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access). [6], [7]

Η πολλαπλή είσοδος – πολλαπλή έξοδος ή “MIMO” είναι γνωστή μέθοδος όπου χρησιμοποιείται συχνά στη ραδιοφωνία. Χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό κεραιών στο πομπό καθώς και το δέκτη, με αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας μίας ραδιοζεύξης και τελικά την ενίσχυση του σήματος. Ωστόσο, στη σημερινή εποχή η τεχνολογία MIMO λειτουργεί διαφορετικά στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αφού δεν ενισχύει απλά το σήμα αλλά αυξάνει τη χωρητικότητα στο δίκτυο, βελτιώνει την ταχύτητα μετάδοσης ροών δεδομένων, καθώς και την ποιότητα των μεταφερόμενων δεδομένων. Η τεχνολογία MIMO όπως προαναφέρθηκε, διαθέτει μεγάλο αριθμό κεραιών και χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές όπως η ποικιλομορφία (χρονική, χωρική, συχνότητας) και η κατευθυντήρια ακτινοβολία (beamforming), επιτυγχάνει μεγάλη αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, μείωση των σφαλμάτων καθώς και αποστολή και λήψη πολλών ροών δεδομένων μεταξύ πολλών συσκευών. Η ανωτέρω τεχνολογία καθώς και η μετεξέλιξη της (mMIMO) θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Η τεχνολογία OFDMA είναι η μεταγενέστερη έκδοση της ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM). Η τεχνολογία OFDM διαιρεί ένα σήμα ευρείας ζώνης σε ένα μεγάλο σύνολο υπο-καναλιών στενής ζώνης με τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα υπο-κανάλια να είναι ορθογώνια μεταξύ τους να είναι ομοιόμορφα μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο τα υπο-κανάλια μπορούν μεταδίδουν δεδομένα χωρίς να υπόκεινται στην ίδια ένταση παραμόρφωσης πολλών διαδρομών που αντιμετωπίζει η μετάδοση ενός καναλιού. Ωστόσο η τεχνολογία OFDM μπορεί να υποστηρίξει μόνο ένα χρήστη σε μία δεδομένη χρονική στιγμή. Η τεχνολογία OFDMA υποστηρίζει την ταυτόχρονη μετάδοση χαμηλού ρυθμού δεδομένων από πολλαπλούς χρήστες καθώς όταν σε μία δεδομένη χρονική στιγμή ένας χρήστης δεν χρειάζεται όλα τα υπο-κανάλια, δίνει τα διαθέσιμα σε άλλο χρήστη. [8]



Εικόνα 2: Διαφορά OFDM και OFDMA [8]

Ακόμα, το 2005 τυποποιήθηκε από τον οργανισμό IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) το πρότυπο 802.16e γνωστό και ως “WiMAX 1.0” (Worldwide interoperability Microwave Access) με σκοπό να χρησιμοποιείται ως δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 4^{ης} γενιάς. Η τεχνολογία που προσφέρεται με αυτό το πρότυπο είναι παρόμοια με του Wi-Fi αλλά παρέχει πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια (περί τα 35χλμ). Το πρότυπο WiMAX 1.0 δεν πληρούσε και αυτό τις προδιαγραφές IMT-A του ITU. Έτσι το 2009 ο IEEE υπέβαλε τη βελτιωμένη έκδοση του κάτω από τις προδιαγραφές IEEE 802.16m, γνωστό και ως κινητό WiMAX 2.0. Η τεχνολογία WiMAX έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με το LTE και χρησιμοποιεί ίδιες τεχνολογίες όπως η MIMO και η OFDMA. Ωστόσο, στην παγκόσμια αγορά η τεχνολογία LTE έχει μακράν μεγαλύτερη υποστήριξη και είναι η κυρίαρχη τεχνολογία κινητών επικοινωνιών. [9]

Τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς κυριαρχούν στη σημερινή εποχή και έχουν αναβαθμίσει σε τεράστιο βαθμό τις κινητές επικοινωνίες. Ωστόσο, οι απαιτήσεις ολοένα και αυξάνονται, αφού οι IOT τεχνολογίες εξελίσσονται ραγδαία, νέες τεχνολογίες προκύπτουν (ρομποτική, τηλεϊατρική κ.α.) και συνεπώς η αναβάθμιση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας είναι απολύτως απαραίτητη και αναγκαία.

2.2 Σύντομη Περιγραφή των 5G

Όπως είδαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, κάθε γενιά κινητής τηλεφωνίας είχε σκοπό να προσφέρει πιο γρήγορες, αξιόπιστες και αποδοτικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας στο χρήστη. Κάθε γενιά κινητής τηλεφωνίας προσέφερε νέες τεχνολογίες, καινοτόμους τρόπους μετάδοσης των δεδομένων και επιδίωκε στην εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών. Συνεπώς, και η νέα γενιά κινητής τηλεφωνίας γνωστή και ως “τεχνολογία 5G” έχει στόχο να διευρύνει ακόμα περισσότερο αυτό το πεδίο και να προσφέρει ένα πιο εξελιγμένο φάσμα ασύρματων υπηρεσιών στο χρήστη.

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς έχουν δημιουργηθεί με σκοπό να αυξήσουν τη χωρητικότητα του δικτύου (δυνατότητα σύνδεσης περισσότερων χρηστών), να πολλαπλασιάσουν την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων των χρηστών, καθώς και να μειώσουν την καθυστέρηση (latency) στο δίκτυο. Για να κατανοήσουμε καλύτερα την αλλαγή που θέλει να επιφέρει η τεχνολογία 5G, αρκεί να συγκρίνουμε ορισμένες από τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί για τα δίκτυα 5G με αυτές των 4G.

Key Requirements	4G (LTE)	5G
Peak Data Rate	1 Gbit/s	20 Gbit/s
UE Data Rate	10 Mbit/s	100 Mbit/s
Mobility	350 Km/h	500 Km/h
Latency	10ms	<1ms
Connection Density	10 ⁵ devices/km ²	10 ⁶ devices/km ²
Area Traffic Capacity	0.1 Mbit/s/m ²	10 Mbit/s/m ²

Πίνακας 1: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ 4G και 5G

Τα πρώτα βήματα για τη δημιουργία των δικτύων 5^{ης} γενιάς πραγματοποιήθηκαν στις αρχές του 2012 όπου ο οργανισμός ITU ξεκίνησε ένα πρόγραμμα για την ανάπτυξη τους με την ονομασία “IMT 2020 and Beyond”, θέτοντας έτσι τις βάσεις για την έναρξη ερευνητικών δραστηριοτήτων. Ακολούθως, το 2015 ο ITU καθόρισε ένα σύνολο απαιτήσεων για τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς με το όνομα IMT-2020. Στις 13 Ιουνίου 2018 ανακοινώθηκε από τον οργανισμό 3GPP η ολοκλήρωση των προδιαγραφών για το 5G γνωστή και ως Έκδοση 15 (release 15), και με αυτό τον τρόπο ολοκληρώθηκε η πρώτη φάση της διαδικασίας προτυποποίησής του. Ακολούθως, τον Ιούνιο του 2020 ο 3GPP ανακοίνωσε την έκδοση 16 όπου ουσιαστικά με αυτήν ξεκίνησαν και οι διεργασίες για την ανάπτυξη των προτύπων της έκδοσης 15. Έτσι, τον Φεβρουάριο του 2021 ο ITU δημοσίευσε την πρώτη έκδοση των προδιαγραφών IMT-2020 η οποία αφορούσε τις τεχνολογίες που είχε εκδώσει ο 3GPP. [10], [11]

Ακόμα, τον Ιούλιο του 2012 η Επιτροπή της ΕΕ κάλεσε την ευρωπαϊκή βιομηχανία για μια συζήτηση προσανατολισμού προκειμένου να δημιουργηθεί μία σύμπραξη δημόσιου – ιδιωτικού τομέα με σκοπό νέες λύσεις, αρχιτεκτονικές, τεχνολογίες και πρότυπα για τις υποδομές επικοινωνίας της 5^{ης} γενιάς. Έτσι, στα τέλη του 2013 δημιουργήθηκε η 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP) όπου είναι μια κοινή πρωτοβουλία μεταξύ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και της ευρωπαϊκής βιομηχανίας ΤΠΕ (κατασκευαστές ΤΠΕ, φορείς εκμετάλλευσης τηλεπικοινωνιών, πάροχοι υπηρεσιών, ΜΜΕ και ερευνητικά ιδρύματα). Οι βασικοί στόχοι που τέθηκαν στο εν λόγω πρόγραμμα είναι οι εξής: [12]

- 1000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα ασύρματης περιοχής.
- Εξοικονόμηση έως και 90% ενέργεια ανά παρεχόμενη υπηρεσία
- Δημιουργία ενός ασφαλούς και αξιόπιστου δικτύου με “μηδενικό αντιληπτό” χρόνο διακοπής για την παροχή υπηρεσιών.
- Ανάπτυξη ασύρματων συνδέσεων επικοινωνίας με σκοπό τη σύνδεση άνω των 7 τρισεκατομμυρίων ασύρματων συσκευών.
- Εξασφάλιση πρόσβασης σε όλες τις τοποθεσίες με χαμηλό κόστος.

Το 5G PPP χωρίστηκε σε τρεις (3) φάσεις. Στην 1^η φάση έγιναν 83 προτάσεις και μόνο οι 19 εγκρίθηκαν προς υλοποίηση. Στην 2^η φάση εγκρίθηκαν μόλις 21 νέα έργα προς υλοποίηση από τις 101 προτάσεις. Σήμερα το 5G-PPP βρίσκεται στην τρίτη του φάση όπου πολλά νέα έργα έχουν μπει σε εφαρμογή και πολλά ακόμα βρίσκονται στα στάδια δοκιμών. Τα εν λόγω προγράμματα έχουν δημιουργήσει πολλές νέες και καινοτόμες τεχνολογίες όπως οι έξυπνες πόλεις, ευφυείς μεταφορές, εξελιγμένη εκπαίδευση και ψυχαγωγία, ηλεκτρονική υγεία και με αυτόν τον τρόπο έχει ενισχυθεί η Ευρωπαϊκή βιομηχανία στις Παγκόσμιες αγορές.[12]

Η έλευση των δικτύων 5^{ης} γενιάς στην Ελλάδα πραγματοποιήθηκε στις 16 Δεκεμβρίου 2020 όπου η Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείου (ΕΕΤΤ) χορήγησε δικαιώματα χρήσης ραδιοσυχνοτήτων στις ζώνες 700 MHz, 2 GHz, 3400 – 3800 MHz και 26 GHz, σε τρεις εταιρίες (COSMOTE, VODAFONE, WIND). Με την ανωτέρω αδειοδότηση δόθηκε η δυνατότητα για την ανάπτυξη των δικτύων 5G στην Ελλάδα, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας των επιχειρήσεων και γενικότερα την αναβάθμιση στην οικονομία της χώρας. Επίσης, η Ελλάδα συμμετείχε με την εταιρία COSMOTE στο ερευνητικό project 5G-XHaul, πρόγραμμα το οποίο ανήκει

στο 5G PPP και αφορά την ανάπτυξη δικτύων πρόσβασης C-RAN (Cloud Radio Access Networks) με λογισμικό SDN (Software Defined Networking), λειτουργία NFV (Network Functions Virtualization) και αρχιτεκτονικές Fronthaul και Backhaul, έννοιες οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.[13]

2.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά 5G

Όπως γίνεται προφανές με τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς θα μπορεί να κατασκευαστεί ένας υπερσυνδεδεμένος δικτυακός κόσμος όπου κάθε χρήστης θα είναι συνεχώς συνδεδεμένος με τον υπόλοιπο κόσμο, με πολύ γρήγορη μετάδοση δεδομένων και μηδαμινές καθυστερήσεις. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να επιτευχθούν κάποιες τεχνολογικές αλλά και φυσικές αλλαγές στο δίκτυο 5G. Είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν νέες καινοτόμες αρχιτεκτονικές οι οποίες θα μπορέσουν να στηρίξουν τις απαιτήσεις των εν λόγω δικτύων. Ορισμένες από τις αλλαγές που αναπτύσσονται ήδη και θα αναλυθούν παρακάτω είναι οι εξής:

- Αρχιτεκτονικές Fronthaul & Backhaul ανάμεσα στο νέο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (C-RAN) με σκοπό την εξυπηρέτηση του μεγάλου όγκου των διακινούμενων δεδομένων.
- Δικτυακή τεχνολογία SDN ώστε να υπάρχει μία κεντρική διαχείριση των δεδομένων και της δρομολόγησης τους.
- Υπηρεσία δικτύου NFV με σκοπό την υποστήριξη εικονικών διακομιστών και εικονικών χώρων αποθήκευσης (cloud).
- Τεχνική Network Slicing με σκοπό τον τεμαχισμό του δικτύου σε πολλά επιμέρους εικονικά δίκτυα.
- Χρήση πολλαπλών κεραιών για αύξηση της χωρητικότητας στο δίκτυο με αναβάθμιση της τεχνολογίας MIMO σε massive MIMO.
- Χρήση συχνοτήτων στο μικροκυματική ζώνη (mmWave) 30-300GHz.

Η αρχιτεκτονική των δικτύων 5^{ης} γενιάς χωρίζεται σε τρία επίπεδα, το επίπεδο των πόρων υποδομής (resources and functional level), το επίπεδο Δικτύου (network level) και το επίπεδο των υπηρεσιών και της οντότητας E2E (end-to-end).

Επίπεδο Πόρων και Λειτουργιών

Είναι το πρώτο επίπεδο και περιλαμβάνει τους φυσικούς πόρους για την επικοινωνία, την αποθήκευση καθώς και την ανάπτυξη του λογισμικού στο δίκτυο κορμού (core network). Περιλαμβάνει το Edge Cloud όπου προσφέρεται ευελιξία και μείωση του φυσικού χώρου, το Central Cloud όπου εκτελείται όλη η διαχείριση του δικτύου και το Wide Area Network (WAN) όπου δημιουργεί ένα κοινό δίκτυο από το σύνολο των πληροφοριακών συστημάτων.

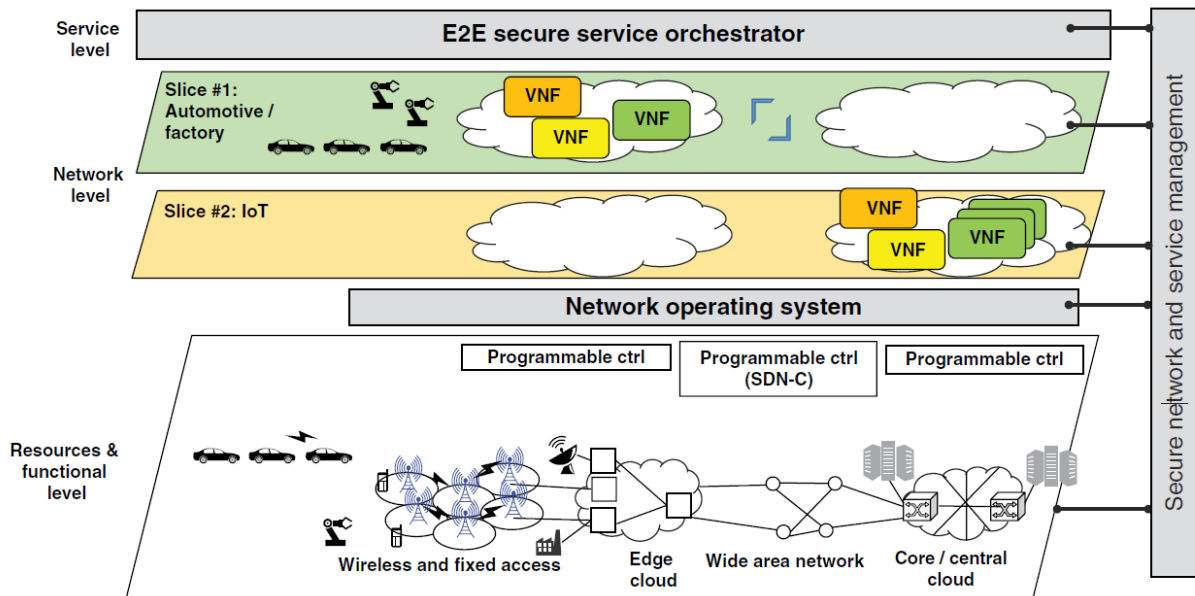
Επίπεδο Δικτύου

Αποτελεί το δεύτερο επίπεδο όπου ουσιαστικά είναι το λειτουργικό σύστημα του δικτύου και εκτελείται η εικονοποίηση του δικτύου (Virtualization). Σε αυτό το επίπεδο με την εικονοποίηση δημιουργούνται και τα διαφορετικά επίπεδα δικτύου γνωστά ως

“network slices” όπου κάθε “slice” επιτελεί και μία διαφορετική λειτουργία για την ομαλή λειτουργία του δικτύου.

Επίπεδο υπηρεσιών και της Οντότητας E2E

Είναι το τρίτο και τελευταίο επίπεδο όπου εκτελείται όλη η διαχείριση του μεγάλου ποσοστού των υπηρεσιών που παρέχονται. Οργανώνει τα “slices” με δυναμικό τρόπο με σκοπό την υποστήριξη μεγάλου πλήθους διαφορετικών υπηρεσιών ταυτόχρονα.



Εικόνα 3: Αρχιτεκτονική 5G δικτύου [14]

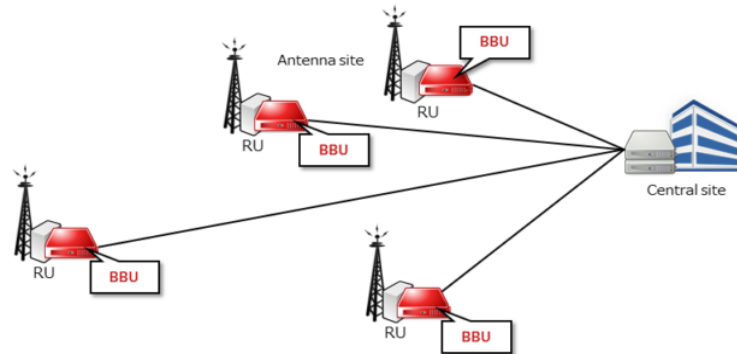
2.3.1 Δίκτυο πρόσβασης 5G RAN

Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης ή RAN (Radio Access Network) είναι ένα σημαντικό κομμάτι των ασύρματων επικοινωνιών αφού είναι υπεύθυνο για τη σύνδεση της κινητής συσκευής του χρήστη (UE) με το δίκτυο κορμού (Core Network). Παραδοσιακά ένα δίκτυο RAN ονομάζεται D-RAN (Distributed RAN) και αποτελείται από πολλούς αυτόνομους σταθμούς βάσης γνωστοί Base Transceiver Station (BTS). Κάθε BTS διαθέτει το Remote Radio Head (RRH) δηλαδή την κεραία που δέχεται τα πακέτα δεδομένων από το χρήστη, το Baseband Unit (BBU) όπου λαμβάνει το πακέτο από το RRH το επεξεργάζεται με σκοπό να το προωθήσει στο δίκτυο κορμού και τις διεπαφές αυτών.

Στα δίκτυα 3^{ης} γενιάς ο σταθμός βάσης BTS ονομάζεται Node Base (NB) και χρησιμοποιούσε διαφορετική αρχιτεκτονική από αυτή των δικτύων 1^{ης} και 2^{ης} γενιάς (τεχνολογία WCDMA). Στα δίκτυα 4G κάθε σταθμός βάσης αναβαθμίστηκε αισθητά αφού χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία OFDMA και έτσι η ονομασία τους άλλαξε σε eNB όπου (evolved NB). Για να είναι δυνατή η υποστήριξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς δημιουργήθηκαν τα επόμενης γενιάς RAN γνωστά και ως NG-RAN (Next Generation RAN). Ένα δίκτυο NG-RAN αποτελείται είτε από τους νέας τεχνολογίας σταθμούς βάσης gNB (Next Generation NB) οι οποίοι αφορούν αποκλειστικά τεχνολογίες 5G, είτε σταθμούς βάσης NG-eNB (Next Generation – evolved NB) οι οποίοι

είναι μία βελτιωμένη έκδοση των σταθμών βάσης, eNB με τη βασική διαφορά ότι δίνουν τη δυνατότητα σύνδεσης των χρηστών 5G μέσω της τεχνολογίας 4G-LTE. [15]

D-RAN (Distributed RAN)

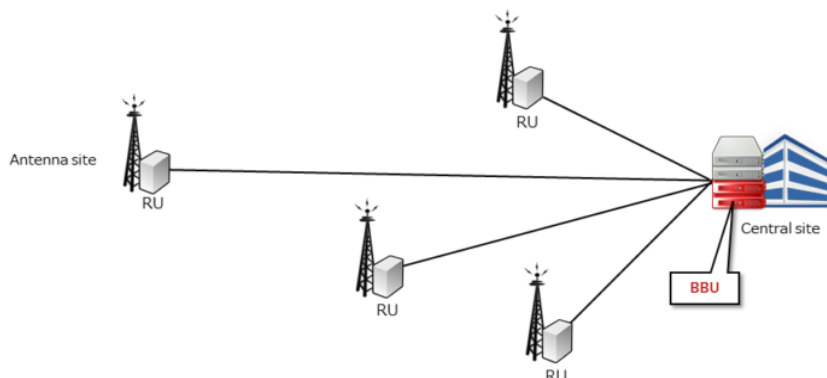


Εικόνα 4: Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης D-RAN [15]

C-RAN (Centralized / Cloud RAN)

Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης C-RAN αποτελεί μία νέα και καινοτόμα αρχιτεκτονική που εκμεταλλεύεται τεχνολογίες όπως η υπολογιστική νέφος (cloud computing) και η εικονοποίηση (virtualization), με σκοπό την μείωση του κόστους, την καλύτερη εκμετάλλευση των πόρων στο δίκτυο καθώς και τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Στην εν λόγω αρχιτεκτονική όλα τα BBU τοποθετούνται σε ένα κεντρικό σημείο (centralized) όπου διαχειρίζονται από εκεί με αποτέλεσμα οι BTS ή NB να διαθέτουν μόνο τα RRH. Έτσι, με την τοποθέτηση των BBU σε ένα κεντρικό σημείο μειώνεται το κόστος συντήρησης αλλά δίνεται και η δυνατότητα για εφαρμογή νέων τεχνολογιών και λειτουργιών. Ακόμα, με την ομαδοποίηση των BBU δημιουργείται η δυνατότητα για εκτέλεση εικονοποίησης όπου με αυτόν τον τρόπο δίνεται μεγάλη επεκτασιμότητα στο δίκτυο. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης απόστασης που δημιουργείται μεταξύ των κεραιών RRH και BBU χρησιμοποιείται η αρχιτεκτονική Fronthaul (θα αναλυθεί παρακάτω) με σκοπό την απρόσκοπτη σύνδεση μεταξύ τους, χωρίς να επηρεάζεται η ασύρματη απόδοση. [15]

C-RAN (Centralized RAN)

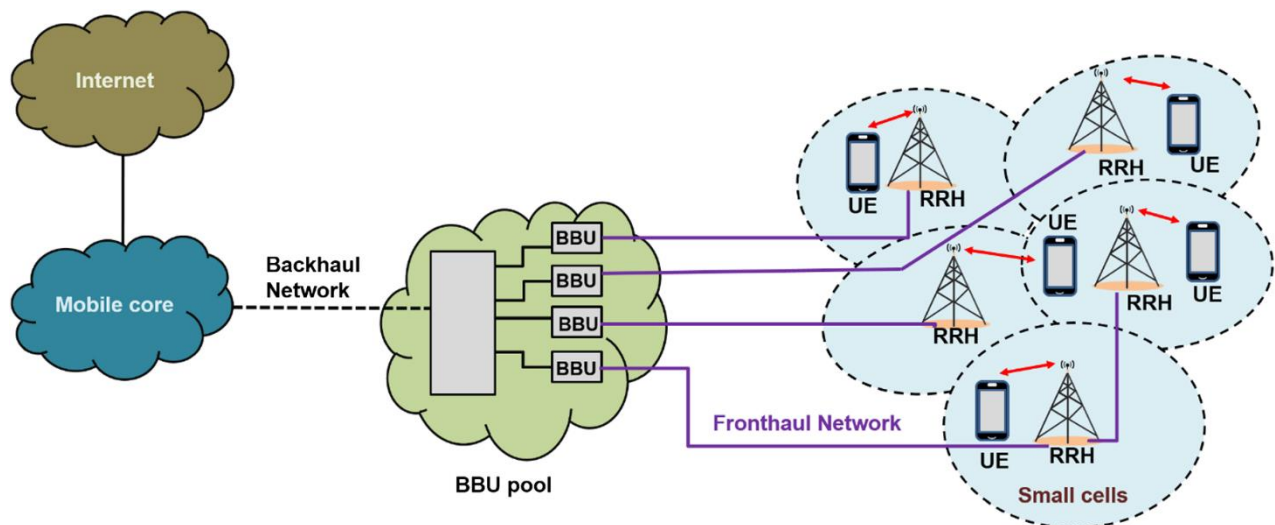


Εικόνα 5: Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης C-RAN [15]

2.3.2 Αρχιτεκτονική Fronthaul & Backhaul

Σε ένα δίκτυο ραδιοπρόσβασης RAN η σύνδεση μεταξύ της κεραίας (RRH) και της μονάδας βασικής ζώνης (BBU) ονομάζεται **Fronthaul** ενώ η σύνδεση μεταξύ της μονάδας βασικής ζώνης με το κεντρικό δίκτυο (Core Network) ονομάζεται **Backhaul**. Στα ευρυζωνικά δίκτυα είναι πολύ σημαντικό οι δύο αυτές συνδέσεις να παρέχουν μεγάλες ταχύτητες με πολύ μικρές καθυστερήσεις. Τα εξελιγμένα δίκτυα ραδιοπρόσβασης όπως το C-RAN που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, απαιτούν αρχιτεκτονικές Fronthaul και Backhaul πολύ εξελιγμένες. [16]

Στα δίκτυα Fronthaul γίνεται χρήση του πρότυπου CPRI (Common Public Radio Interface) το οποίο επιτρέπει την αντικατάσταση μίας χάλκινης σύνδεσης καλωδίου με διαφορετικού τύπου (π.χ. οπτική ίνα), με σκοπό να μπορεί να μεταφερθεί σε μία απομακρυσμένη τοποθεσία. Επίσης, γίνεται χρήση εξελιγμένων οπτικών ινών με σκοπό να μην επηρεάζεται η απόδοση λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ της RRH και του BBU. Τα δίκτυα Backhaul χρησιμοποιούν κυρίως τρία (3) φυσικά μέσα: καλώδιο χαλκού, οπτικές ίνες και μικροκυματικές συνδέσεις. Για την παροχή υψηλών αποδόσεων και την αξιοποίηση των δικτύων 5^{ης} γενιάς προτιμάται η χρήση εξελιγμένης οπτικής ίνας.



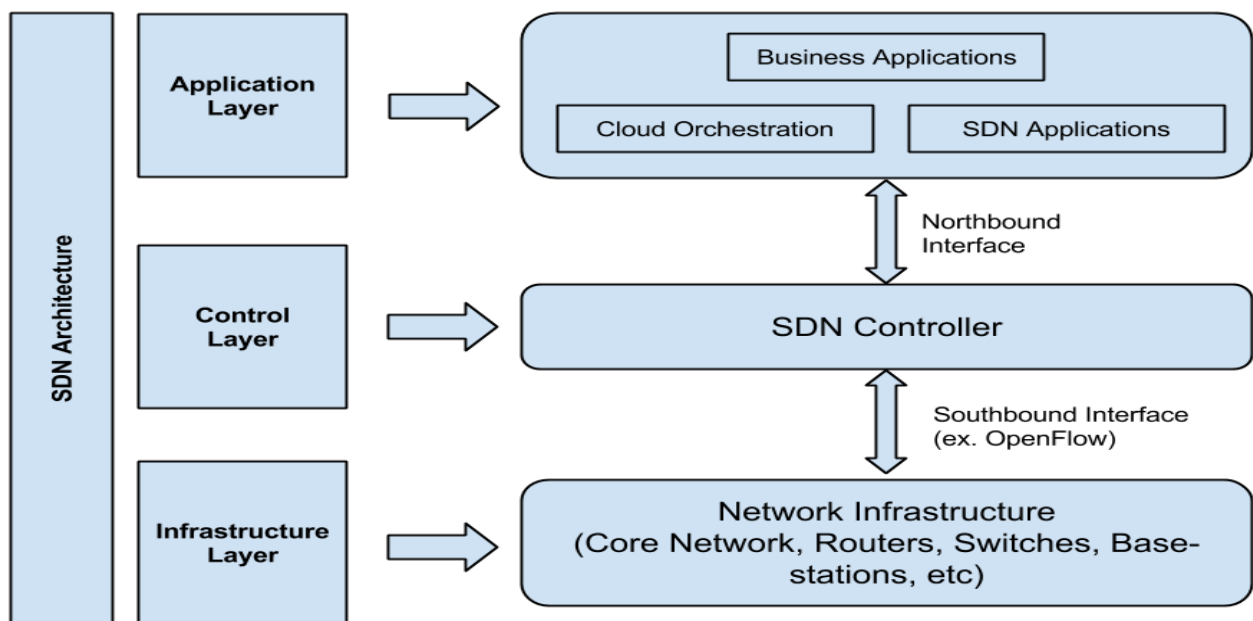
Εικόνα 6:Υποδομή Fronthaul & Backhaul [16]

2.3.3 Τεχνολογία SDN (Software Defined Networks)

Το Software Defined Networking (SDN) αποτελεί μία δικτυακή τεχνολογία όπου βελτιώνει πολύ τον τρόπο με τον οποίο δρομολογούνται τα πακέτα δεδομένων. Στο SDN η διαχείριση των αποφάσεων για τη δρομολόγηση των πακέτων εκτελείται από ένα κεντρικό σημείο που ονομάζεται Ελεγκτής (Controller). Με την εν λόγω τεχνολογία διαχωρίζεται το επίπεδο προώθησης από το επίπεδο ελέγχου και συνεπώς η διαχείριση του δικτύου γίνεται πιο ευέλικτη και εύκολη. [17], [18]

Η τεχνολογία SDN σε ένα δίκτυο αποτελείται από τα εξής δομικά στοιχεία:

- **SDN εφαρμογές:** Είναι εφαρμογές ασφαλείας, διαχείρισης δικτύων ακόμα και εμπορικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σε μεγάλα κέντρα δεδομένων. Οι εφαρμογές αυτές επικοινωνούν με τους ελεγκτές μέσω API's (Application Programming Interface) με σκοπό να λάβουν τις απαιτούμενες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του δικτύου, τυχόν αλλαγές που έχουν προκύψει καθώς και προβλήματα που μπορεί να έχουν δημιουργηθεί. Με αυτό τον τρόπο οι SDN εφαρμογές έχουν μία ακριβή εικόνα του δικτύου και μπορούν να προσαρμόζονται αναλόγως, για καλύτερη και αποδοτικότερη χρήση του δικτύου.
- **SDN Controller:** Ο ελεγκτής ή Controller αποτελεί τον ενδιάμεσο κόμβο ανάμεσα στις SDN εφαρμογές και τις δικτυακές συσκευές. Λαμβάνει τις εντολές από τις εφαρμογές και τις προωθεί στις συσκευές και αντίστοιχα λαμβάνει πληροφορίες από τις συσκευές και τις προωθεί στις εφαρμογές. Επίσης, ο SDN ελεγκτής διαχειρίζεται όλες τις πληροφορίες που λαμβάνει χρησιμοποιώντας ένα σύνολο κανόνων και πολιτικών.
- **SDN Δικτυακές Συσκευές:** Αποτελούν τις συσκευές (routers, switches κ.α.) που τελικά προωθούν τα πακέτα δεδομένων στο δίκτυο αλλά λαμβάνουν υπόψιν τις πληροφορίες και εντολές που έχουν λάβει από τον SDN ελεγκτή.



Εικόνα 7: Δομή της Αρχιτεκτονικής SDN [17]

Η τεχνολογία SDN έχει σκοπό να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς των παραδοσιακών δικτυακών αρχιτεκτονικών παρέχοντας ευέλικτο και ευφυές δίκτυο. Με την δημιουργία των ελεγκτών δίνεται η δυνατότητα για δυναμική διαμόρφωση του δικτύου και πλέον οι δικτυακές συσκευές δεν απαιτείται να λαμβάνουν αποφάσεις παρά μόνο να προωθούν τα πακέτα στο δίκτυο.

2.3.4 Τεχνολογία NFV (Network Functions Virtualization)

Η λειτουργία εικονοποίησης δικτύου ή όπως είναι γνωστή ως τεχνολογία NFV, έχει σκοπό την αντικατάσταση κάποιων λειτουργιών από τις φυσικές συσκευές όπως τη μετάφραση διεύθυνσης δικτύου (NAT – Network Address Translation), το τείχος προστασίας (Firewalls), τις υπηρεσίες ονόματος τομέα (DNS – Domain Name System) και την ενσωμάτωση τους σε εικονικές μηχανές και δίκτυα. Με αυτό τον τρόπο μειώνει τον αριθμό και το μέγεθος του φυσικού υλικού που πρέπει να χρησιμοποιείται για τις υπηρεσίες δικτύου. Τα πλεονεκτήματα της εν λόγω αρχιτεκτονικής είναι αρκετά, μερικά εκ των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω: [18]

- Μείωση των συνολικών δαπανών λόγω μη ανάγκης αγοράς επιπλέον φυσικού εξοπλισμού.
- Μικρότερος χρόνος ανάπτυξης και υλοποίησης νέων υπηρεσιών δικτύωσης αφού όλα θα προσαρμόζονται στις εικονικές μηχανές.
- Δυνατότητα για προσαρμογή του δικτύου στις απαιτήσεις του πελάτη.
- Μεγάλη ευελιξία. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας απλά χρησιμοποιείται έτερη εικονική μηχανή.

Η τεχνολογία NFV στα δίκτυα 5G θα δώσει τρομερή ευελιξία αφού ένα αξιόπιστο δίκτυο τεχνολογίας 5G θα μπορεί να χωριστεί σε πολλά εικονικά παρέχοντας πλήθος δυνατοτήτων και επιλογών. Η δυνατότητα αυτή γνωστή και ως “Network Slicing” η οποία θα αναλυθεί περαιτέρω στην επόμενη υποενότητα, θα χωρίζει σε τεμάχια το δίκτυο 5G με αποτέλεσμα να προσφέρονται διαφορετικά προφίλ δικτύου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και δυνατότητες, αναλόγως των αναγκών των χρηστών και γενικότερα της αγοράς. Οι υπηρεσίες θα μπορούν να αναβαθμίζονται συνεχώς και να εξελίσσονται χωρίς την ανάγκη για αλλαγή εξοπλισμού. [18], [19]

Η NFV είναι μία καινοτόμα τεχνολογία που μπορεί να συνδυαστεί και να αξιοποιηθεί πλήρως με την τεχνολογία SDN που αναφέρθηκε πιο πάνω. Είναι προφανές ότι μία τεχνολογία όπου διαχειρίζεται τις αποφάσεις και τη δρομολόγηση των πακέτων από ένα κεντρικό σημείο (Controller) όπως η SDN, μπορεί να βελτιωθεί σε τεράστιο βαθμό με την προσθήκη των εικονοποιημένων λειτουργιών και υπηρεσιών μέσω της αρχιτεκτονικής NFV. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα για κεντρική διαχείριση των υπηρεσιών του δικτύου και ταυτόχρονα βελτιστοποιείται η λειτουργία τους μέσω εικονικών μηχανών, δικτύων και μέσων αποθήκευσης.

2.3.5 Network Slicing

Το Network Slicing γνωστό και ως “Τεμαχισμός Δικτύου” αποτελεί μία τεχνική γνωστή για την ευελιξία και την αποτελεσματικότητα που παρέχει σε ένα δίκτυο. Η τεχνική αυτή διαχωρίζει ένα φυσικό δίκτυο σε πολλά εικονικά, με σκοπό κάθε εικονικό δίκτυο να παρέχει συγκεκριμένες λειτουργίες στους χρήστες ανάλογα με τις ανάγκες τους. Συνδυάζοντας το με τις τεχνολογίες SDN και NFV κάθε εικονικό δίκτυο μπορεί να καλύπτει ένα φάσμα υπηρεσιών το οποίο θα ανατίθεται δυναμικά στους χρήστες ανάλογα με τις ανάγκες τους, και συνεπώς σε περιπτώσεις όπου μία υπηρεσία απαιτεί

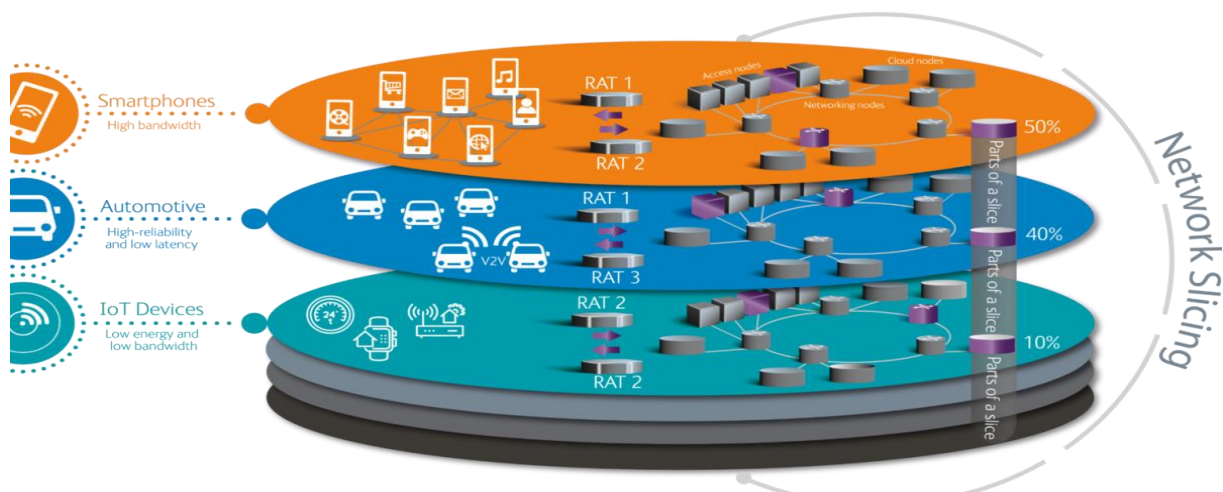
περισσότερους πόρους από το δίκτυο, τότε δυναμικά θα “τεμαχίζονται” τα εικονικά δίκτυα σύμφωνα με τις νέες ανάγκες.[50]

Το Network Slicing αποτελεί μία τεχνική η οποία συμβάλει καθοριστικά στην ανάπτυξη και υποστήριξη των IoT (Internet of Things) εφαρμογών σε δίκτυα 5^{ης} γενιάς (5G). Με τον τεμαχισμό του δικτύου σε πολλά επιμέρους εικονικά δίκτυα μπορούν να αναπτυχθούν ποικίλες IoT εφαρμογές, όπου ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών οι πόροι του δικτύου να καταμερίζονται δυναμικά.

Η αρχιτεκτονική του Network Slicing χωρίζεται σε τρία (3) επιμέρους επίπεδα (layers) τα οποία περιγράφονται ως ακολούθως: [50], [51]

- **Service Layer:** Το επίπεδο υπηρεσίας είναι υπεύθυνο για την ορθή διαχείριση και εποπτεία του τεμαχισμού του δικτύου καθώς και για τον κύκλο ζωής αυτών. Επίσης, συνδέεται με το μοντέλο το οποίο καθορίζει τις απαιτήσεις και τις ιδιότητες που θα έχουν τα τεμάχια του δικτύου.
- **Network Function Layer:** Το επίπεδο αυτό έχει σκοπό τη δημιουργία των τμημάτων/τεμαχίων του δικτύου με βάσει τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί από το επίπεδο υπηρεσίας (service layer) καθώς και τον συντονισμό της λειτουργίας αυτών.
- **Infrastructure Layer:** Αποτελεί το επίπεδο υποδομής και ασχολείται κυρίως με την υποδομή του φυσικού δικτύου. Είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη, τη διαχείριση και την εποπτεία των φυσικών υποδομών του δικτύου με σκοπό την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του. Περιλαμβάνει φυσικές συσκευές όπως Routers, Switches, Servers καθώς και τους σταθμούς βάσης (BS).

Τέλος, το Network Slicing αποτελείται από έναν διαχειριστή όπου ονομάζεται Network Slice Controller, και ο οποίος λειτουργεί ως καταναμητής λειτουργιών των τεμαχίων (slices) σε όλο τον κύκλο ζωής τους. Διασυνδέεται με διάφορες λειτουργίες από κάθε επίπεδο με σκοπό την ορθή και ασφαλή διαχείριση των τμημάτων/τεμαχίων του δικτύου. Προσπαθεί να διαχειριστεί τα τεμάχια του δικτύου με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η πολυπλοκότητα των εργασιών τους και ταυτόχρονα να εκμεταλλεύονται πλήρως όλοι οι πόροι του δικτύου.



Εικόνα 8: 5G Network Slicing [51]

2.4 Massive MIMO

Όπως αναφέρθηκε και στα δίκτυα 4^{ης} γενιάς η τεχνολογία MIMO (πολλαπλή είσοδος – έξοδος) είναι μία αρκετά αποδοτική μέθοδος αφού με τη χρήση πολλαπλών κεραιών για την εκπομπή και λήψη δεδομένων αυξάνεται η χωρητικότητα στο δίκτυο, η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων καθώς και η ποιότητα στη μεταφορά τους. Στη σημερινή εποχή, ο όρος “MIMO” χρησιμοποιείται για να περιγράψει την τεχνική για αποστολή και λήψη πολλαπλών σημάτων ταυτόχρονα, μέσω της ίδια συχνότητας, με αποτέλεσμα την δημιουργία πολλαπλής μετάδοσης. [20]

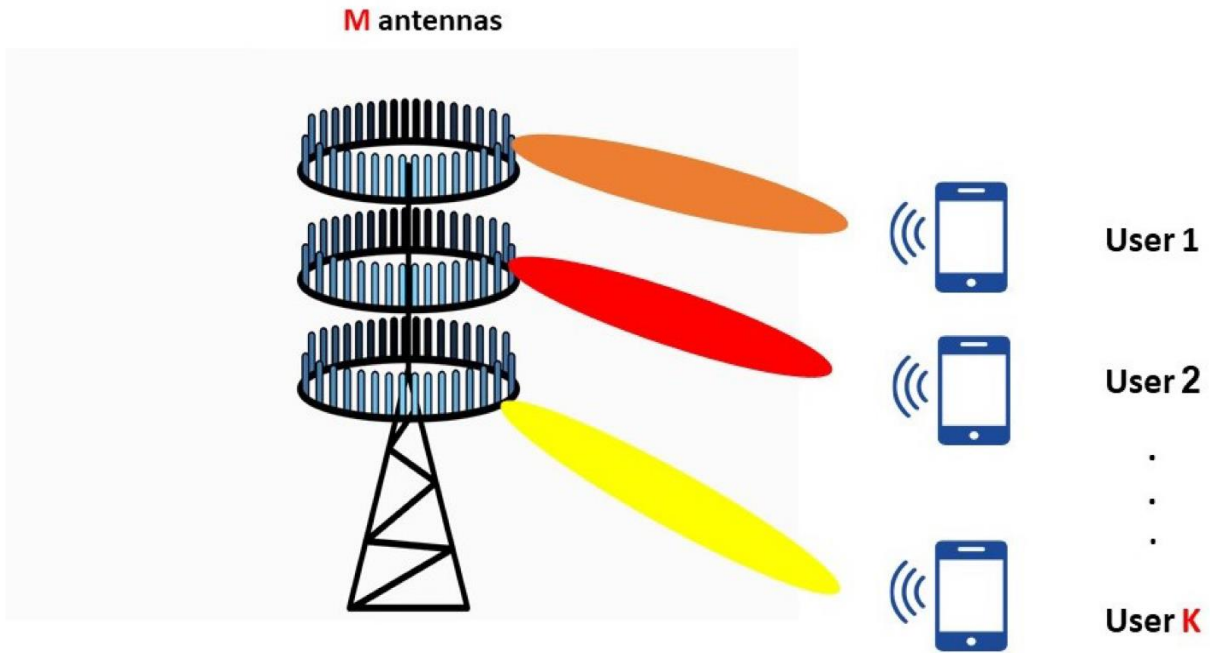
Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η MIMO τεχνολογία χωρίζεται σε τρεις (3) κατηγορίες και περιγράφονται ως εξής:

- **Χωρική πολυπλεξία:** Η χωρική πολυπλεξία χωρίζει το σήμα που πρόκειται να μεταδοθεί σε σήματα μικρότερης ισχύος, τα οποία μεταδίδονται από διαφορετικές κεραιές εκπομπής διαμέσου διαφορετικών καναλιών αλλά με την ίδια συχνότητα. Έτσι, επιτυγχάνεται αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και μείωση των σφαλμάτων στο δέκτη. Η χωρική πολυπλεξία μπορεί να συνδυαστεί πολύ αποδοτικά με την προ-κωδικοποίηση όταν υπάρχει γνώση για τα κανάλια στα οποία θα μεταδοθούν τα σήματα. Ακόμα, με τη χωρική πολυπλεξία υπάρχει η δυνατότητα για ταυτόχρονη μετάδοση σημάτων σε πολλαπλούς δέκτες.
- **Προ-κωδικοποίηση (Precoding):** Στην προ-κωδικοποίηση εκτελείται όλη η χωρική επεξεργασία στον πομπό. Ο πομπός αποτελείται από έναν κωδικοποιητή (κωδικοποίηση καναλιών και συμβόλων) και τον προ-κωδικοποιητή ο οποίος σκοπό έχει να καθορίσει ποιο ποσοστό της συνολικής ισχύος πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε κάθε υπό-κανάλι για την μετάδοση των σημάτων. Όταν δεν υπάρχει γνώση για τα κανάλια στα οποία θα μεταδοθούν τα σήματα γίνεται χρήση του γραμμικού προ-κωδικοποιητή ο οποίος κατευθύνει τα σήματα χωρικά με ειδικές τεχνικές (water-filling) οι οποίες δεν θα αναλυθούν στην παρούσα διπλωματική.
- **Κωδικοποίηση ποικιλομορφίας:** Εκτελείται όταν δεν υπάρχει γνώση για το κανάλι που θα μεταδοθούν τα σήματα. Η πληροφορία που πρόκειται να μεταδοθεί εκπέμπεται από πολλαπλές κεραιές με σκοπό την αξιοπιστία μετάδοσης της. Η ανεξάρτητη εξασθένιση των κεραιών ενισχύει την πολυμορφία του σήματος. Η κωδικοποίηση ποικιλομορφίας μπορεί να συνδυαστεί με τη χωρική πολυπλεξία όταν υπάρχει μία σχετική γνώση του του καναλιού όπου θα μεταδοθούν τα σήματα.

Η τεχνολογία massive MIMO (mMIMO) η οποία σκοπό έχει να χρησιμοποιείται καθολικά στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς, εξελίσσει την προαναφερθείσα MIMO χρησιμοποιώντας τις τεχνικές της και αυξάνοντας σε τεράστιο αριθμό τις κεραιές μετάδοσης και λήψης. Με αυτό τον τρόπο αυξάνει σε μεγάλο βαθμό τη χωρητικότητα στο δίκτυο και μπορεί να υποστηρίξει πολύ μεγαλύτερο αριθμό χρηστών και υπηρεσιών.

Για να κατανοήσουμε την αναβάθμιση που θα επιφέρει η mMIMO αρκεί να αναφέρουμε ότι πλέον κάθε κεραία θα αποτελείται από μεγάλο αριθμό υποκεραιών και

θα διαθέτει την δική της συχνότητα (Radio Frequency) με αποτέλεσμα πολύ μεγάλη αύξηση της χωρητικότητας, με πολύ μικρές καθυστερήσεις. Ακόμα, η τεχνολογία mMIMO μπορεί πλέον να συνδυαστεί πλήρως με την τεχνική Beamforming όπου υπάρχει επιλεκτική κατεύθυνση του σήματος με σκοπό την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη και συνεπώς πολύ μεγαλύτερη κάλυψη του δικτύου καθώς και δυνατότητα χρήσης πολύ υψηλών συχνοτήτων (mmWave).



Εικόνα 9: Τεχνολογία massive MIMO [21]

2.5 Μικροκυματική ζώνη (mmWave) των 5G

Η μικροκυματική ζώνη καλύπτει μία περιοχή συχνοτήτων από 0,3MHz έως 300GHz και χωρίζεται σε τρεις (3) επιμέρους ζώνες: τη ζώνη των δεκατομετρικών μικροκυμάτων (UHF), των εκατοστομετρικών μικροκυμάτων (SHF) και τέλος των χιλιοστομετρικών μικροκυμάτων (EHF). Οι ασύρματες ευρυζωνικές επικοινωνίες εξυπηρετούνται σχεδόν καθολικά από μία περιοχή συχνοτήτων που ξεκινάει από αρκετές εκατοντάδες MHz (800MHz) μέχρι λίγα GHz (6GHz), δηλαδή στο φάσμα UHF και SHF. Ωστόσο, το φάσμα στο οποίο λειτουργούν παρουσιάζει έντονη έλλειψη και είναι πολύ περιορισμένο καθώς χρησιμοποιείται σε όλο του το εύρος (χρήση για WIFI, Bluetooth, WIMAX, LPI Αέρος, Δ/Φ κ.α.), με αποτέλεσμα να μην υπάρχει δυνατότητα για αύξηση της χωρητικότητας.

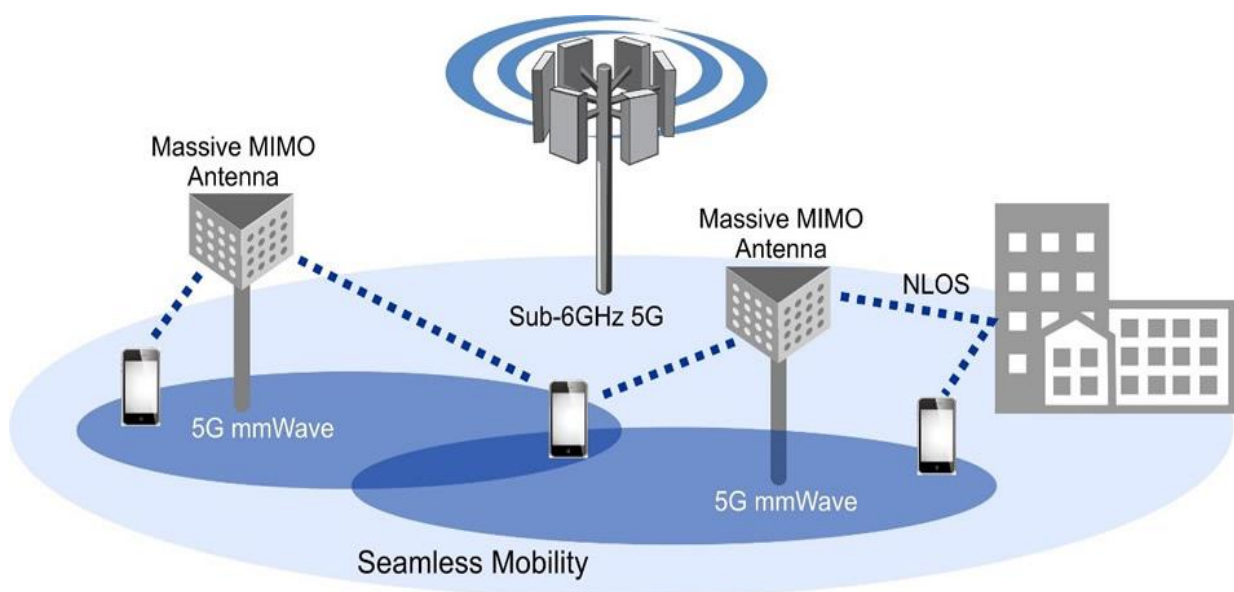
Συνεπώς, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς αντιμετωπίζουν ένα βασικό πρόβλημα, αφού υπάρχει έντονα η απαίτηση για αύξηση του εύρους ζώνης με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας στο δίκτυο καθώς και την εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών, συσκευών και υπηρεσιών. Έτσι, έχει δημιουργηθεί έντονο ενδιαφέρον για τη χρήση της περιοχής συχνοτήτων στη ζώνη των χιλιοστομετρικών μικροκυμάτων (άνω

των 30GHz) γνωστή και ως **mmWave** ζώνη. Αυτή η περιοχή συχνοτήτων δίνει τη δυνατότητα για παροχή μεγάλου εύρους ζώνης λύνοντας τα προβλήματα χωρητικότητας και συμφόρησης. Ειδικότερα έχει δοθεί μεγάλη βαρύτητα στην περιοχή συχνοτήτων γύρω από τα 60GHz (59-62GHz), όπου παρέχεται καθολικά χωρίς να υπάρχει χρήση από άλλες υπηρεσίες. [22],

Ωστόσο, σήματα με τόσο υψηλές συχνότητες (mmWave) έχουν μήκος κύματος της τάξεως του χιλιοστού (όσο μεγαλύτερη συχνότητα τόσο μικρότερο μήκος κύματος), με αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες διάδοσης και ειδικότερα με την ύπαρξη φυσικών εμποδίων (κτίρια, κακές καιρικές συνθήκες κ.α.). Έτσι, η περιοχή κάλυψης της κάθε κυψέλης γίνεται πολύ μικρή και δημιουργείται η ανάγκη για δημιουργία περισσότερων σταθμών βάσης (gNB).

Η χρήση των δικτύων 5G στο mmWave φάσμα μπορεί να συνδυαστεί με την τεχνολογία mMIMO καθώς δίνεται η δυνατότητα για χρήση μεγάλου αριθμού μικρών κεραιών σε κάθε σταθμό βάσης gNB, και έτσι αυξάνεται η χωρητικότητα του δικτύου και ενισχύεται το σήμα που πρόκειται να μεταδοθεί. Ακόμα, η συμπληρωματική χρήση συχνοτήτων κάτω των 6GHz (έχει λάβει την ονομασία sub-6GHz) είναι απαραίτητη για την παροχή καλύτερης κάλυψης και ισχυρότερου σήματος στα δίκτυα 5G. Είναι προφανές ότι με τη συμπληρωματική χρήση των sub-6GHz δεν θα παρέχεται η υψηλότερη δυνατή ταχύτητα και ροή μετάδοσης δεδομένων, αλλά θα υπάρχει συνεχής κάλυψη ακόμα και σε σημεία που υφίστανται φυσικά εμπόδια. [23]

Συνεπώς, η χρήση mmWave στα δίκτυα 5G μπορεί να παρέχεται περισσότερο σε αστικά κέντρα που απαιτείται αυξημένη χωρητικότητα στο δίκτυο και συμπληρωματικά να δίνεται δυνατότητα για χρήση χαμηλότερου φάσματος συχνοτήτων (sub-6GHz), για πλήρη κάλυψη. Η χρήση συχνοτήτων mmWave είναι επιτακτική στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς καθώς οι νέες υπηρεσίες που παρέχονται όπως το IOT ή η τηλεϊατρική απαιτούν αυξημένη χωρητικότητα στο δίκτυο με πολύ μικρές καθυστερήσεις.



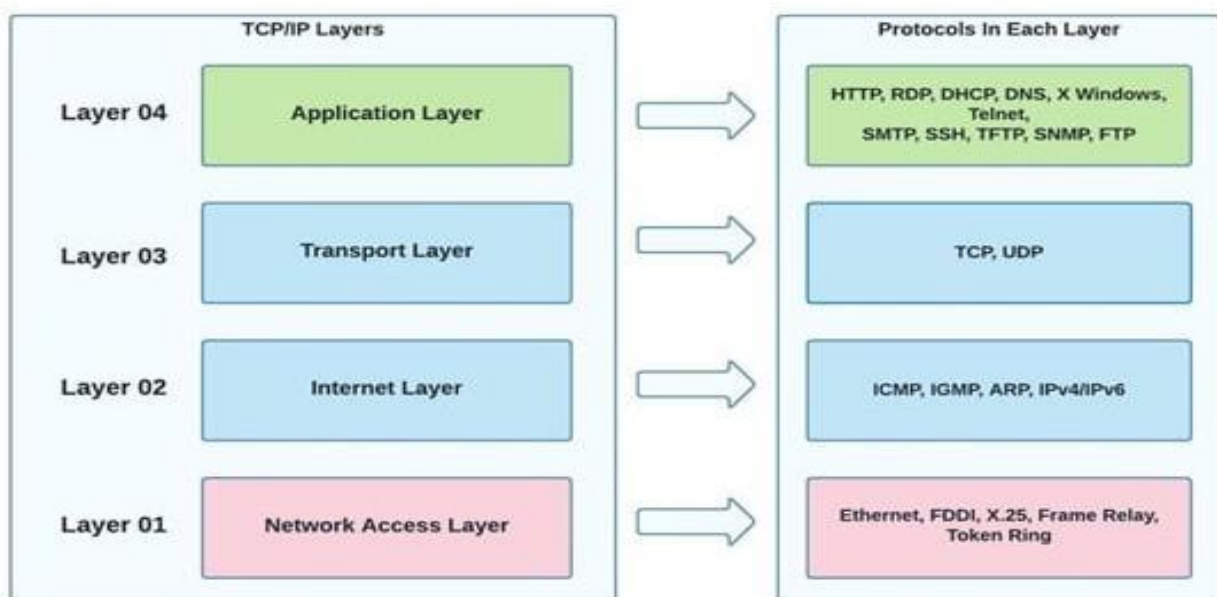
Εικόνα 10: Λειτουργία 5G στο φάσμα mmWave [22]

3. Πρωτόκολλο TCP

3.1 Μοντέλο TCP/IP

Το μοντέλο TCP/IP είναι το βασικότερο μοντέλο επικοινωνίας για την επικοινωνία μεταξύ δύο πληροφοριακών συστημάτων σε ένα δίκτυο. Αποτελεί το βασικότερο μοντέλο επικοινωνίας στο διαδίκτυο και με αυτό πραγματοποιείται η μετάδοση των δεδομένων από έναν υπολογιστή σε έναν άλλο. Το μοντέλο TCP/IP αποτελείται από ένα σύνολο κανόνων και διαδικασιών που πρέπει να ακολουθούν τα πληροφοριακά συστήματα με σκοπό τη σωστή και ομαλή επικοινωνία μεταξύ τους. Τα αρχικά του TCP/IP προέρχονται από τα δύο βασικότερα πρωτόκολλα που χρησιμοποιεί, όπου είναι το TCP (Transmission Control Protocol) ή Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης και το IP (Internet Protocol) ή Πρωτόκολλο Διαδικτύου. [24], [25]

Το TCP/IP είναι ένα ιεραρχικό μοντέλο όπου αποτελείται από τέσσερα (4) βασικά επίπεδα (layers) και το καθένα επιτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες. Κάθε επίπεδο αποτελείται από πρωτόκολλα και στηρίζεται στο προηγούμενο επίπεδο. Έτσι, για να επιτευχθεί η εγκαθίδρυση μίας επικοινωνίας μεταξύ δύο πληροφοριακών συστημάτων είναι απαραίτητη η ομαλή και επιτυχής λειτουργία όλων των επιπέδων (εικόνα 10).



Εικόνα 11: Επίπεδα Μοντέλου TCP/IP [25]

Φυσικό Επίπεδο & Επίπεδο Σύνδεσης Δεδομένων

Αποτελεί το χαμηλότερο επίπεδο στο μοντέλο TCP/IP και είναι υπεύθυνο για την μετάδοση των bits μέσα από το τηλεπικοινωνιακό κανάλι καθώς και για την αξιοπιστία της φυσικής γραμμής σύνδεσης. Χωρίζεται σε δύο επιμέρους υπο-επίπεδα: Το φυσικό επίπεδο (physical layer) και το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων (Data Link Layer).

Επίπεδο Δικτύου

Αποτελεί το δεύτερο επίπεδο του μοντέλου και είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση του πακέτου των δεδομένων στο σωστό αποδέκτη. Αποτελείται από τέσσερα υποστηριζόμενα πρωτόκολλα (ICMP, IGMP, ARP & IP) με βασικότερο το IP (θα αναλυθεί παρακάτω). Το επίπεδο δικτύου είναι βασικό για την ομαλή και σωστή δρομολόγηση των πακέτων, ωστόσο δεν είναι υπεύθυνο για τη σωστή σειρά με την οποία πρέπει να παραδοθούν τα πακέτα.

Επίπεδο Μεταφοράς

Αποτελεί το τρίτο επίπεδο του μοντέλου και η βασική του υπηρεσία είναι η ομαλή μεταφορά των πακέτων δεδομένων από μία εφαρμογή (εκτελούμενο πρόγραμμα) σε μία άλλη. Αποτελείται από τρία (3) βασικά πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων, το TCP (Transmission Control Protocol), το UDP (User Datagram Protocol) όπου χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πακέτων σε εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη μετάδοση (audio & video streaming κ.α.), και το SCTP (Stream Control Transmission Protocol) όπου πρόκειται για ένα νέο πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων με σκοπό τη μεταφορά τηλεπικοινωνιακών σημάτων.

Επίπεδο Εφαρμογής

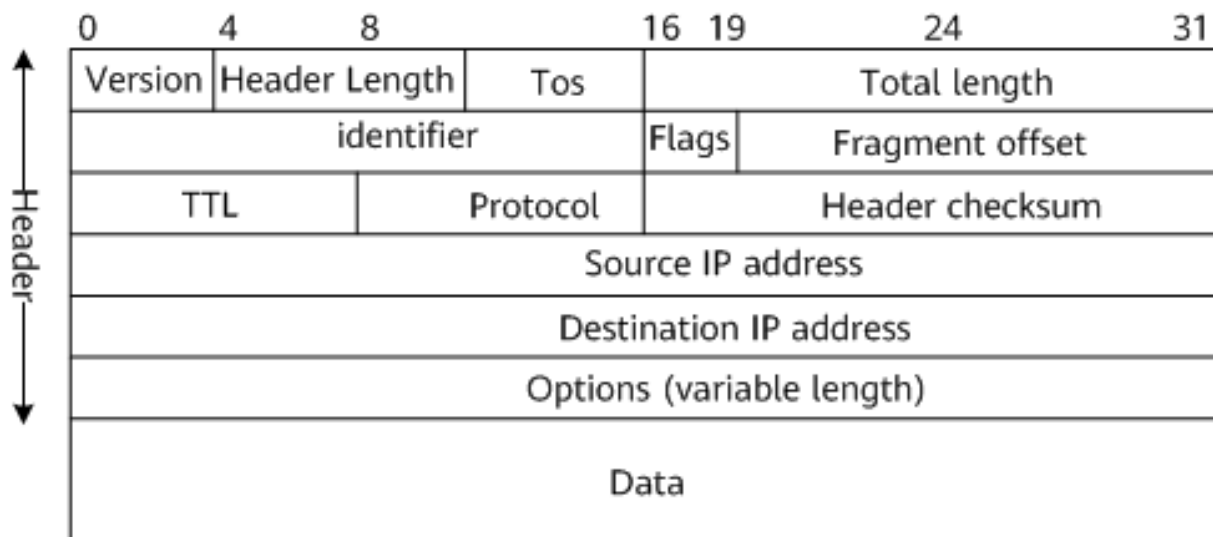
Αποτελεί το τέταρτο και υψηλότερο επίπεδο του μοντέλου και περιλαμβάνει όλα τα πρωτόκολλα του διαδικτύου όπως το DNS (Domain Name System), το HTTP (Hypertext Transfer Protocol), το FTP (File Transfer Protocol), το SMTP (Simple Mail Transfer Protocol), το DHCP (Dynamic, Host Configuration Protocol), το SSH (Secure Shell Protocol) κλπ. Έτσι, σε αυτό το επίπεδο εκτελείται τελικά όλη η διεπαφή των εκτελούμενων προγραμμάτων με το χρήστη καθώς και η επεξεργασία των δεδομένων που έχουν ληφθεί από το επίπεδο μεταφοράς.

Το μοντέλο TCP/IP αποτελεί την κυρίαρχη σούιτα για την επικοινωνία υπολογιστών στο διαδίκτυο και χρησιμοποιείται ευρέως σχεδόν σε όλους τους τύπους δικτύων. Ωστόσο, ένα ακόμα μοντέλο που επιτελεί τον ίδιο σκοπό με το TCP/IP είναι το μοντέλο OSI (Open System Interconnection) όπου έχει σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό αλλά έχει διαφορετική δομή όσον αφορά τα επίπεδα του. Οι προδιαγραφές του είναι περίπλοκες και για την επίτευξη πλήρους λειτουργικότητας αυτού σε ένα δίκτυο απαιτείται πολύς χρόνος και κόστος, με αποτέλεσμα σήμερα να έχει περιοριστεί αρκετά και να χρησιμοποιείται μόνο ένα υποσύνολο του. Συνοπτικά το μοντέλο OSI αποτελείται από επτά (7) επίπεδα τα οποία είναι: [26]

- Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer)
- Επίπεδο ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer)
- Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)
- Επίπεδο Μεταφοράς (Transport Layer)
- Επίπεδο Συνόδου (Session Layer)
- Επίπεδο Παρουσίασης (Presentation Layer)
- Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer)

3.2 Σύντομη Περιγραφή Πρωτοκόλλου IP

Όπως προαναφέρθηκε το πρωτόκολλο IP (Internet Protocol) βρίσκεται στο επίπεδο δικτύου του μοντέλου TCP/IP, είναι υπεύθυνο για τη σωστή δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων μέσα σε ένα δίκτυο και αποτελεί το βασικό πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στο διαδίκτυο σήμερα. Για να επιτελέσει τη βασική του υπηρεσία καθορίζει ένα σύστημα διευθυνσιοδότησης όπου κάθε διεύθυνση γνωστή και ως “διεύθυνση IP” είναι μοναδική και αποτελεί το αναγνωριστικό για έναν υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο. Έτσι, σε ένα δίκτυο ένας υπολογιστής δεν μπορεί να έχει ποτέ την ίδια διεύθυνση IP με έναν άλλον. Το πρωτόκολλο IP βασίζεται στην ιδέα των αυτοδύναμων πακέτων, όπου κάθε πακέτο αποστέλλεται ανεξάρτητα από τα άλλα με αποτέλεσμα να μην εξασφαλίζεται η αξιόπιστη μετάδοση τους. Κάθε πακέτο αποτελείται από την κεφαλίδα IP (IP Header) και τα δεδομένα που πρόκειται να μεταδοθούν. Η κεφαλίδα IP (εικόνα 11) περιέχει πληροφορίες για τα δεδομένα του πακέτου, τη διεύθυνση IP του αποστολέα και του παραλήπτη και ουσιαστικά μέσω αυτής γίνεται η σωστή δρομολόγηση των δεδομένων. [27]



Εικόνα 12: Κεφαλίδα IP για IPv4 [28]

Το πρωτόκολλο IP διαθέτει δύο εκδόσεις για τη διευθυνσιοδότηση των πακέτων, την έκδοση 4 (IPv4) όπου είναι και η συνηθέστερη σήμερα στο διαδίκτυο και την έκδοση 6 (IPv6) η οποία εκτιμάται θα επικρατήσει στο μέλλον λόγω της ραγδαίας αύξησης των χρηστών και συσκευών στο διαδίκτυο. Η IPv4 μπορεί να χρησιμοποιήσει μέχρι 32bits (4 bytes) για μία διεύθυνση ενώ η IPv6 μπορεί μέχρι 128bits (16 bytes). Κάθε διεύθυνση μπορεί να γραφτεί είτε σε δυαδική μορφή (0 & 1), είτε σε δεκαδική μορφή (1 έως 9), ενώ στην περίπτωση της IPv6 μπορεί να γραφτεί και σε δεκαεξαδική μορφή (1 έως 9 & A έως F). Έτσι, η IPv4 μπορεί να διαθέσει έως 2^{32} διευθύνσεις ενώ η IPv6 μπορεί να διαθέσει έως 2^{128} διευθύνσεις.

3.3 Σύντομη Περιγραφή Πρωτοκόλλου TCP

Στο διαδίκτυο η μετάδοση των δεδομένων εκτελείται με την τεχνολογία μεταγωγής πακέτων. Τα δεδομένα που πρόκειται να αποσταλούν χωρίζονται σε πακέτα και κάθε πακέτο δρομολογείται στο σωστό παραλήπτη με τη βοήθεια του πρωτοκόλλου IP. Ωστόσο, με το IP πρωτόκολλο δεν μπορούμε να επιβεβαιώσουμε αν το πακέτο παραδόθηκε ή αν παραδόθηκε χωρίς κάποια αλλοίωση ως προς το περιεχόμενό του, και ακόμα με ποια σειρά έφτασαν τα πακέτα για να συνταχθούν σωστά τα αρχικά δεδομένα. Έτσι, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης γνωστό και ως TCP όπου αποτελεί ένα αξιόπιστο πρωτόκολλο πάνω από το IP και είναι από τα βασικότερα πρωτόκολλα στο επίπεδο μεταφοράς (3^ο επίπεδο). [29]

Το TCP είναι ένα πρωτόκολλο διαδικασίας προς διαδικασία (εφαρμογή προς εφαρμογή) και σκοπός του είναι η αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων, χωρίς λάθη ή αλλοιώσεις και με τη σωστή σειρά ώστε το επίπεδο εφαρμογής (ανώτερο επίπεδο) να λαμβάνει τη σωστή πληροφορία για την τελική διεπαφή με το χρήστη. Οι περισσότερες σύγχρονες υπηρεσίες του διαδικτύου όπως το SMTP, το FTP και το HTTP χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο TCP αφού τους παρέχει αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων, χωρίς λάθη και με τη σωστή σειρά. Για να επιτευχθεί η επικοινωνία εφαρμογής προς εφαρμογή το TCP χρησιμοποιεί αριθμούς θυρών. Συνεπώς, το πακέτο δρομολογείται μέσω της διεύθυνσης IP στον σωστό παραλήπτη και μέσω της θύρας κατευθύνεται στη σωστή εφαρμογή. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι πιο γνωστοί αριθμοί θυρών που χρησιμοποιούνται από το TCP.

Ports	Application Layer Protocol	Type	Description
20	FTP	TCP	File Transfer Protocol-Data
21	FTP	TCP	File Transfer Protocol-Control
22	SSH	TCP/UDP	Secure Shell for Secure Login
23	Telnet	TCP	Unencrypted Login
25	SMTP	TCP	Simple Mail Transfer Protocol
53	DNS	TCP/UDP	Domain Name Server
80	HTTP	TCP	Hypertext Transfer Protocol
161,162	SNMP	TCP/UDP	Simple Network Management Protocol
389	LDAP	TCP/UDP	Lightweight Directory Authentication Protocol
443	HTTPS	TCP/UDP	HTTP With Secure Socket Layer

Πίνακας 2: Θύρες που χρησιμοποιούνται από το TCP

Το πρωτόκολλο TCP χωρίζεται σε δύο τμήματα (segments), όπου το πρώτο ονομάζεται κεφαλίδα TCP ή TCP Header και περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για το πακέτο που πρόκειται να μεταδοθεί με σκοπό την ασφαλή και αξιόπιστη μετάδοση του, και το δεύτερο στο οποίο βρίσκονται τα δεδομένα που πρόκειται να αποσταλούν. Επίσης, για να επιτευχθεί η μεταφορά των πακέτων μέσω του TCP είναι απαραίτητη η εγκαθίδρυση μίας σύνδεσης τύπου Client – Server (πελάτη – διακομιστή) όπου οριοθετείται με ένα σήμα έναρξης και ένα σήμα λήξης.

3.4 Χαρακτηριστικά TCP

Είναι προφανές ότι για να παρέχονται οι υπηρεσίες που αναφέρθηκαν, το TCP διαθέτει αρκετά χαρακτηριστικά τα οποία συντελούν στην ομαλή και ασφαλή μετάδοση των πακέτων.

3.4.1 Κεφαλίδα TCP

Το πρωτόκολλο TCP για να μπορέσει να επιτελέσει το σκοπό του, διαθέτει μία επικεφαλίδα γνωστή και ως TCP Header με την οποία παρέχονται οι απαραίτητες πληροφορίες για να εδραιωθεί μία αξιόπιστη, ασφαλής και χωρίς λάθη σύνδεση μεταξύ δύο διαδικασιών (προγραμμάτων). Η επικεφαλίδα TCP έχει ελάχιστο μήκος 20bytes και μπορεί να φτάσει τα 60bytes εφόσον έχουν συμπληρωθεί όλα τα πεδία (υποχρεωτικά & προαιρετικά).

+	Bits 0 - 3	4 - 9	10 - 15	16 - 31
0	Source Port Θύρα Προέλευσης		Destination Port Θύρα Προορισμού	
32	Sequence Number Αριθμός ακολουθίας			
64	Acknowledgment Number Αριθμός επιβεβαίωσης			
96	Data Offset	Reserved	Flags Σημαίεις	Window Παράθυρο
128	Checksum Άθροισμα ελέγχου		Urgent Pointer Επείγοντα δεδομένα	
160	Options Επιλογές (προαιρετικές)			

Εικόνα 13: Κεφαλίδα TCP [30]

Στην εικόνα 12 φαίνεται μία κεφαλίδα TCP με τα πεδία που περιλαμβάνει. Τα πεδία αυτής αναλύονται ως εξής: [29]

- **Source Port:** Είναι η θύρα από την οποία προέρχεται το πακέτο
- **Destination Port:** Είναι η θύρα στην οποία δρομολογείται το πακέτο.
- **Sequence Number (Αριθμός Ακολουθίας):** Αριθμός ο οποίος δείχνει σε ποιο byte έχει μείνει το πακέτο ώστε να υπάρχει μία ακολουθία, με σκοπό

να υφίσταται έλεγχος ροής και λαθών για τα πακέτα που αποστέλλονται. Ο αριθμός ακολουθίας αφορά τα δεδομένα που στέλνει ο αποστολέας. Η αρίθμηση δεν ξεκινά από το 0 αλλά από έναν τυχαίο αριθμό μεταξύ 0 και $2^{32}-1$.

- **Acknowledge Number (Αριθμός Επιβεβαίωσης):** Είναι ο αριθμός που αποστέλλει ο παραλήπτης με σκοπό να επιβεβαιώσει σε ποιο byte έχει μείνει. Ο αριθμός αυτός αποτελείται από το τελευταίο byte που έχει λάβει και προσθέτει 1 με σκοπό να δείξει το επόμενο byte περιμένει να λάβει στο επόμενο πακέτο. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτός ο αριθμός δεν δείχνει πόσα bytes έχουν ληφθεί συνολικά καθώς όπως αναφέρθηκε η αρίθμηση ξεκινάει από τυχαίο αριθμό.
- **Data Offset:** Αποτελείται από 4 bits και δείχνει το μήκος της επικεφαλίδας TCP. Λαμβάνει τιμές από 5 (0101) έως 15 (1111) και ο αριθμός συμβολίζει 32 bit λέξεις. Έτσι, αν το Data Offset είναι 0101 δηλαδή 5, η κεφαλίδα TCP έχει μήκος 5×32 bit δηλαδή 20 bytes.
- **Reserved:** Περιλαμβάνει 6 bits για μελλοντική χρήση. Πάντα μπαίνει η τιμή 0.
- **Flags:** Διαθέτει προκαθορισμένα τριγράμματα τα οποία επιλέγονται με σκοπό να υποδείξουν μία συγκεκριμένη κατάσταση στη σύνδεση ή να παρέχουν πρόσθετες πληροφορίες. Επομένως, η χρήση τους είναι επιβεβλημένη για αντιμετώπιση προβλημάτων ή για έλεγχο του χειρισμού μία σύνδεσης TCP. Τα βασικότερα τριγράμματα είναι: ACK (Acknowledge), RST (Reset), URG (Urgent), SYN (Synchronize), PSH (Push), FIN (Finish). Αυτό το πεδίο έχει χωρητικότητα 6 bits.
- **Window:** Αφορά το μέγεθος των δεδομένων (bytes) που επιθυμεί να λάβει ο παραλήπτης. Έχει μέγεθος 16 bits και ο αριθμός ξεκινάει από τον αριθμό επιβεβαίωσης (Acknowledge Number).
- **Checksum:** Το πεδίο αυτό είναι μεγέθους 16 bits και η βασική του λειτουργία είναι ο έλεγχος με σκοπό να διαπιστωθεί εάν υπάρχει κάποια αλλοίωση στο πακέτο. Το άθροισμα ελέγχου (checksum) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την κεφαλίδα TCP, τα δεδομένα TCP και μία ψευδο-κεφαλίδα. Η ψευδο-κεφαλίδα είναι μέρος της κεφαλίδας IP, έχει μέγεθος 12 bytes και περιλαμβάνει την IP προέλευσης, την IP προορισμού, το μήκος του τμήματος TCP, το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται και 8 bits κενά. Δημιουργείται στο επίπεδο μεταφοράς για τον υπολογισμό του Checksum και ακολούθως απορρίπτεται. Έτσι, ο παραλήπτης του πακέτου μόλις το λάβει, ξανά δημιουργεί μία ψευδο-κεφαλίδα για να υπολογίσει το Checksum και αν είναι ίδιο με αυτό που έλαβε δέχεται το πακέτο.
- **Urgent Pointer:** Αφορά τυχόν επιπλέον δεδομένα που πρέπει να αποσταλούν μαζί με το πακέτο. Είναι μεγέθους 16 bits και για να ενεργοποιηθεί πρέπει να υπάρχει Flag με το τρίγραμμα URG.
- **Options:** Σε αυτό το πεδίο τοποθετούνται ειδικές καθορισμένες επιλογές όπως τον μέγεθος του MSS (Maximum Segment Size) και δεν είναι υποχρεωτική η τοποθέτηση κάποια επιλογής. Το μέγεθος του είναι πολλαπλάσιο των 8 bits και μπαίνει πάντα στο τέλος της κεφαλίδας TCP.

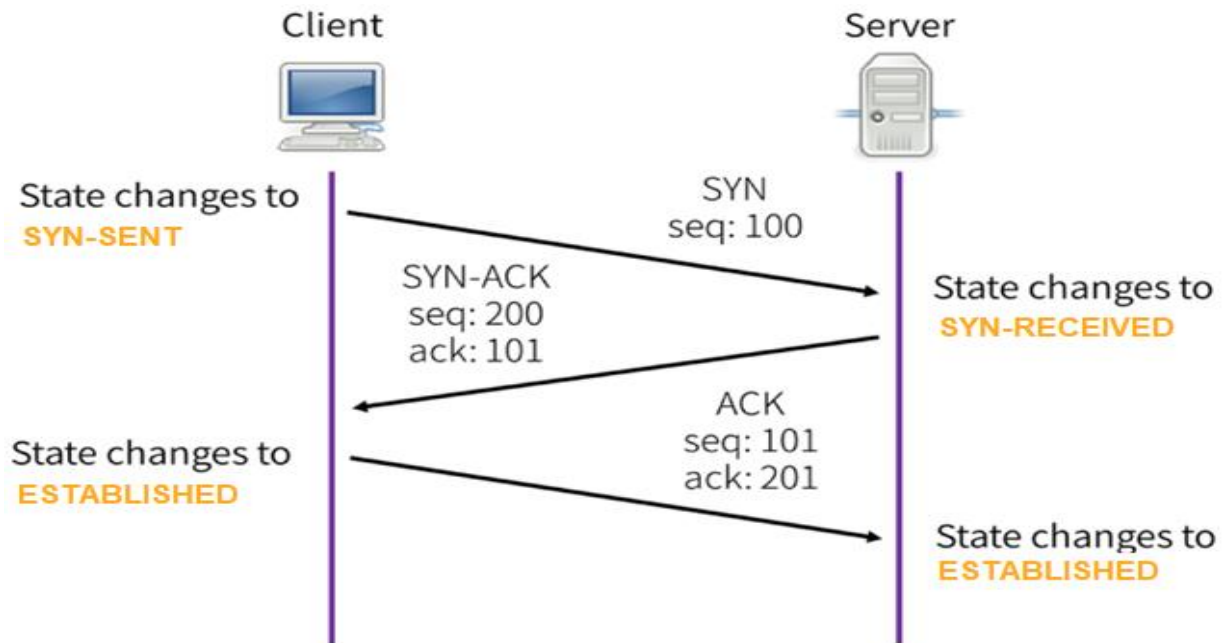
3.4.2 TCP Σύνδεση

Το πρωτόκολλο TCP δημιουργεί μία αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ δύο πληροφοριακών συστημάτων η όποια έχει αρχή και τέλος. Για να δημιουργηθεί μία σύνδεση πρέπει η μία συσκευή να αρχικοποιήσει την επικοινωνία με κάποιο τρόπο και ακολούθως η έτερη να δώσει την έγκριση για να ξεκινήσουν να μεταδίδονται δεδομένα. Έτσι, για παράδειγμα όταν εμείς προσπαθούμε να αποκτήσουμε επικοινωνία ως πελάτες (clients) με μία ιστοσελίδα, αποστέλλουμε αρχικά ένα μήνυμα αρχικοποίησης και ακολούθως ο διακομιστής (server) που φιλοξενεί την ιστοσελίδα δίνει την έγκριση και ξεκινάει μία αμφίδρομη επικοινωνίας μεταξύ μας. Η εν λόγω διαδικασία έναρξης μίας TCP σύνδεσης ονομάζεται Χαιρετισμός τριών τρόπων ή Τριμερής χειραψία (3-way handshake).

Χαιρετισμός τριών τρόπων

Η διαδικασία αυτή δημιουργεί μία αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ δύο συσκευών και συγκεκριμένα μεταξύ δύο εφαρμογών των συσκευών. Στο παράδειγμα που αναφέρθηκε για την εγκαθίδρυση σύνδεσης ενός πελάτη με μία ιστοσελίδα η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής (εικόνα 13): [29], [31]

1. Αρχικά, ο πελάτης (client) αποστέλλει ένα πακέτο το οποίο περιλαμβάνει μόνο τη σημαία SYN χωρίς άλλα δεδομένα. Έτσι με αυτό το μήνυμα ο πελάτης αιτεί την έναρξη μίας αμφίδρομης σύνδεσης με το διακομιστή (server). Ο αριθμός ακολουθίας (seq) επιλέγεται τυχαία όπως αναφέραμε και δεν ξεκινάει από το 0. Επίσης σε αυτό το πακέτο δεν υπάρχει αριθμός επιβεβαίωσης καθόσον δεν έχει εδραιωθεί ακόμα η σύνδεση.
2. Ακολούθως, ο διακομιστής απαντάει αποστέλλοντας ένα πακέτο με δύο σημαίες, την SYN και την ACK. Η σημαία SYN χρησιμοποιείται για να εκτελεστεί η επικοινωνία με τον πελάτη. Η σημαία ACK δίνει μία επιβεβαίωση στον πελάτη ότι έλαβε το μήνυμα του. Στο πακέτο που αποστέλλει πρέπει να συμπληρώσει αριθμό ακολουθίας (τυχαίος και αυτός), αριθμό επιβεβαίωσης με σκοπό να προβάλλει στον πελάτη τον επόμενο αριθμό που περιμένει να λάβει, και τέλος ορίζει το μέγεθος του παραθύρου (window) του παραλήπτη. Σε περίπτωση όπου ο διακομιστής για κάποιο λόγο δεν επιθυμεί τη σύνδεση με τον πελάτη αποστέλλει ένα πακέτο με τις σημαίες SYN, RST όπου με αυτό τον τρόπο τον ενημερώνει ότι αρνείται τη σύνδεση και έτσι η διαδικασία διακόπτεται.
3. Τέλος, μόλις ο πελάτης λάβει το πακέτο του διακομιστή απαντάει αποστέλλοντας ένα πακέτο με τη σημαία ACK, επιβεβαιώνοντας την επιθυμία ή μη έναρξης της σύνδεσης. Το πακέτο αυτό αποστέλλεται με τον ίδιο αριθμό ακολουθίας, καθόσον η σημαία ACK δεν διαθέτει επιπλέον δεδομένα. Ακόμα το πακέτο αυτό πρέπει να περιλαμβάνει αριθμό επιβεβαίωσης καθώς και το μέγεθος του παραθύρου του παραλήπτη. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο πελάτης σε αυτό το μήνυμα μπορεί να αποστείλει και δεδομένα. Εάν συμβεί αυτό πρέπει να αλλάξει ο αριθμός ακολουθίας του πακέτου.

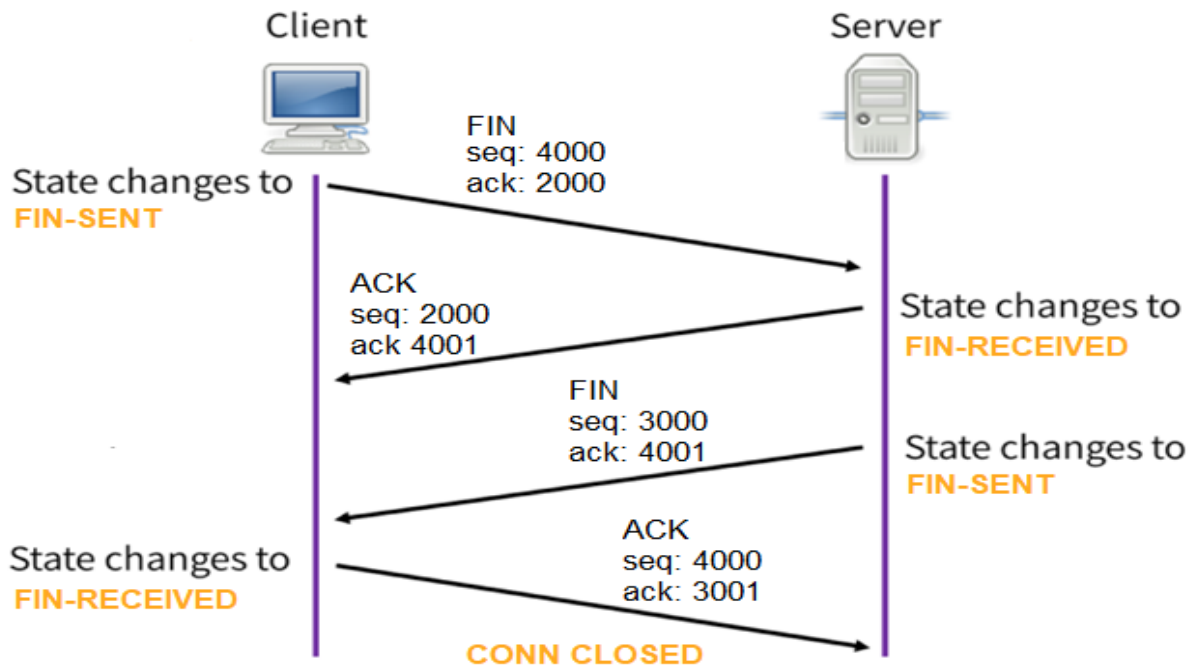


Εικόνα 14: Χαιρετισμός τριών τρόπων – Έναρξη σύνδεσης TCP [31]

Με την εδραίωση της σύνδεσης, τα δύο μέρη μπορούν να αποστέλλουν δεδομένα αξιόπιστα και με ασφάλεια. Σε περίπτωση που ένα από τα δύο μέρη (συνήθως ο πελάτης) επιθυμεί τον τερματισμό της σύνδεσης, θα πρέπει να εκτελεστεί πάλι μία αντίστοιχη διαδικασία με αυτή της έναρξης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται χαιρετισμός τεσσάρων τρόπων (4-way handshake) και θεωρείται ως μία τροποποιημένη μορφή της τριμερούς χειραψίας. Για τον τερματισμό της σύνδεσης η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής (εικόνα 14):

1. Αρχικά, αν επιθυμεί ο πελάτης (client) να τερματίσει τη σύνδεση αποστέλλει ένα πακέτο το οποίο περιλαμβάνει τη σημαία FIN. Το πακέτο αυτό μπορεί να αποσταλεί ως μήνυμα ελέγχου αλλά μπορεί να περιλαμβάνει και δεδομένα.
2. Ακολούθως, ο διακομιστής απαντάει αποστέλλοντας ένα πακέτο με τη σημαία ACK. Έτσι επιβεβαιώνει την επιθυμία τερματισμού της σύνδεσης. Σε αυτό το πακέτο ο διακομιστής μπορεί να αποστείλει δεδομένα εκτός από τη σημαία.
3. Στη συνέχεια μόλις ο διακομιστής είναι έτοιμος για τερματισμό, αποστέλλει το τελευταίο πακέτο το οποίο περιλαμβάνει τη σημαία FIN.
4. Τέλος, μόλις ο πελάτης λάβει το πακέτο του διακομιστή με τη σημαία FIN απαντάει αποστέλλοντας ένα πακέτο μόνο με τη σημαία ACK όπου απλά επιβεβαιώνει τον τερματισμό της σύνδεσης. Αυτό το πακέτο δεν περιέχει δεδομένα παρά μόνο τη σημαία ACK.

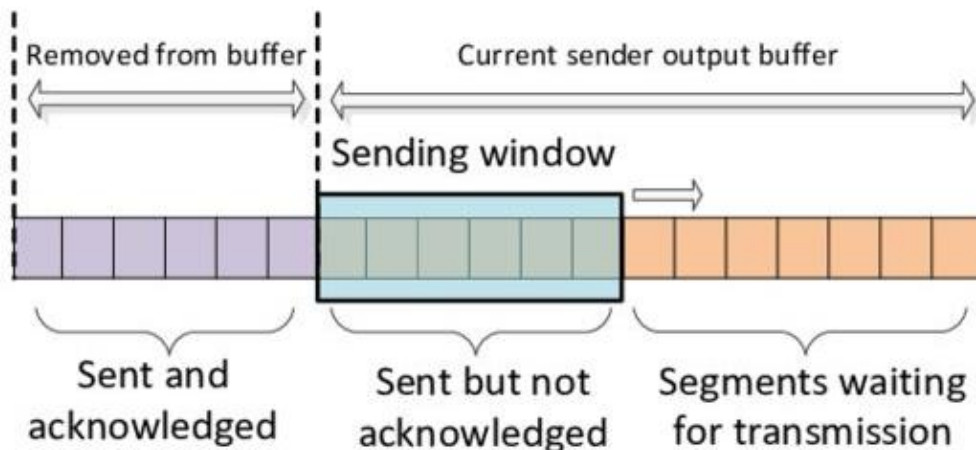
Σε κάποιες περιπτώσεις η σύνδεση μπορεί να μείνει σε ημίκλειστη κατάσταση (half-open) όπου η μία πλευρά έχει τερματίσει και δεν μπορεί να στείλει άλλα δεδομένα ενώ η άλλη πλευρά αποστέλλει κανονικά δεδομένα.



Εικόνα 15: Χαιρετισμός τεσσάρων τρόπων – Τερματισμός σύνδεσης TCP [31]

3.4.3 TCP και Έλεγχος Ροής

Ο έλεγχος ροής σε μία TCP σύνδεση αποτελεί μία πολύ σημαντική διαδικασία αφού μέσω αυτού ρυθμίζεται τελικά η ποσότητα των δεδομένων που μπορεί να στείλει το ένα μέρος στο άλλο και αντίστροφα. Για να επιτευχθεί ο έλεγχος ροής το πρωτόκολλο TCP ορίζει ένα παράθυρο το οποίο ελέγχει ποια δεδομένα έχουν αποσταλεί και επιβεβαιωθεί από τον παραλήπτη, ποια δεδομένα έχουν αποσταλεί και αναμένεται η επιβεβαίωση τους από τον παραλήπτη και ποια δεδομένα είναι έτοιμα προς αποστολή. Το παράθυρο αυτό ονομάζεται κυλιόμενο παράθυρο και τελεί υπό τον έλεγχο του παραλήπτη. [32], [33]



Εικόνα 16: Κυλιόμενο παράθυρο TCP [33]

Το κυλιόμενο παράθυρο (εικόνα 16) έχει λάβει την ονομασία αυτή καθώς μπορεί να «κυλάει» (sliding) αναλόγως της κατάστασης. Το μέγεθος του κυλιόμενου παραθύρου είναι το τμήμα όπου τα δεδομένα έχουν αποσταλεί και αναμένεται η επιβεβαίωση τους, ενώ η τιμή του υπολογίζεται σε bytes. Ακόμα, το μέγεθος του μπορεί να αλλάζει και ορίζεται ως η μικρότερη τιμή είτε του παραθύρου παραλήπτη (rwnd) είτε του παραθύρου συμφόρησης (cwnd). Όσον αφορά το παράθυρο παραλήπτη ή rwnd (receiver window) αποστέλλεται από τον παραλήπτη μέσω της επικεφαλίδας TCP (πεδίο window) και η τιμή του αλλάζει αναλόγως της διαθεσιμότητας μνήμης (receive buffer) στο δίκτυο. Το παράθυρο συμφόρησης ή cwnd (Congestion Window) θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Ακόμα, το κυλιόμενο παράθυρο έχει τρεις (3) βασικές λειτουργίες οι οποίες είναι το άνοιγμα, το κλείσιμο και η συρρίκνωση. Με το άνοιγμα η δεξιά πλευρά του παραθύρου επεκτείνεται με αποτέλεσμα να τοποθετούνται περισσότερα πακέτα σε αυτό για να αποσταλούν στον παραλήπτη. Με το κλείσιμο η αριστερή πλευρά του παραθύρου μεταφέρεται προς τα δεξιά και έτσι περισσότερα πακέτα έχουν επιβεβαιωθεί με αποτέλεσμα ο αποστολέας να μην ανησυχεί πλέον για αυτά. Τέλος, με τη συρρίκνωση η δεξιά πλευρά του παραθύρου μετακινείται προς τα αριστερά, όπου με αυτό τον τρόπο ο παραλήπτης δείχνει ότι λόγω συμφόρησης στο δίκτυο κάποια πακέτα που έχουν αποσταλεί και δεν έχουν επιβεβαιωθεί, πρέπει να ξανά αποσταλούν.

Σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητη η αναμετάδοση των πακέτων είτε επειδή χάθηκαν είτε επειδή έφτασαν αλλοιωμένα στον προορισμό τους, χρησιμοποιούνται δύο χρονόμετρα που είναι υπεύθυνα και συμβάλλουν στην αναμετάδοση. Αρχικά, ο RTT (Round Trip Time) είναι το άθροισμα της χρονικής διάρκειας που απαιτείται για να αποσταλεί ένα πακέτο από τον αποστολέα στον παραλήπτη και της χρονικής διάρκειας που απαιτείται για να σταλεί πίσω στον αποστολέα η επιβεβαίωση της λήψης του. Ο χρόνος RTT διαδραματίζει τεράστιο ρόλο στον τομέα των δικτύων καθώς μέσω αυτού υπολογίζεται η καθυστέρηση (latency) που υπάρχει σε ένα δίκτυο. Ακολούθως, ο RTO (Retransmission Timeout) είναι ο χρόνος που αναμεταδίδεται το πακέτο και υπολογίζεται από το Smoothed RTT, το οποίο εξαρτάται από το RTT και υπολογίζεται μέσω εξίσωσης. Συνεπώς, αν μεσολαβήσει χρόνος RTO και δεν έχει ληφθεί επιβεβαίωση (ACK), το πακέτο επανα-αποστέλλεται. Εάν δεν ληφθεί πάλι επιβεβαίωση το πακέτο αποστέλλεται εκ νέου σε χρόνο διπλάσιο του RTO (2xRTO).

3.4.4 TCP και Έλεγχος Συμφόρησης

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υπό κεφάλαιο, υφίσταται έλεγχος ροής των δεδομένων που μεταφέρονται σε μία TCP σύνδεση μέσω του κυλιόμενου παραθύρου. Το κυλιόμενο παράθυρο του αποστολέα δηλαδή το μέγεθος του παραθύρου δεδομένων που επιθυμεί να στείλει ο αποστολέας, εξαρτάται από τον παραλήπτη και ουσιαστικά αυτός δίνει τον ρυθμό για το μέγεθος. Ωστόσο, υφίσταται ακόμα μία οντότητα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν όσον αφορά το μέγεθος του παραθύρου του αποστολέα και αυτή είναι το δίκτυο. Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις

όπου το δίκτυο δεν μπορεί να υποστηρίξει την ταχύτητα με την οποία εκπέμπονται τα δεδομένα από τον αποστολέα, και για αυτό το λόγο πρέπει να τον ενημερώσει να επιβραδύνει. Συνεπώς, σε μία TCP σύνδεση το μέγεθος του παραθύρου του αποστολέα λαμβάνει την μικρότερη τιμή ενός εκ των δύο τιμών: το μέγεθος παραθύρου του παραλήπτη ($rwnd$) και το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης ($cwnd$). [33]

Ένα δίκτυο αποτελείται από πολλούς δρομολογητές και διακλαδώσεις οι οποίοι είναι πολύ πιθανό είτε να παρουσιάσουν μία ανωμαλία είτε να δημιουργηθεί μεγάλη ουρά σε κάποιον, με αποτέλεσμα τα πακέτα TCP να μην μπορούν να φτάσουν γρήγορα στον προορισμό τους. Για αυτές τις περιπτώσεις έχει δημιουργηθεί η εκτέλεση ελέγχου συμφόρησης, η οποία πραγματοποιείται μέσω του παραθύρου συμφόρησης γνωστού και ως $cwnd$ (Congestion Window). Το παράθυρο συμφόρησης υλοποιείται μέσω κάποιων αλγορίθμων οι οποίοι σκοπό έχουν να αποτρέψουν μία συμφόρηση όταν εμφανίζεται ή και ακόμα να λειτουργούν προληπτικά για να μην συμβεί.

Στο πρωτόκολλο TCP ένας από τους πιο διαδεδομένους μηχανισμούς που χρησιμοποιείται για την αποφυγή συμφόρησης είναι ο AIMD (Additive Increase / Multiplicative Decrease). Ο μηχανισμός AIMD χρησιμοποιείται από αρκετούς αλγορίθμους ελέγχου συμφόρησης οι οποίοι θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο και περιλαμβάνει τέσσερις (4) βασικές φάσεις οι οποίες είναι: Αργή εκκίνηση (Slow start), αποφυγής συμφόρησης (Congestion avoidance), γρήγορη επαναμετάδοση (Fast retransmit) και γρήγορη ανάκαμψη (fast recovery). [34], [35]

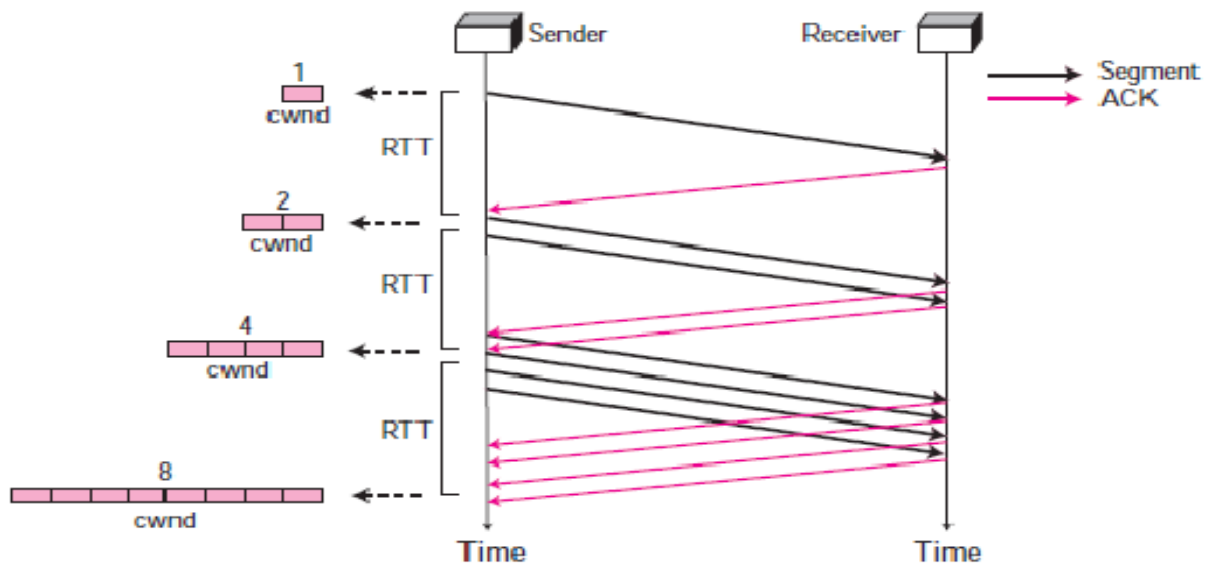
Αργή Εκκίνηση (Slow Start)

Παλαιότερα σε μία σύνδεση TCP ο αποστολέας θα έστελνε πακέτα ίσου μεγέθους με το παράθυρο του παραλήπτη ($rwnd$). Ωστόσο, με αυτή την μέθοδο δεν λαμβανόταν υπόψιν οι δυνατότητες του δικτύου και έτσι αρκετές φορές το δίκτυο δεν μπορούσε να υποστηρίξει το ρυθμό με τον οποίο στέλνει δεδομένα ο παραλήπτης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα στη σύνδεση.

Η φάση αργής εκκίνησης προσπαθεί να αποφύγει τέτοια προβλήματα, αφού ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδει τα δεδομένα ο αποστολέας είναι ίσος με τον ρυθμό που λαμβάνει τις επιβεβαιώσεις από τον παραλήπτη. Η εν λόγω φάση ξεκινάει με πολύ αργό ρυθμό μετάδοσης αλλά στη συνέχεια αυξάνεται εκθετικά. Η διαδικασία που ακολουθεί είναι η εξής (εικόνα 16): [34]

- Αρχικά, σε μία νέα σύνδεση TCP το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης ($cwnd$) ορίζεται σε ένα πακέτο SMSS (Sender Maximum Segment Size). Έτσι, ο αποστολέας στην αρχή μεταδίδει ένα (1) πακέτο δεδομένων.
- Ακολούθως, αφού ο αποστολέας λάβει επιβεβαίωση για το πακέτο που μετέδωσε, αποστέλλει εκ νέου το διπλάσιο του μεγέθους που είχε στείλει δηλαδή δύο (2) SMSS. Έτσι, το $cwnd$ διπλασιάζει το μέγεθος του.
- Αφού ο αποστολέας λάβει επιβεβαίωση για τα πακέτα που μετέδωσε, αποστέλλει πάλι το διπλάσιο μέγεθος των πακέτων που είχε στείλει, δηλαδή τέσσερα (4) SMSS. Έτσι το $cwnd$ διπλασιάζει εκ νέου το μέγεθος του.
- Η διαδικασία αυτή συνεχίζει με τον ίδιο ρυθμό μέχρι όπου το $cwnd$ φτάσει σε μία προκαθορισμένη τιμή η οποία ονομάζεται κατώφλι αργής εκκίνησης

ή ssthresh (slow start threshold). Η τιμή αυτή είναι τις περισσότερες φορές 65.535 bytes.



Εικόνα 17: Αλγόριθμος Αργής Εκκίνησης (Slow Start) [36]

Αποφυγή Συμφόρησης (Congestion Avoidance)

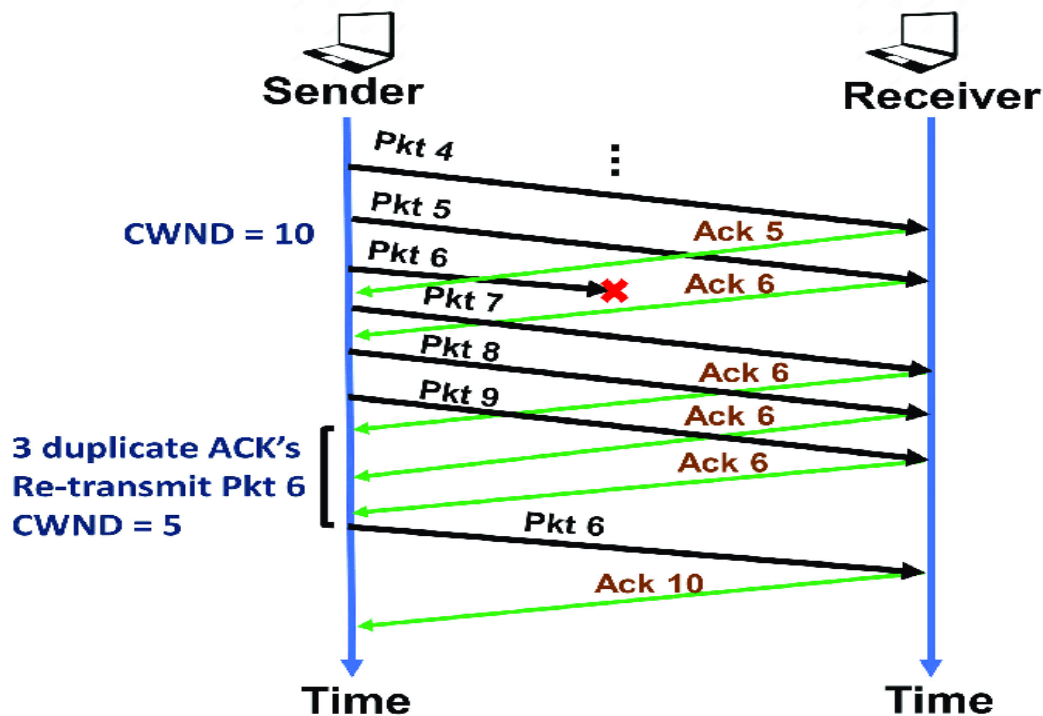
Όπως αναφέραμε, με την αργή εκκίνηση το μέγεθος του cwnd ξεκινάει με αργούς ρυθμούς αλλά στη συνέχεια έχει εκθετική αύξηση. Συνεπώς, για να αποφευχθούν περιπτώσεις συμφόρησης έχει δημιουργηθεί η φάση Congestion Avoidance ή Αποφυγή Συμφόρησης. Όταν το μέγεθος του cwnd φτάσει το όριο ssthresh σταματάει η φάση της αργής εκκίνησης και ξεκινάει η φάση της αποφυγής συμφόρησης. Αυτή η φάση αυξάνει γραμμικά και όχι εκθετικά το cwnd. Έτσι, κάθε φορά που ο αποστολέας λαμβάνει επιβεβαίωση για τα πακέτα δεδομένων που απέστειλε, αυξάνει το μέγεθος του cwnd κατά ένα (1) πακέτο SMSS (δεν το διπλασιάζει).

Ακόμα σε περίπτωση όπου δημιουργηθεί συμφόρηση στο δίκτυο, η λειτουργία αποφυγής συμφόρησης ορίζει το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης σε ένα πακέτο, με αποτέλεσμα να επαναλειτουργήσει η φάση αργής εκκίνησης. Η ανίχνευση της συμφόρησης προκαλείται λόγω της απαίτησης για αναμετάδοση ενός τμήματος δεδομένων, η οποία δημιουργείται είτε λόγω ενός timeout (RTO) είτε λόγω τριών (3) συνεχόμενων επιβεβαιώσεων (ACK). Ειδικότερα, ο αλγόριθμος συμφόρησης επενεργεί και ορίζει αυτός το μέγεθος του cwnd μόνο εάν εκδηλωθεί timeout. Ο αλγόριθμος αποφυγής συμφόρησης λειτουργεί ανεξάρτητα από τον αργής εκκίνησης, ωστόσο πρακτικά η υλοποίησή τους είναι πλήρως αλληλεξαρτώμενη. [34]

Γρήγορη Επαναμετάδοση (Fast Retransmit)

Η φάση γρήγορης επαναμετάδοσης χρησιμοποιείται με σκοπό το χαμένο πακέτο να μεταδοθεί προτού εκδηλωθεί το timeout (RTO). Με αυτό τον τρόπο προλαμβάνεται η δημιουργία συμφόρησης στο δίκτυο. Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί με επιβεβαιώσεις, όπου εάν ο αποστολέας λάβει ACK με τον ίδιο αριθμό επιβεβαίωσης

τουλάχιστον τρεις (3) φορές, καταλαβαίνει ότι το επόμενο πακέτο του αριθμού αυτού δεν έχει μεταδοθεί και έτσι το επανά-μεταδίδει. Οι τρεις επιβεβαιώσεις πρέπει να ληφθούν προτού εκδηλωθεί timeout.



Εικόνα 18: Γρήγορη επαναμετάδοση (Fast Retransmit) [37]

Γρήγορη Ανάκαμψη (Fast Recovery)

Σε περίπτωση που η φάση γρήγορης επαναμετάδοσης λειτουργήσει και επαναμεταδώσει το χαμένο πακέτο προτού εκδηλωθεί ένα timeout, τότε δεν εφαρμόζεται η αργή εκκίνηση αλλά ο Fast Retransmit ή Γρήγορη Ανάκαμψη. Σε αυτή τη φάση το ssthresh τίθεται στο μισό του παραθύρου συμφόρησης, ενώ το cwnd παίρνει την τιμή του ssthresh συν 3 πακέτα SMSS. Μετά τη λήψη αυτών των τιμών, το cwnd με κάθε λήψη επιβεβαίωσης απλά αυξάνεται κατά ένα SMSS. Οι φάσεις γρήγορης επαναμετάδοσης και γρήγορης ανάκαμψης υλοποιούνται μαζί.

3.5 Αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης (CC) TCP

Ο μηχανισμός AIMD που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και ειδικότερα οι φάσεις αργής εκκίνησης (slow-start) και αποφυγής συμφόρησης (congestion avoidance) χρησιμοποιούνται ευρέως και σχεδόν καθολικά στα περισσότερα δίκτυα είτε ασύρματα είτε ενσύρματα. Ωστόσο για την αποδοτικότερη και αποτελεσματικότερη χρήση του πρωτοκόλλου TCP, έχουν δημιουργηθεί αρκετές παραλλαγές αυτών. Οι πιο βασικές παραλλαγές εξ αυτών είναι: TCP Tahoe, TCP Reno, TCP New Reno, TCP BIC, TCP CUBIC, TCP HighSpeed και TCP BBR.

3.5.1 TCP Tahoe

Ο αλγόριθμος TCP Tahoe ήταν η πρώτη παραλλαγή αλγορίθμων συμφόρησης (Congestion Control) που χρησιμοποιήθηκε για συνδέσεις TCP και κυκλοφόρησε επισήμως το 1988. Για την αποφυγή συμφόρησης ο TCP Tahoe χρησιμοποιεί τους αλγορίθμους Slow Start και Congestion Avoidance. Έτσι, μέχρι το παράθυρο συμφόρησης (cwnd) φτάσει το ssthresh αυξάνεται εκθετικά (slow start), ενώ όταν το ξεπεράσει αυξάνεται γραμμικά (congestion avoidance). Ακόμα, εάν παρουσιαστεί συμφόρηση στο δίκτυο το ssthresh τίθεται στο μισό του cwnd ενώ το cwnd τίθεται σε 1. [38]

3.5.2 TCP Reno & New Reno

Ο αλγόριθμος TCP Reno ήταν μία επέκταση του Tahoe, όπου επιπλέον χρησιμοποιούσε τον αλγόριθμο γρήγορης επαναμετάδοσης. Έτσι ο TCP Reno, επαναφέρει το cwnd σε 1 μόνο όταν έχει timeout (RTO). Εάν λάβει επιβεβαιώσεις με τις οποίες καταλάβει ότι υπάρχει χαμένο πακέτο, χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο γρήγορης επαναμετάδοσης και έτσι αποφεύγει την μείωση του cwnd. [38], [39]

Ο αλγόριθμος TCP new Reno είναι μία ακόμα εξέλιξη του TCP Reno αφού εισάγει τον αλγόριθμο γρήγορης ανάκαμψης. Έτσι, σε περίπτωση που χαθεί ένα πακέτο χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος γρήγορης επαναμετάδοσης και ακολούθως χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος γρήγορης ανάκαμψης με σκοπό το cwnd να λάβει την τιμή του ssthresh συν 3 πακέτα MSS και έτσι να μην μειωθεί αισθητά η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων στη TCP σύνδεση. [39]

3.5.3 TCP BIC

Ο αλγόριθμος BIC είναι (Binary Increase Congestion Control) χρησιμοποιείται ευρέως για χρήση σε δίκτυα υψηλής ταχύτητας με μεγάλη καθυστέρηση (latency), και για αυτό θεωρείται πολύ χρήσιμος σε LFN (Long Fat Networks). Ο αλγόριθμος BIC χρησιμοποιεί τρεις τρόπους αύξησης του cwnd οι οποίοι είναι: αύξηση δυαδικής αναζήτησης (binary search increase), προσθετική αύξηση (additive increase) και αργή εκκίνηση (slow start). Ο αλγόριθμος binary search χρησιμοποιείται όταν το cwnd είναι μικρότερο από το μέγιστο μέγεθος που μπορεί να λάβει το παράθυρο (wmax), όπου ο ρυθμός αύξησης (bic_inc) ισούται με $(wmax - cwnd) / 2$. Έτσι όσο αυξάνεται το cwnd μειώνεται ο ρυθμός αύξησης του και όταν φτάσει το μέγιστο μέγεθος παραθύρου ο ρυθμός αύξησης χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο αργής εκκίνησης. Ακολούθως, εάν ο ρυθμός αύξησης του cwnd είναι μεγαλύτερος από τον μέγιστο ρυθμό αύξησης (s_{max}), τότε αυξάνεται προσθετικά (additive increase), ενώ αν ο ρυθμός αύξησης είναι μικρότερος από την ελάχιστη τιμή (s_{min}) λαμβάνει την ελάχιστη τιμή. [40]

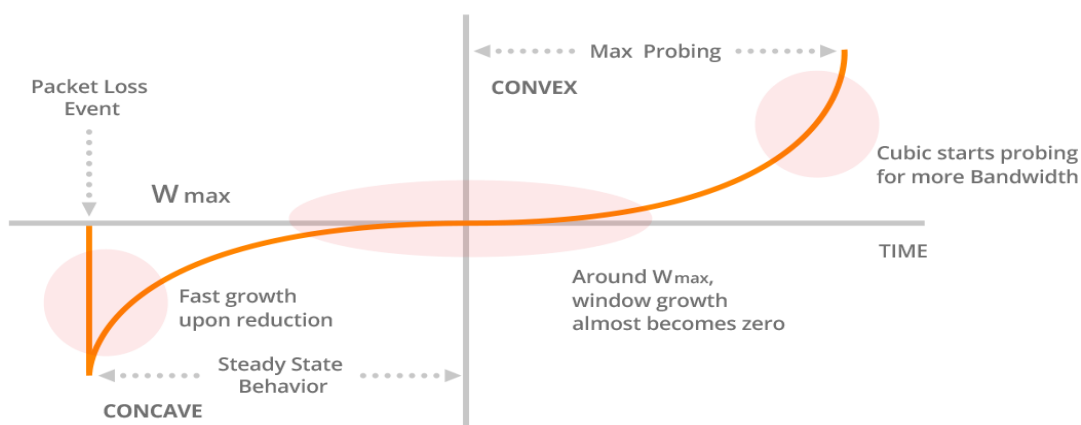
```
if (cwnd < wmax)           // binary search OR additive
    bic_inc = (wmax - cwnd) / 2;
else                          // slow start OR additive
    bic_inc = cwnd - wmax;
if (bic_inc > Smax)         // additive
    bic_inc = Smax;
else if (bic_inc < Smin) // binary search OR slow start
    bic_inc = Smin;
cwnd = cwnd + (bic_inc / cwnd);
```

Εικόνα 19: Λειτουργία αλγορίθμου BIC TCP [41]

Σε περίπτωση που χαθεί κάποιο πακέτο των δεδομένων ο αλγόριθμος BIC χρησιμοποιεί πολλαπλασιαστική μείωση (multiplicative decrease) μία μέθοδος που χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο AIMD (additive-increase/multiplicative-decrease). Σε αυτή την περίπτωση μειώνει το cwnd στο μισό του μεγέθους του.

3.5.4 TCP CUBIC

Ο αλγόριθμος CUBIC είναι μία μετεξέλιξη του BIC καθώς είναι λιγότερο επιθετικός αλλά πιο συστηματικός. Η βασική διαφορά του CUBIC από τον BIC και τους παλαιότερους είναι ότι δεν βασίζεται στο ρυθμό του RTT για την αύξηση του cwnd αλλά στον πραγματικό χρόνο. Έτσι, είναι ανεξάρτητος από το RTT και αυξάνεται σε συνάρτηση με το χρόνο. Η αύξηση του cwnd με τη χρήση του CUBIC πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο η αύξηση του cwnd αναπαρίσταται ως ένα κοίλο τμήμα (εικόνα 19), όπου ο ρυθμός είναι πολύ μεγάλος και το cwnd φτάνει μέχρι την τιμή που ήταν πριν το τελευταίο συμβάν συμφόρησης. Ακολούθως, στο δεύτερο στάδιο η αύξηση του αναπαρίσταται ως ένα κυρτό τμήμα (εικόνα 19), όπου ο ρυθμός είναι αργός. Πριν την έναρξη του κυρτού τμήματος ο CUBIC ξοδεύει αρκετό χρόνο χωρίς να αυξάνει το cwnd με αποτέλεσμα να δίνει χρόνο στο δίκτυο να σταθεροποιηθεί. Ακόμα, κατά το κυρτό μέρος ο CUBIC εκτελεί ανίχνευση μεγαλύτερου εύρους ζώνης (bandwidth) αυξάνοντας αργά το cwnd και με την ανίχνευση ο ρυθμός αυξάνεται ραγδαία.[42]



Εικόνα 20: Λειτουργία TCP CUBIC [43]

Ο TCP CUBIC είναι ο αλγόριθμος ελέγχου συμφόρησης TCP συνδέσεων που χρησιμοποιείται στα περισσότερα λειτουργικά συστήματα. Το 2006 πραγματοποιήθηκε η πρώτη υλοποίηση του σε λειτουργικό σύστημα LINUX στον πυρήνα “2.6.13”. Ακολούθως, το 2014 υλοποιήθηκε στο λειτουργικό σύστημα macOS στην έκδοση “OS X Yosemite”. Τέλος, το 2016 υλοποιήθηκε στο λειτουργικό σύστημα Windows και συγκεκριμένα στα “Windows 10.1709”.

3.5.5 TCP HighSpeed

Ο TCP HighSpeed είναι μία παραλλαγή αλγορίθμου ελέγχου συμφόρησης όπου χρησιμοποιείται αρκετά σε δίκτυα με μεγάλο Bandwidth-delay product (BDP), όπου η ταχεία ανάπτυξη του cwnd είναι αναγκαία. Το BDP είναι το γινόμενο του bandwidth (εύρος ζώνης) με το RTT (latency). Έτσι, δίκτυα με μεγάλο BDP έχουν μεγάλο Bandwidth αλλά και υψηλό latency, και για αυτό λαμβάνουν και αυτά την ονομασία LFN.

Ο HighSpeed για τη μεταβολή του cwnd χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους: τον $a(w)$ και $b(w)$ (όπου $w = cwnd$). Για να αυξήσει το μέγεθος του cwnd ο HighSpeed χρησιμοποιεί την εξίσωση $w = w + a(w)/w$. Ακολούθως, σε περίπτωση συμφόρησης μειώνει το cwnd χρησιμοποιώντας την εξίσωση $w = (1-b(w))w$. Για τον υπολογισμό του $a(w)$ και $b(w)$ η παραλλαγή TCP HighSpeed χωρίζεται σε τρεις (3) βασικές κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος του cwnd. Η πρώτη κατηγορία αφορά για $cwnd < Low_Window$ όπου τα $a(w)$ και $b(w)$ λαμβάνουν τις ίδιες τιμές που έχει ο τυπικός TCP αλγόριθμος, η δεύτερη κατηγορία αφορά για $cwnd > High_Window$, ενώ η τρίτη κατηγορία αφορά για $Low_Window < cwnd < High_Window$. Στην τρίτη κατηγορία ο αλγόριθμος συμβάλει στην απότομη αύξηση του cwnd και συνεπώς μπορεί να υποστηρίξει δίκτυα με μεγάλο Bandwidth. [44]

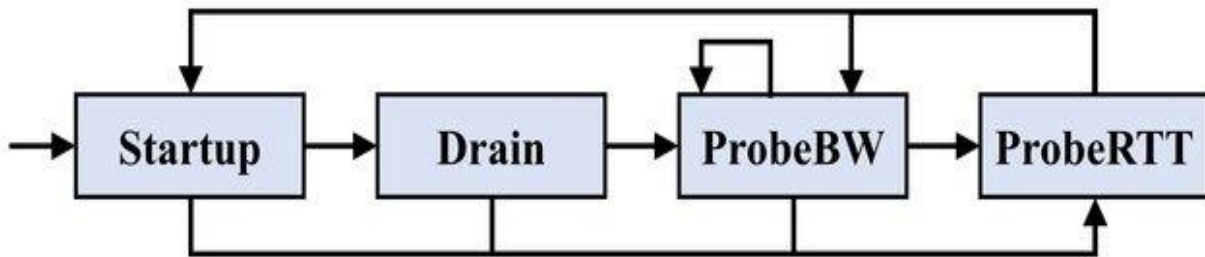
3.5.6 TCP BBR

Η παραλλαγή TCP BBR (Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time) αναπτύχθηκε από την εταιρία Google τον Ιούλιο του 2017, και χρησιμοποιείται για έλεγχο συμφόρησης TCP συνδέσεων με στόχο την επίτευξη μεγάλου Bandwidth και ταυτόχρονα μικρού Latency. Χρησιμοποιείται στις πιο διαδεδομένες πλατφόρμες όπως το Google, το YouTube και το GCP (Google Cloud Platform).

Ο BBR στην αρχική φάση η οποία ονομάζεται “STARTUP PHASE” προσπαθεί να προσεγγίσει το εκτιμώμενο μέγιστο εύρος ζώνης του δικτύου αυξάνοντας με πολύ γρήγορο ρυθμό το cwnd. Υπολογίζει το εκτιμώμενο εύρος ζώνης του δικτύου μέσω του όγκου των ACK που ελήφθησαν σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ακολούθως, στη φάση αποστράγγισης η οποία ονομάζεται “DRAIN PHASE”, ο BBR μειώνει το ρυθμό αποστολής των πακέτων με σκοπό να απαλλαγεί από την ουρά (queue) που εκτιμά ότι δημιούργησε κατά την γρήγορη προσέγγιση του εύρους ζώνης του δικτύου. Τέλος, στη φάση σταθεροποίησης η οποία ονομάζεται “STEADY STATE” ο BBR θα αυξήσει το

cwnd με σκοπό να συμβαδίσει με το εύρος ζώνης του δικτύου. Στη φάση σταθεροποίησης ο BBR περιοδικά προσπαθεί να βελτιώσει τον αλγόριθμο, ανιχνεύοντας είτε για μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης στο δίκτυο (λειτουργία PROBE BW) είτε για μείωση και βελτιστοποίηση του RTT (λειτουργία PROBE RTT). [45], [46]

Η παραλλαγή TCP BBR εισήχθη για πρώτη φορά σε λειτουργικό σύστημα LINUX στην έκδοση 4.9, και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε μεταγενέστερη έκδοση. Θεωρείται η πιο αποδοτική παραλλαγή αλγορίθμων ελέγχου συμφόρησης σήμερα για TCP συνδέσεις που αποσκοπούν σε μεγάλες ταχύτητες με ταυτόχρονα μικρό latency.



Εικόνα 21: Λειτουργία TCP BBR [46]

4. Μηχανική Μάθηση (ML)

4.1 Εισαγωγή στη Μηχανική Μάθηση (ML)

Στον κόσμο των υπολογιστών υπάρχει πληθώρα προβλημάτων τα οποία επιλύονται με επακριβή τρόπο, αφού μέσω κατάλληλου αλγορίθμου ο υπολογιστής εκτελεί συγκεκριμένα βήματα με συγκεκριμένη σειρά και τελικά φτάνει στη λύση. Ωστόσο, στη σημερινή εποχή έχουν δημιουργηθεί αρκετά προβλήματα τα οποία είναι πολύ απαιτητικά και για να επιλυθούν πρέπει να κατασκευάζεται εκ νέου κάποιος αλγόριθμος που να προσαρμόζεται κατάλληλα. Γίνεται κατανοητό ότι για δύσκολα και απαιτητικά προβλήματα η κατασκευή προσαρμοσμένων αλγορίθμων γίνεται αρκετά δύσκολη και δαπανηρή καθώς πρέπει να ξοδευτούν αρκετές ώρες για την εκ νέου κατασκευή. Στη σημερινή εποχή τα προβλήματα αυτά πλέον μπορούν να επιλυθούν πιο αποδοτικά μέσω νέων και σύγχρονων μεθόδων, βασικότερη εκ των οποίων αποτελεί η μηχανική μάθηση.

Η μηχανική μάθηση είναι ένας τομέας της επιστήμης των υπολογιστών που επικεντρώνεται στην ανάπτυξη αλγορίθμων και στατιστικών μοντέλων που επιτρέπουν στα υπολογιστικά συστήματα να μαθαίνουν και να κάνουν προβλέψεις ή να λαμβάνουν αποφάσεις με βάση κάποια δεδομένα. Η μηχανική μάθηση περιλαμβάνει τη δημιουργία προγραμμάτων υπολογιστών που μπορούν να βελτιώνουν αυτόματα την απόδοσή τους με την πάροδο του χρόνου καθώς τροφοδοτούνται με περισσότερα δεδομένα. Έτσι, μέσω της μηχανικής μάθησης και των κατάλληλων δεδομένων δύναται να επιλύονται όλα τα πολύπλοκα και απαιτητικά προβλήματα αποτελεσματικά και γρήγορα.

Η δημιουργία της έννοιας “Μηχανική Μάθηση” πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1990 όταν η επιστημονική κοινότητα ερευνούσε μέσα από τον τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) τρόπους για την “εξόρυξη δεδομένων” με αποδοτικούς αλγορίθμους και μηχανές. Έτσι, εμφανίστηκε η έννοια της μηχανικής μάθησης ως ένα υποπεδίο της Τεχνητής Νοημοσύνης, όπου δημιουργεί μηχανές και αλγορίθμους ικανούς να μαθαίνουν από τα δεδομένα που έχουν λάβει και εν συνεχεία να λαμβάνουν τις βέλτιστες αποφάσεις και να επιλύουν τα πλέον απαιτητικά προβλήματα. Με την πάροδο του χρόνου η εξόρυξη δεδομένων (data mining) έχει πλέον διαχωριστεί από τον τομέα της μηχανικής μάθησης καθώς ασχολείται κυρίως με την εξερευνητική ανάλυση των δεδομένων.

Ακόμα, το 1997 ο γνωστός επιστήμονας Tom M. Mitchell εξέδωσε τον βασικό ορισμό της μηχανικής μάθησης ο οποίος είναι:

«Ένα πρόγραμμα υπολογιστή λέμε ότι μαθαίνει από την εμπειρία E ως προς κάποια κλάση εργασιών T και μέτρο απόδοσης P , αν η απόδοσή του σε εργασίες από το T , όπως μετρείται από το P , βελτιώνεται μέσω της εμπειρίας E .»

Τέλος, η μηχανική μάθηση ασχολείται με πληθώρα εφαρμογών οι οποίες βασίζονται πλέον σε αυτή και χρησιμοποιούνται ευρέως από την κοινωνία καθημερινά. Μερικές εξ αυτών είναι:

- Αυτοματοποιημένη εξυπηρέτηση πελάτη.
- Εξελιγμένες Μεταφράσεις και διορθώσεις κειμένων.
- Αυτόνομη οδήγηση.
- Προβλέψεις.
- Ταξινόμηση Προϊόντων.
- Αναγνώριση φωνής.
- Ρομποτική.

4.2 Είδη Μηχανικής Μάθησης

Η μηχανική μάθηση αναπτύσσει τρεις (3) βασικούς τρόπους μάθησης για την επίλυση των προβλημάτων και τη λήψη αποφάσεων, οι οποίοι θα αναλυθούν περαιτέρω στις επόμενες υποενότητες και είναι η Επιβλεπόμενη Μάθηση (Supervised Learning), η Μη Επιβλεπόμενη Μάθηση (Unsupervised Learning) και η Ενισχυτική Μάθηση (Reinforcement Learning).

4.2.1 Επιβλεπόμενη Μάθηση (Supervised Learning)

Η επιβλεπόμενη μάθηση αποτελεί ένα τύπο της μηχανικής μάθησης που περιλαμβάνει την εκπαίδευση ενός μοντέλου σε ένα σύνολο δεδομένων με γνωστές εισόδους και εξόδους με στόχο τη γενίκευση των αποτελεσμάτων και τελικά να μπορεί να κάνει προβλέψεις σε νέα, άγνωστα δεδομένα. Στην επιβλεπόμενη μάθηση, το σύνολο δεδομένων χωρίζεται σε δύο μέρη: το σύνολο εκπαίδευσης (training set) και το σύνολο δοκιμής (test set). Το σύνολο εκπαίδευσης χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του μοντέλου, ενώ το σύνολο δοκιμής χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσής του. [53]

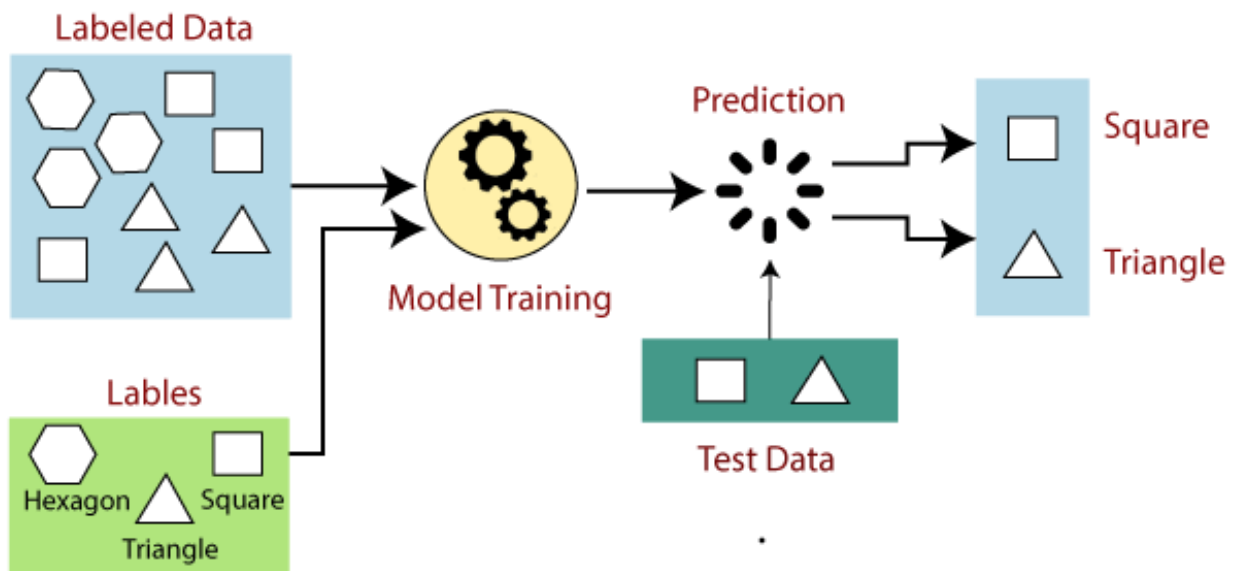
Ο βασικός στόχος της επιβλεπόμενης μάθησης είναι η εκπαίδευση ενός αλγορίθμου με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια τη μεταβλητή εξόδου έχοντας ως είσοδο γνωστές μεταβλητές. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης το οποίο περιλαμβάνει εισόδους και σωστές εξόδους, και αυτές επιτρέπουν στον αλγόριθμο να εκπαιδεύεται με την πάροδο του χρόνου και αναλόγως με την ποσότητα των δεδομένων που διαθέτει. Επίσης, ο αλγόριθμος μετράει την απόδοση του μέσω μίας συνάρτησης απωλειών, και με αυτό τον τρόπο προσαρμόζει τις εξόδους με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί επαρκώς το σφάλμα. [53]

Η επιβλεπόμενη μάθηση χρησιμοποιείται σε ποικίλα προβλήματα και διαθέτει δύο βασικές κατηγορίες για την επίλυση αυτών: Την ταξινόμηση (Classification) και την παλινδρόμηση (Regression). Η ταξινόμηση αφορά την αντιστοίχιση των νέων μεταβλητών εισόδου σε κατηγορίες, βάσει των δεδομένων που ήδη διαθέτει και (δεδομένα εκπαίδευσης). Χρησιμοποιείται σε πολλά καθημερινά προβλήματα όπως ταξινόμηση αλληλογραφίας, αναγνώριση εικόνων, κατηγοριοποίηση προϊόντων, πελατών κ.α. Η διαδικασία της παλινδρόμησης αφορά στην κατανόηση της σχέσης

μεταξύ των ανεξάρτητων και των εξαρτημένων μεταβλητών. Χρησιμοποιείται κυρίως σε θέματα πρόβλεψης όπως η πρόβλεψη του καιρού ή η τιμή μία ιδιοκτησίας βάσει κάποιων παραμέτρων, ακόμα και τα έσοδα μίας επιχείρησης βάσει των επερχόμενων πωλήσεων της.

Οι βασικότεροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις διαδικασίες είναι οι ακόλουθοι: [53]

- **Κ-κοντινότεροι γείτονες(K-ηη):** Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί ένα διάγραμμα (x,y) και για κάθε νέο δεδομένο (x_1,y_1) μετράει τις αποστάσεις από τα δείγματα και αναλόγως το τοποθετεί στην κατάλληλη κατηγορία. Η παράμετρος k αφορά τον αριθμό των δειγμάτων που θα λάβουμε υπόψιν τελικά για την ταξινόμηση του νέου δεδομένου.
- **Naive Bayes:** Αλγόριθμος που χρησιμοποιείται συνήθως όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός εισόδου μεταβλητών. Χρησιμοποιεί το θεώρημα Bayes το οποίο βασίζεται στην ανεξαρτησία μεταξύ των χαρακτηριστικών.
- **Δέντρα Απόφασης:** Αποτελεί μία κατηγορία αλγορίθμων με σκοπό την εκμάθηση ενός συνόλου για την ταξινόμηση των νέων άγνωστων δεδομένων. Θα αναλυθεί παρακάτω.
- **Αλγόριθμοι Νευρωνικών Δικτύων (Neural Networks):** Αποτελούνται από κόμβους (νευρώνες) οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με σκοπό να υπολογίσουν την μεταβλητή εξόδου. Θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.
- **SVM (Support Vector Machine):** Χρησιμοποιείται κυρίως σε διαδικασίες ταξινόμησης και η ταξινόμηση των δεδομένων στηρίζεται στην εύρεση ενός βέλτιστου υπερεπιπέδου (γραμμικό και μη) που διαχωρίζει κατάλληλα τα δεδομένα.

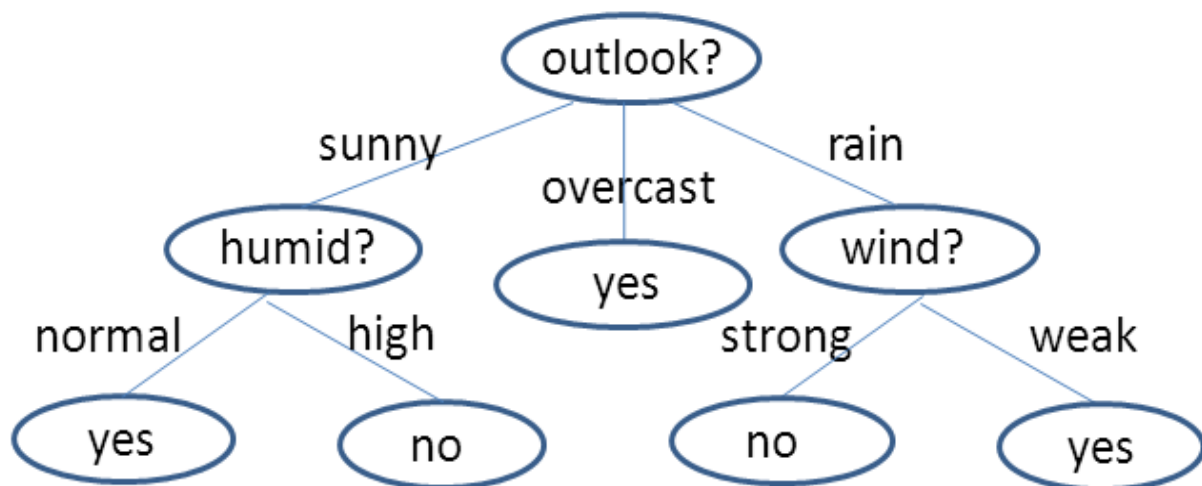


Εικόνα 22: Επιβλεπόμενη Μάθηση (Supervised Learning) [54]

Δέντρα Απόφασης

Τα δέντρα απόφασης (Decision Trees) αποτελούν μία από αποδοτικότερες κατηγορίες αλγορίθμων στον τομέα της Μηχανικής μάθησης και συγκεκριμένα στον κλάδο της Επιβλεπόμενης μάθησης. Τα δέντρα απόφασης αποτελούν μία πολύ αποδοτική και αποτελεσματική κατηγορία αλγορίθμων για προβλήματα ταξινόμησης (κατηγοριοποίηση), όπως η αναγνώριση εικόνων ή προσώπων, οι προβλέψεις για διάφορες υπηρεσίες, η διάγνωση ιατρικών περιστατικών και γενικότερα θέματα που αφορούν εξόρυξη δεδομένων (Data Mining). Η εν λόγω κατηγορία κατασκευάζεται ως μία δενδροειδή μορφή η οποία διαθέτει κόμβους¹ οι οποίοι περιλαμβάνουν μία ομάδα δεδομένων από το σύνολο των δεδομένων βάσει της ταξινόμησης που έχει εκτελεστεί από τον αλγόριθμο. [57]

Σε ένα πρόβλημα ταξινόμησης όταν γίνεται χρήση της μεθόδου των δέντρων αποφάσεων, το πρόβλημα χωρίζεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση πραγματοποιείται η κατασκευή του δέντρου όπου περιλαμβάνει αναλυτικά όλες τις πληροφορίες από το σύνολο των δεδομένων. Κάθε κόμβος του δέντρου έχει χαρακτηριστεί με μία ερώτηση. Ο κάθε κόμβος περιλαμβάνει την ομάδα δεδομένων, η οποία πληροί τα κριτήρια της ερώτησης. Ακόμα, τα κλαδιά που δημιουργούνται σε κάθε κόμβο περιλαμβάνουν κάθε πιθανή απάντηση στην ερώτηση από την οποία χαρακτηρίζεται ο κόμβος. Η κατασκευή του δέντρου εκτελείται πάντα από πάνω προς τα κάτω. Ακολούθως, στη δεύτερη φάση παράγονται οι κανόνες από το δέντρο απόφασης και πραγματοποιείται το κλάδεμα (prune), όπου καθορίζεται τελικά το μέγεθος του δέντρου. [57]



Εικόνα 23: Δέντρα Απόφασης με χρήση αλγορίθμου ID3 [58]

Ως μέθοδος κατηγοριοποίησης τα δέντρα απόφασης έχουν αρκετά πλεονεκτήματα. Αρχικά, η κατασκευή τους είναι απλή και μπορούν να χρησιμοποιήσουν κανόνες κατανοητούς και εύκολα ερμηνεύσιμους. Ακόμα, ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα που διαθέτουν είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολύ μεγάλες βάσεις δεδομένων, αφού το μέγεθος των δεδομένων δεν επηρεάζει το τελικό μέγεθος

¹ Στην εικόνα 24 ως κόμβους θεωρούμε τους ελλειψοειδείς κύκλους, ενώ τα κλαδιά είναι τα αποτελέσματα που παράγει κάθε κόμβος, γνωστά και ως τόξα.

του δέντρου. Οι βασικότεροι αλγόριθμοι που δημιουργούν δέντρα αποφάσεων είναι ο ID3 (Iterative Dichotomizer 3), ο C4.5 καθώς και ο CART (Classification and Regression Trees). [57]

4.2.2 Μη Επιβλεπόμενη Μάθηση (Unsupervised Learning)

Η μη επιβλεπόμενη μάθηση (Unsupervised Learning) αποτελεί ένα τύπο της μηχανικής μάθησης κατά τον οποίο ο αλγόριθμος δημιουργεί μοτίβα στα δεδομένα χωρίς καμία προηγούμενη γνώση της δομής των δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα δεν έχουν επισημανθεί ή κατηγοριοποιηθεί με οποιονδήποτε τρόπο και ο αλγόριθμος πρέπει να εντοπίσει μοτίβα και σχέσεις από μόνος του.

Οι κύριες εφαρμογές που ασχολείται η μη επιβλεπόμενη μάθηση είναι η ομαδοποίηση (Clustering), η οποία περιλαμβάνει την ομαδοποίηση παρόμοιων δεδομένων σε ομάδες και η ανάλυση συσχετισμών (Association Analysis). Η ομαδοποίηση είναι χρήσιμη σε προβλήματα όπως η ομαδοποίηση πελατών, η ομαδοποίηση προϊόντων ή υπηρεσιών ακόμα και η αναγνώριση εικόνων, ενώ η ανάλυση συσχετίσεων βρίσκει εφαρμογή σε προβλήματα όπως η συσχέτιση προϊόντων πελατών ή συσχέτιση μουσικών κομματιών με σκοπό την προβολή ίδιων ή παρόμοιων. [52]

Η ομαδοποίηση (clustering) αποτελεί μία μέθοδο εξόρυξης δεδομένων όπου ομαδοποιεί επισημειωμένα (μη επεξεργασμένα) δεδομένα σύμφωνα με τις ομοιότητες και διαφορές τους. Η ομαδοποίηση διαθέτει αρκετούς αλγόριθμους όπου ο καθένας διαθέτει διαφορετικές ιδιότητες και εκτελεί διαφορετικά την ομαδοποίηση των δεδομένων. Οι βασικότεροι είναι ο k-means, η ιεραρχική ομαδοποίηση (Hierarchical clustering) και η πιθανολογική ομαδοποίηση (probabilistic clustering). Η ομαδοποίηση k-means είναι ένας δημοφιλής αλγόριθμος που χωρίζει τα δεδομένα σε έναν καθορισμένο αριθμό συστάδων, ενώ η ιεραρχική ομαδοποίηση δημιουργεί μια δενδροειδή δομή που αναπαριστά τις σχέσεις μεταξύ των δεδομένων. Η πιθανολογική ομαδοποίηση ομαδοποιεί τα δεδομένα με βάση την πιθανότητα να ανήκουν σε μια συγκεκριμένη κατανομή. [52]

Η ανάλυση συσχετίσεων (association analysis) έχει σκοπό την εύρεση σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών σε ένα σύνολο δεδομένων. Χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση διάφορων συσχετίσεων στην αγορά όπως η εύρεση των επιθυμιών ενός πελάτη συσχετίζοντας πρόσφατες αγορές αυτού. Ένας από τους βασικότερους αλγόριθμους που χρησιμοποιεί είναι ο PCA (Principal Component Analysis) γνωστός και ως “ανάλυση κύριων συστατικών”, ο οποίος μετατρέπει τις μεταβλητές σε γραμμικές και σκοπό έχει τη μείωση των διαστάσεων (dimensionality reduction) στα δεδομένα και τη συμπίεση αυτών ώστε να εξαχθούν κάποια χαρακτηριστικά.

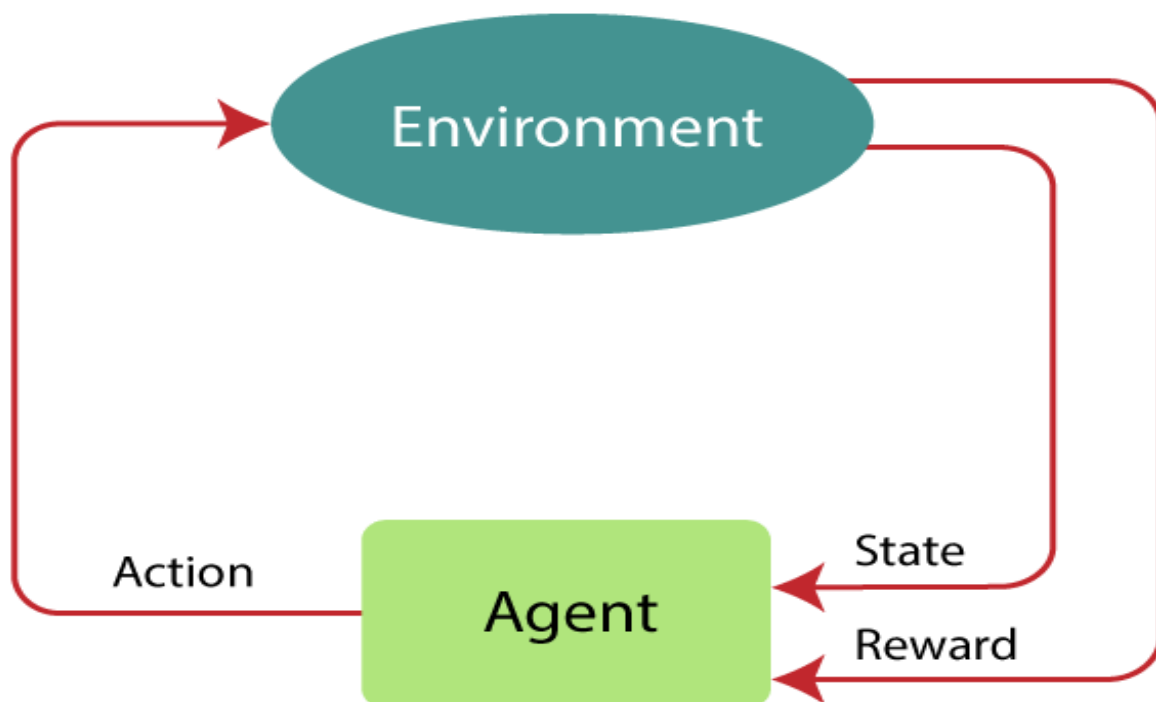
Συνοψίζοντας, η μη επιβλεπόμενη μάθηση είναι ένα ισχυρό εργαλείο στη μηχανική μάθηση που μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό μοτίβων και σχέσεων στα δεδομένα χωρίς προηγούμενη γνώση της δομής των δεδομένων. Οι εφαρμογές της είναι πολυάριθμες και ποικίλες ενώ αποτελεί σημαντικό μέρος των σύγχρονων τεχνικών μηχανικής μάθησης.

4.2.3 Ενισχυτική Μάθηση (Reinforcement Learning)

Η ενισχυτική μάθηση αποτελεί τον τελευταίο τύπο της μηχανικής μάθησης και βασίζεται στην ιδέα ότι ένας πράκτορας (μοντέλο) μαθαίνει να λαμβάνει αποφάσεις αλληλοεπιδρώντας με το περιβάλλον του, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του. Στην ενισχυτική μάθηση ο πράκτορας αλληλοεπιδρά με το δικό του περιβάλλον με στόχο κάθε κίνηση του να μεγιστοποιεί την κατάσταση στην οποία βρίσκεται, χωρίς όμως να λαμβάνει πληροφορίες από εξωτερικούς παράγοντες. Συνεπώς, για αυτό τον τύπο της μηχανικής μάθησης χρειάζεται μία είσοδος, η οποία είναι και η αρχική κατάσταση όπου ο πράκτορας θα ξεκινήσει καθώς και μία έξοδος που θα περιλαμβάνει αρκετές λύσεις στις οποίες θα πρέπει να φτάσει ο πράκτορας με τον λιγότερο δυνατό κόπο – ενέργειες. [55]

Η ενισχυτική μάθηση ασχολείται κυρίως με εφαρμογές σχεδιασμού όπως η ρομποτική, όπου πρέπει να σχεδιασθούν οι κινήσεις ενός ρομπότ για τη μεγιστοποίηση απόδοσης του σε κάποια εργασία. Επίσης, μπορεί να υποστηρίξει πιο σύγχρονες και καινοτόμες εφαρμογές όπως η αυτόνομη οδήγηση ή το αυτόνομο παρκάρισμα αυτοκινήτου.

Ο βασικότερος αλγόριθμος που χρησιμοποιεί η ενισχυτική μάθηση είναι ο Q-Learning ο οποίος θα προσπαθήσει να βρει την καλύτερη επόμενη κίνηση, με βάση την τρέχουσα κατάσταση που βρίσκεται ο πράκτορας στο περιβάλλον. Ο αλγόριθμος Q-learning είναι ένας ισχυρός αλγόριθμος που έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων, όπως η ρομποτική και η αυτόνομη οδήγηση. Η απλότητα και η αποτελεσματικότητά του τον καθιστούν δημοφιλή επιλογή για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων λήψης αποφάσεων στον πραγματικό κόσμο.



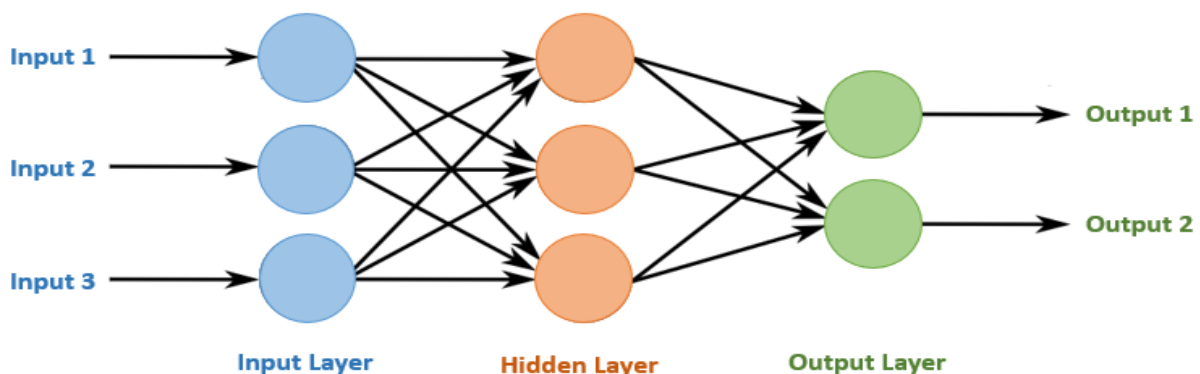
Εικόνα 24: Αλγόριθμος Q-Learning Ενισχυτικής Μάθησης [56]

4.3 Νευρωνικά Δίκτυα

Τα τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) ή Artificial Neural Networks (ANN) αποτελούν ένα μεγάλο πεδίο της Μηχανικής Μάθησης, το οποίο περιγράφει ένα μεγάλο αριθμό μαθηματικών μοντέλων εμπνευσμένων από το κεντρικό νευρικό σύστημα του ανθρώπου. Έτσι, το όνομα και η δομή του βασίζονται κατά κύριο λόγο στους βιολογικούς νευρώνες και στο πως αυτοί συμπεριφέρονται. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη δομή και τη λειτουργία ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα περιγράψουμε συνοπτικά τη λειτουργία και τη δομή των βιολογικών νευρώνων.

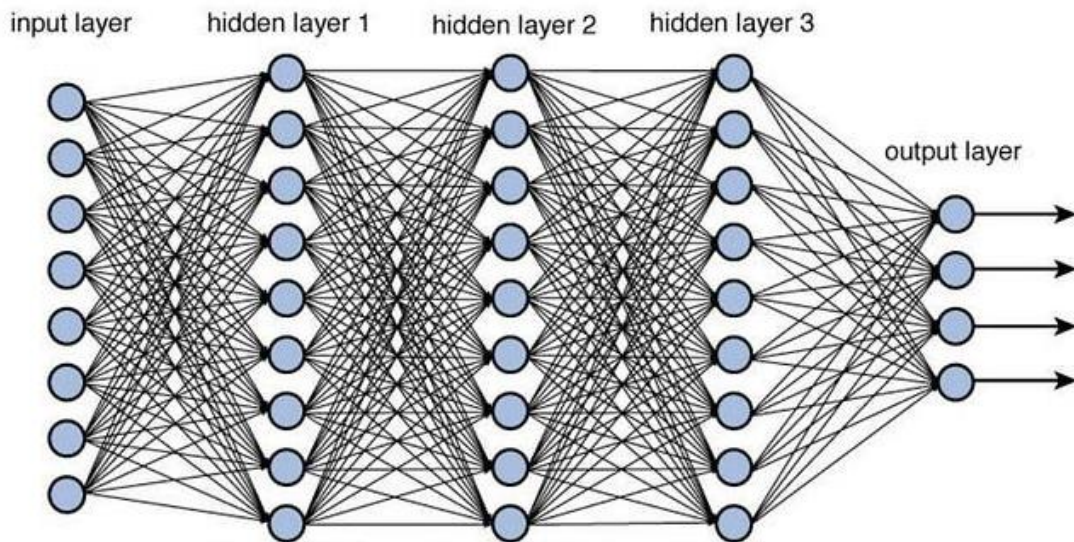
Αρχικά, οι βιολογικοί νευρώνες αποτελούνται από 3 βασικά μέρη: τον πυρήνα, το κυτταρικό σώμα και τους δενδρίτες. Ο πυρήνας είναι το κεντρικό τμήμα του νευρώνα όπου είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία και παραγωγή ενέργειας αυτού. Το κυτταρικό σώμα περιλαμβάνει τον πυρήνα όπου εκτελούνται οι απαραίτητες ενέργειες για τη διατήρηση και συντήρηση του νευρώνα. Τέλος, οι δενδρίτες εκτελούν τη σύνδεση με άλλους νευρώνες, όπου από αυτούς περνάνε τα σήματα πληροφορίας είτε για να μεταφερθούν σε άλλους νευρώνες είτε για να καταλήξουν στον πυρήνα. Όταν ο εγκέφαλος εξασκείται εκτεταμένα ζητάει περισσότερο οξυγόνο, με αποτέλεσμα οι νευρώνες να παράγουν περισσότερους δενδρίτες και να συνδέονται τελικά με περισσότερους νευρώνες. Έτσι με την διαρκή εξάσκηση δημιουργείται ένα τεράστιο νευρωνικό δίκτυο, το οποίο μπορεί να λειτουργεί δίνοντας μεγαλύτερη απόδοση και αποτελεσματικότητα στον εγκέφαλο.

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα προσπαθούν να προσεγγίσουν τον τρόπο λειτουργίας των βιολογικών νευρώνων και συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο. Αρχικά, αποτελούνται από τρία (3) βασικά επίπεδα (layers): το επίπεδο εισόδου (input), το επίπεδο εξόδου (output) και το κρυμμένο επίπεδο ή επίπεδο υπολογιστικών νευρώνων (hidden layer). Το επίπεδο εισόδου δεν επιτελεί κάποια λειτουργία απλά δέχεται τα δεδομένα από το περιβάλλον. Το επίπεδο εξόδου παράγει την τελική απάντηση, ενώ το κρυμμένο επίπεδο εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς για την εξαγωγή του σωστού αποτελέσματος, με βάση τα δεδομένα εισόδου και την εκπαίδευση που έχει λάβει. Κάθε επίπεδο αποτελείται από τεχνητούς νευρώνες όπου ο καθένας δέχεται πολλά σήματα ως είσοδο και διαθέτει μία έξοδο. Κάθε είσοδος διαθέτει μία τιμή βάρους η οποία υποδηλώνει πόσο στενή σχέση έχει με τον νευρώνα που συνδέεται. [59]



Εικόνα 25: Επίπεδα Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (ΤΝΔ) [60]

Συνεπώς, στο επίπεδο εισόδου κάθε τεχνητός νευρώνας συνδέεται με πολλούς νευρώνες από το κρυμμένο επίπεδο, όπου κάθε διασύνδεση έχει το δικό της βάρος με σκοπό να ενεργοποιήσει κατάλληλα τους υπολογιστικούς νευρώνες. Κάθε υπολογιστικός νευρώνας στο κρυμμένο επίπεδο λαμβάνει τις εισόδους, τις πολλαπλασιάζει με τα βάρη τους και υπολογίζει το άθροισμα του γινομένου αυτού μέσω μίας κατάλληλης συνάρτησης, γνωστή και ως συνάρτηση μετάβασης (transfer function). Με τον υπολογισμό αυτό εκτελεί σύγκριση με μία τιμή κατωφλιού, όπου είναι χαρακτηριστική για τον νευρώνα και εάν είναι μεγαλύτερη υπολογίζει και δίνει την τιμή της εξόδου, την οποία προωθεί είτε στην κατάλληλη έξοδο είτε στους νευρώνες του επόμενου κρυμμένου επιπέδου. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ένα ΤΝΔ μπορεί να αποτελείται από πολλά κρυμμένα επίπεδα, με σκοπό να εκτελούνται υπολογισμοί για την εύρεση πιο περίπλοκων προβλημάτων, που απαιτούν περισσότερους υπολογισμούς και δέχονται μεγαλύτερο όγκο δεδομένων. Αυτά τα δίκτυα ονομάζονται Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα (ΒΝΔ) ή Deep Neural Networks (DNN) και χρησιμοποιούνται επί το πλείστον σε έναν εξειδικευμένο τύπο μάθησης γνωστό και ως Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), ο οποίος θα αναλυθεί στην επόμενη υποενότητα.



Εικόνα 26: Επίπεδα σε Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα (ΒΝΔ) [61]

Τα ΤΝΔ έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι μπορούν να εκπαιδεύονται συνεχώς αλλάζοντας τις τιμές των βαρών κάθε νευρώνα με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος κατά την εξαγωγή του αποτελέσματος στο επίπεδο εξόδου. Δύναται να χρησιμοποιηθούν στην επιβλεπόμενη μάθηση, όπου ένα ΤΝΔ λαμβάνει κάποια δεδομένα εκπαίδευσης και σύμφωνα με αυτά υπολογίζει κατάλληλα τα βάρη σε κάθε νευρώνα ώστε να εξάγεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Επίσης, δύναται να χρησιμοποιείται στη μη επιβλεπόμενη μάθηση όπου δεν λαμβάνει δεδομένα εκπαίδευσης αλλά αυτό-εκπαιδεύεται. Έτσι, αναλόγως το αποτέλεσμα που εξάγει στο επίπεδο εξόδου διορθώνει τις τιμές βαρών του κάθε νευρώνα με σκοπό κάθε φορά να αυτό-βελτιώνεται μειώνοντας τα ποσοστά σφάλματος.

Τα ΤΝΔ αποτελούν μία σύγχρονη και πολύ αποδοτική μέθοδο για την εύρεση και εξαγωγή αποτελεσμάτων σε ποικίλες καθημερινές εφαρμογές όπως οι ιατρικές διαγνώσεις, οι προβλέψεις, ο αυτόνομος έλεγχος κυκλοφορίας και οχημάτων, η εποπτεία

μηχανημάτων και συσκευών καθώς και η βελτιστοποίηση απόδοσης των τηλεπικοινωνιών. Ειδικότερα, στον τομέα των τηλεπικοινωνιών ήδη χρησιμοποιούνται ΤΝΔ για την εξάλειψη εξωτερικών θορύβων και φαινομένων ηχώ, ενώ βρίσκονται σε εξέλιξη δοκιμές χρήσης ΒΝΔ μέσω της Βαθιάς Μάθησης, στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς (5G), με σκοπό τη μεγιστοποίηση απόδοσης τους στο μικροκυματικό φάσμα (mmWave).

4.3.1 Βαθιά Μάθηση (Deep Learning)

Η Βαθιά μάθηση αποτελεί μία εξειδικευμένη μορφή της Μηχανικής Μάθησης, η οποία χρησιμοποιεί κυρίως Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα – DNN για την επίλυση των προβλημάτων που της ανατίθεται. Αποτελεί έναν τύπο μάθησης που ασχολείται κυρίως με αναγνώριση προτύπων ή εικόνων, φωνητική αναγνώριση καθώς και με σύγχρονα πεδία της επιστήμης των υπολογιστών όπως η εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality).

Η βαθιά μάθηση χρησιμοποιεί ΒΝΔ που αποτελούνται από πολλά κρυμμένα επίπεδα με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων για δεδομένα που έχουν μεγάλο όγκο. Η βασική διαφορά της βαθιάς από τη μηχανική μάθηση είναι ότι δεν εκτελεί καμία προεπεξεργασία δεδομένων αλλά εισάγει μη δομημένα δεδομένα, τα οποία επεξεργάζεται και μέσα από την αυτό-βελτίωση μαθαίνει να εξάγει σωστά συμπεράσματα, αυτοματοποιημένα. Για την καλύτερη κατανόηση της διαφοράς που παρουσιάζει η βαθιά μάθηση από τη μηχανική, θα περιγραφεί ένα παράδειγμα στο οποίο θέλουμε να αναγνωρίσουμε εικόνες ζώων. Στη μηχανική μάθηση και συγκεκριμένα στην επιβλεπόμενη μάθηση, για τη σωστή αναγνώριση των ζώων θα πρέπει να ορίσουμε τα χαρακτηριστικά πάνω στα οποία θα εκτελείται η διάκριση των ζώων (επέμβαση ανθρώπινου παράγοντα). Ωστόσο, στη βαθιά μάθηση τα χαρακτηριστικά καθορίζονται από τον αλγόριθμο και αναλόγως τα σφάλματα που κάνει βελτιώνεται συνεχώς, καθορίζοντας καταλληλότερα ή περισσότερα χαρακτηριστικά (αυτοματοποιημένα). [62]

Όπως αναφέρθηκε, η βαθιά μάθηση λειτουργεί ακριβώς όπως ένα ΤΝΔ με τη μόνη διαφορά ότι αποτελείται από πολλαπλά κρυμμένα επίπεδα και έτσι η έξοδος εξάγεται μετά από πολλούς υπολογισμούς. Κατανοούμε ότι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων είναι πολύ πιο περίπλοκοι και απαιτούν τεράστιο όγκο δεδομένων. Με αυτό τον τρόπο, τα αποτελέσματα είναι πολύ πιο ακριβή αφού μπορούν να εισαχθούν περισσότερα δεδομένα εισόδου από το περιβάλλον και έτσι δίνεται η δυνατότητα για περισσότερες εισόδους στους νευρώνες και τελικά ακριβέστερους υπολογισμούς.

Σήμερα, μέθοδοι βαθιάς μάθησης χρησιμοποιούνται σε αρκετές καθημερινές εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν πολύπλοκους υπολογισμούς για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Μερικές εξ' αυτών είναι η καταπολέμηση της διαφθοράς μέσω αναγνώρισης πιθανών εγκληματικών δραστηριοτήτων, η υποστήριξη χρηματοοικονομικών υπηρεσιών όπως η αξιολόγηση επιχειρηματικών κινήσεων, η πρόβλεψη ιατρικών περιστατικών με την εύρεση ίδιων περιστατικών μέσα από εικόνες και τέλος η εξυπηρέτηση πελατών με την δημιουργία ειδικών ρομπότ (chatbots). [62]

5. Επίδραση του TCP στα δίκτυα 5G (mmWave)

5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του TCP

Η μικροκυματική ζώνη (mmWave) στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς μπορεί να προσφέρει ταχύτητες της τάξεως των Gbit/sec, με αποτέλεσμα να δίνεται η δυνατότητα για μεταφορά τεράστιου όγκου δεδομένων και πληροφοριών. Ωστόσο, η ζώνη αυτή παρουσιάζει κάποιες ευπάθειες, σημαντικότερες εκ των οποίων είναι η μεγάλη ευαισθησία της σε εμπόδια καθώς και οι μεγάλοι χρόνοι απόκρισης που προκαλούνται κατά την κατευθυντική αναζήτηση (beamforming). Η μικροκυματική ζώνη (mmWave) παρουσιάζει αρκετές διακοπές σε εμπόδια όπως τοίχοι, πόρτες ακόμα και σε μικρότερου τύπου εμπόδια όπως παράθυρα ή τζάμια. Έτσι, με τα ανωτέρω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δημιουργούνται μεγάλες προκλήσεις για τα πρωτόκολλα μεταφοράς όπως το TCP, αφού αυτά χρειάζονται μία συνεχή ροή των δεδομένων που αποστέλλονται.

Η συμπεριφορά και απόδοση του πρωτοκόλλου TCP επηρεάζεται και εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Ωστόσο, οι πιο βασικοί και σημαντικοί οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω είναι οι ακόλουθοι: [47], [48]

- Η τοποθεσία των διακομιστών (Servers).
- Παραλλαγές Αλγόριθμων ελέγχου συμφόρησης (CC).
- Το μέγεθος του πακέτου TCP (MSS).
- Το μέγεθος του RLC Buffer.

Οι ανωτέρω παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση του TCP είτε ατομικά, είτε συνδυαστικά, αφού μπορεί η επιλογή μίας παραμέτρου σε έναν παράγοντα να επιδρά αρνητικά ή θετικά σε παράμετρο ενός άλλου παράγοντα.

5.1.1 Τοποθεσία διακομιστών (Servers)

Η τοποθεσία των διακομιστών (servers) είναι μία αρκετά σημαντική παράμετρος η οποία επηρεάζει την απόδοση του TCP πάνω στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς, καθώς η απόσταση τους από τον τελικό χρήστη καθορίζει και το μέγεθος του χρόνου απόκρισης (latency). Οι Edge Servers οι οποίοι είναι και πιο κοντά στο κυψελωτό δίκτυο παρουσιάζουν γενικά καλύτερους χρόνους απόκρισης και μπορούν να αντιδράσουν πιο γρήγορα σε καταστάσεις όπου δημιουργούνται προβλήματα στο δίκτυο, είτε από δυσλειτουργίες είτε από θέματα συνωστισμού (π.χ. bufferfloat). Αντίθετα οι Remote Servers δεν παρέχουν τόσο καλή απόδοση στο δίκτυο αφού βρίσκονται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από το κυψελωτό δίκτυο και δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν άμεσα τυχόν δυσλειτουργίες ή προβλήματα.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο οργανισμός 3GPP έχει θέσει ως στόχο για τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, χρόνους απόκρισης (latency) της τάξεως του 1ms και ταχύτητες 20 φορές μεγαλύτερες από τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς (LTE). Συνεπώς, η ορθή τοποθέτηση των Servers είναι πολύ σημαντική, με σκοπό να επιτευχθούν οι ανωτέρω τιμές.

Η επιρροή που παρουσιάζουν οι Servers δύναται να παρουσιάζει μεγάλες αλλαγές καθώς εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως το μέγεθος του MSS ή το μέγεθος RLC Buffer. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου Server σε ένα κυψελωτό δίκτυο 5^{ης} γενιάς αποτελεί συνάρτηση πολλών παραγόντων και για αυτό πρέπει να εξετάζεται συνολικά και όχι ξεχωριστά.

5.1.2 Αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης (CC)

Οι αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης (CC) αποτελούν ίσως τον πιο καθοριστικό παράγοντα για την απόδοση του TCP πάνω σε δίκτυα 5G. Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο κάθε αλγόριθμος λειτουργεί διαφορετικά και αναλόγως του δικτύου στο οποίο επενεργεί μπορεί να αποδώσει καλύτερα. Οι αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης εξαρτώνται και αυτοί από αρκετές παραμέτρους, και για αυτό το λόγο δεν μπορεί να επιλεγεί καθολικά ένας. Αρκεί να αναφέρουμε για παράδειγμα ότι ο TCP HighSpeed μπορεί να είναι αποτελεσματικότερος για δίκτυα με μεγάλη χωρητικότητα (μεγάλο BDP), ενώ σε δίκτυα με σχετικά μικρή χωρητικότητα δεν προτιμώνται και επιλέγονται κατά βάση παραλλαγές όπως ο TCP New Reno.

Ακόμα, οι αλγόριθμοι συμφόρησης μπορεί να επηρεαστούν αισθητά και από τους υπόλοιπους παράγοντες όπως το μέγεθος του πακέτου TCP (MSS), η τοποθεσία του διακομιστή καθώς και το μέγεθος του Buffer. Έτσι, πρέπει να μελετηθεί όχι μόνο η απόδοση των αλγορίθμων πάνω στο πρωτόκολλο TCP, αλλά και η συμπεριφορά τους όταν επενεργούν οι υπόλοιπες παράμετροι.

Οι αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης που πρόκειται να μελετηθούν είναι ο TCP New Reno, ο TCP CUBIC, ο TCP HighSpeed καθώς και ο TCP BBR, οι οποίοι είναι και αυτοί που χρησιμοποιούνται σήμερα κατά βάση στο διαδίκτυο αλλά και γενικά στον κόσμο των δικτύων.

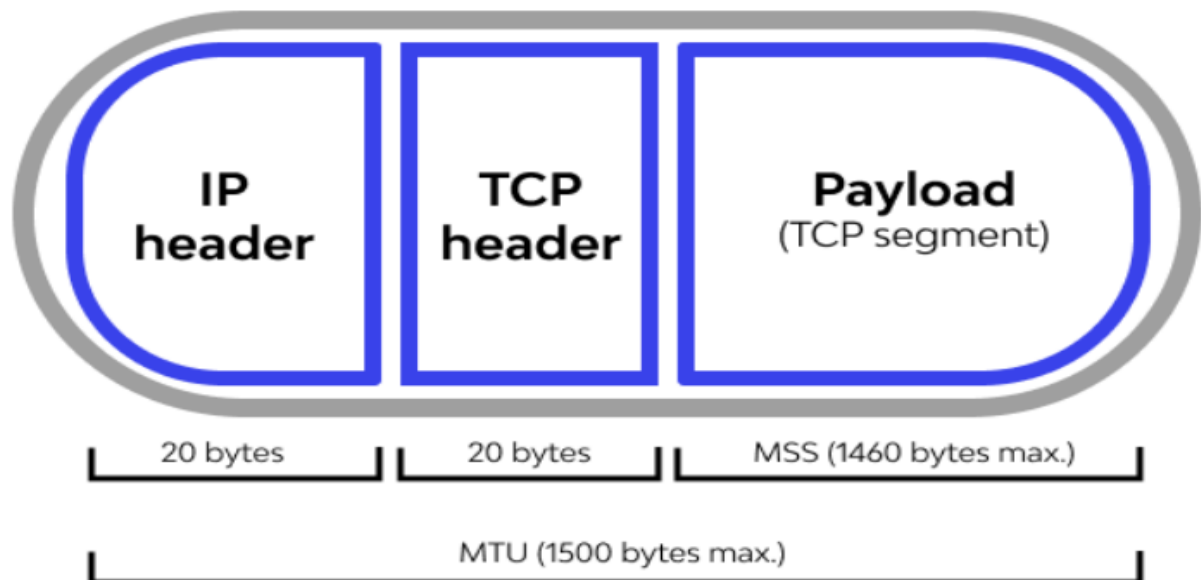
5.1.3 Μέγεθος πακέτου TCP (MSS)

Τα δεδομένα που αποστέλλονται από ένα χρήστη σε έναν άλλο χωρίζονται σε μικρότερα κομμάτια τα οποία ονομάζουμε πακέτα. Τα πακέτα αυτά έχουν προκαθορισμένο μέγεθος και δεν μπορούν να υπερβούν ένα όριο. Κάθε πακέτο αποτελείται από δύο κεφαλίδες, την επικεφαλίδα IP (IP Header), την επικεφαλίδα TCP (TCP Header) καθώς και ένα πακέτο δεδομένων που περιέχει την ωφέλιμη πληροφορία για το χρήστη. Το MSS (Maximum Segment Size) αφορά το μέγιστο μέγεθος του πακέτου που μεταφέρεται από ένα χρήστη σε έναν άλλο και αποτελείται μόνο από τα

ωφέλιμα δεδομένα. Το MSS μαζί με τις δύο κεφαλίδες λαμβάνουν την ονομασία MTU (Maximum Transmission Unit). (27)

Το προκαθορισμένο μέγεθος του MTU στο διαδίκτυο είναι 1,5KB. Επίσης, το μέγεθος της κάθε κεφαλίδας είναι 20 bytes. Συνεπώς, το μέγιστο μέγεθος που μπορεί να λάβει το MSS είναι 1460 bytes, δηλαδή σε κάθε πακέτο μπορούν να αποσταλούν έως 1460 bytes δεδομένων που περιέχουν την πληροφορία.

Ωστόσο, ενώ μέχρι σήμερα το μέγεθος MSS ήταν προκαθορισμένο, με τις νέες ταχύτητες και χρόνους απόκρισης που τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς έχουν στόχο να επιτύχουν, είναι πολύ πιθανό αυτό να αλλάξει και να δοκιμαστούν μεγαλύτερα μεγέθη. Γίνεται κατανοητό ότι μεγέθη MSS της τάξεως των 1,5KB, ίσως δεν μπορούν να υποστηρίξουν τις ταχύτητες των δικτύων 5^{ης} γενιάς που έχουν τεθεί ως στόχος.



Εικόνα 27: Μέγεθος πακέτου TCP [49]

5.1.4 Radio Link Control (RLC) Buffer size

Η προσωρινή μνήμη γνωστή και ως Buffer, χρησιμοποιείται για την προσωρινή αποθήκευση των δεδομένων – πακέτων στους διάφορους κόμβους και σημεία από τα οποία διέρχονται, με σκοπό να καταλήξουν στον τελικό χρήστη. Το μέγεθος του Buffer αποτελεί έναν αρκετά σημαντικό παράγοντα για την γρήγορη μεταφορά των δεδομένων, καθώς όσο πιο μεγάλο μέγεθος έχει τόσο περισσότερα πακέτα μπορεί να φιλοξενήσει, και συνεπώς αποφεύγονται καταστάσεις υπερχειλίσης (bufferfloat) όπου τα πακέτα απορρίπτονται και πρέπει να ξανά αποσταλούν μέσω του πρωτοκόλλου TCP. Ακόμα, το BDP (Bandwidth-Delay product) στον κόσμο των τηλεπικοινωνιών, αφορά τη μονάδα που υπολογίζει τη χωρητικότητα του δικτύου σε

σχέση με το χρόνο απόκρισης. Το BDP αποτελεί ουσιαστικά το γινόμενο του εύρους ζώνης (Bandwidth) με το χρόνο απόκρισης (Latency). [48]

Το μέγεθος RLC (Radio Link Control) Buffer αποτελεί την μονάδα που ελέγχει και μετράει το μέγεθος του Buffer σε σχέση με τον χρόνο απόκρισης. Μετράται ως ένα ποσοστό του BDP. Το RLC Buffer επηρεάζει την απόδοση του TCP όταν υφίσταται μικρό ή μεγάλο BDP. Σε περιπτώσεις όπου το BDP είναι μικρό δημιουργείται το πρόβλημα της υπερχειλίσης (bufferfloat ή buffer overflow) καθώς δεν υπάρχει αρκετός χώρος για να φιλοξενήσει τα πακέτα, ενώ σε περιπτώσεις όπου το BDP είναι μεγάλο υπάρχει ο κίνδυνος εμφάνισης υψηλών καθυστερήσεων (Bufferbloat). Δίκτυα με πολύ μεγάλα BDP είναι γνωστά και ως LFN (Long Fat Network), τα οποία όπως έχουν περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο παρέχουν υψηλές ταχύτητες αλλά ταυτόχρονα και μεγάλες καθυστερήσεις. [48]

Ακόμα, το AQM (Active Queue Management) αποτελεί μία τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί κατάλληλους αλγορίθμους για την διαχείριση και αποφυγή απόρριψης πακέτων σε περιπτώσεις υπερχειλίσης (overflow).

5.2 Σενάρια εφαρμογής TCP πάνω σε δίκτυα 5G

Στο παρών κεφάλαιο θα αναλυθούν δύο σενάρια εφαρμογής που πραγματεύονται τη συμπεριφορά και επίδραση του πρωτοκόλλου TCP στη μικροκυματική ζώνη (mmWave) των δικτύων 5G και τα οποία θεωρούνται από τον οργανισμό 3GPP ως τα πιο ενδιαφέροντα και σημαντικά για την εξαγωγή ασφαλών και αξιόπιστων συμπερασμάτων, σύμφωνα με το [47]. Το πρώτο σενάριο αφορά σε μεταφορά δεδομένων με χρήστη που βρίσκεται σε τρένο που μεταφέρεται με υψηλή ταχύτητα, ενώ το δεύτερο αφορά μεταφορά δεδομένων σε αστικό περιβάλλον όπου μπορεί να υπάρχουν εμπόδια αλλά και σημεία μη ορατά από τις κεραιές mmWave. Ακολούθως, θα παρουσιαστούν οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του TCP πάνω σε mmWave δίκτυα 5G. Στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου θα αναφερθούν τα αποτελέσματα των εν λόγω σεναρίων καθώς και κάποια συμπεράσματα / διαπιστώσεις.

5.2.1 Σενάριο εφαρμογής TCP σε τρένο υψηλής ταχύτητας

Το σενάριο με το τρένο υψηλής ταχύτητας, παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον αφού εξετάζεται η συμπεριφορά του πρωτοκόλλου TCP πάνω σε mmWave δίκτυα 5G, σε περιβάλλον με υψηλή κινητικότητα όπου η κινητή συσκευή (UE) μεταφέρεται με υψηλή ταχύτητα. Η κεραιές gNB παρέχουν κάλυψη σε όλο το σιδηρόδρομο, ενώ κάθε φορά που παρουσιάζεται κάποιο εμπόδιο η κινητή συσκευή πρέπει να μεταπέφτει στην κεραιά gNB που βρίσκεται στον ορίζοντα της (LOS). Οι κεραιές gNB έχουν ύψος 35μ ενώ βρίσκονται σε απόσταση 580μ μεταξύ τους. Ακόμα, η ταχύτητα με την οποία μετακινείται το τρένο είναι 35m/s (108km/h). [47]

Στο σενάριο αυτό μελετώνται οι διάφοροι παράγοντες που επιδρούν είτε θετικά είτε αρνητικά στη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου TCP όταν χρησιμοποιείται σε κινητές συσκευές (UE) που μεταφέρονται με υψηλή ταχύτητα. Αρχικά, γίνεται χρήση τεσσάρων (4) κεραιών gNB οι οποίες παρέχουν τεχνολογία δικτύων 5G (mmWave), ενώ γίνεται και χρήση κεραιών eNB (LTE) οι οποίες παρέχουν τεχνολογία δικτύων 4G, με σκοπό τη μεταξύ τους σύγκριση και τις τυχόν διαφορές στην απόδοση τους. Η σύγκριση που γίνεται αφορά το παράθυρο συμφόρησης (cwnd) του πρωτοκόλλου TCP και εκτελούνται δοκιμές με χρήση διάφορων αλγορίθμων CC.

Στο εν λόγω σενάριο εκτελέστηκαν δοκιμές όπου το μέγεθος του πακέτου MSS έχει την προκαθορισμένη τιμή 1400 bytes, ενώ εκτελέστηκαν περαιτέρω δοκιμές με το μέγεθος του MSS να είναι δέκα (10) φορές μεγαλύτερο δηλαδή 14000 bytes (14KB). Εκτελέστηκε μία σύγκριση των δικτύων 5^{ης} γενιάς με τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα πακέτα MSS, με σκοπό να μελετηθεί κατά πόσο δύναται να αξιοποιηθούν μελλοντικά μεγαλύτερα πακέτα MSS στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς. [47]

Ακόμα, εκτελέστηκαν δοκιμές όπου το μέγεθος RLC Buffer λαμβάνει το 10% και το 100% του BDP, θεωρώντας ότι ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων είναι 3Gb/s και ο χρόνος απόκρισης τέτοιος ώστε σε Remote Server το μέγεθος του να είναι 1.5MB και 15MB αντίστοιχα, ενώ σε Edge Server 0.15MB και 1.5MB αντίστοιχα. Στις περιπτώσεις όπου το μέγεθος RLC Buffer είναι ίσο με το 100% BDP γίνεται χρήση και της τεχνολογίας AQM, με σκοπό να παρουσιαστούν οι διαφορές που τυχόν υπάρχουν.

Τέλος, εκτελείται σύγκριση των τεσσάρων (4) αλγορίθμων ελέγχου συμφόρησης, οι οποίοι συνδυάζονται με τους υπόλοιπους παράγοντες και μελετάται η συμπεριφορά τους, ενώ πραγματοποιείται και μία σύγκριση με την απόδοση τους σε δίκτυα 4^{ης} γενιάς.

5.2.2 Σενάριο εφαρμογής TCP σε αστικό περιβάλλον

Το σενάριο σε πυκνό αστικό περιβάλλον μελετάει τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου TCP πάνω σε mmWave δίκτυα 5G, σε διάφορες καταστάσεις. Σε αυτό το σενάριο υπάρχει μία (1) κεραία gNB σε ύψος 25μ, όπου εξυπηρετεί μία ομάδα δέκα (10) χρηστών (UE), οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις με σκοπό να εξεταστούν τυχόν αλλαγές στην απόδοση του πρωτοκόλλου TCP. Αναλυτικότερα, έχουν τοποθετηθεί τέσσερις (4) χρήστες εντός LOS με την κεραία gNB με σκοπό να μελετηθεί η μέγιστη απόδοση που έχει το TCP, τέσσερις (4) χρήστες σε NLOS από την gNB, και τέλος δύο (2) χρήστες εντός κτιρίων με σκοπό να μελετηθεί πόσο επιδρά αρνητικά η διείσδυση των mmWave κυμάτων σε κτίρια. Οι χρήστες που βρίσκονται σε εξωτερικό περιβάλλον έχουν ταχύτητα περπατήματος. [47]

Σε αυτό το σενάριο γίνεται χρήση μόνο κεραιών gNB οι οποίες παρέχουν τεχνολογία δικτύων 5G (mmWave), και όχι κεραιών eNB (LTE) για να γίνει περαιτέρω σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών. Ακόμα οι παράγοντες που μελετώνται αφορούν μόνο την επίδραση της τοποθεσίας του διακομιστή (Edge και Remote Servers) καθώς και την

επίδραση των αλγορίθμων ελέγχου συμφόρησης (CC) στο παράθυρο συμφόρησης του πρωτοκόλλου TCP. Για όλους τους χρήστες το μέγεθος του MSS πακέτου είναι 1400 bytes ενώ το μέγεθος του RLC Buffer είναι 1.5 MB χωρίς τη χρήση AQM.

5.3 Αποτελέσματα Σεναρίων εφαρμογής TCP σε δίκτυα 5G

Οι δοκιμές που εκτελέστηκαν σύμφωνα με το [47], οι οποίες αφορούν την επίδραση του πρωτοκόλλου TCP πάνω στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς στο χιλιοστομετρικό φάσμα (mmWave), συνέβαλαν σε μεγάλο βαθμό στην εξαγωγή αποτελεσμάτων τα οποία πρόκειται να αναλυθούν στις επόμενες υποενότητες. Με τα εν λόγω αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα και διαπιστώσεις για τη συμπεριφορά του TCP σε δίκτυα 5^{ης} γενιάς, ενώ ακόμα μέσα από αυτά παρατηρούνται οι βέλτιστες παράμετροι με τις οποίες μπορεί το TCP να αποδώσει καλύτερα, εκμεταλλεύοντας έτσι στο έπακρο τις δυνατότητες των δικτύων 5G.

Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για κάθε σενάριο ξεχωριστά συγκρίνοντας τα βασικά μεγέθη που επηρεάζουν και αλλάζουν την απόδοση του TCP πάνω στα δίκτυα 5G. Στην πρώτη υποενότητα θα αναλυθούν τα αποτελέσματα του σεναρίου εφαρμογής του TCP σε τρένο υψηλής ταχύτητας, ενώ στη δεύτερη υποενότητα θα αναλυθούν τα αποτελέσματα του σεναρίου εφαρμογής του TCP σε αστικό περιβάλλον. Οι πίνακες που πρόκειται να παρουσιαστούν αφορούν σε αποτελέσματα που εξάχθηκαν από το [47], ενώ τα αποτελέσματα και οι διαπιστώσεις αποτελούν μελέτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.





5.3.1 Αποτελέσματα σεναρίου σε τρένο υψηλής ταχύτητας

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, στο σενάριο εφαρμογής TCP σε τρένο υψηλής ταχύτητας εξετάστηκαν τέσσερις (4) βασικοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την απόδοση του και είναι η τοποθεσία του διακομιστή (Edge ή Remote), οι αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης (CC), το μέγεθος του πακέτου TCP (MSS) και το μέγεθος του RLC Buffer συνδυάζοντας το με την εφαρμογή τεχνολογίας AQM.

Σύγκριση αποτελεσμάτων Goodput και RTT

Στους πίνακες (3) και (4) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως εξάχθηκαν από το [47], στα οποία συγκρίνεται το Goodput δηλαδή η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων σε σχέση με το RTT το οποίο αφορά το χρόνο απόκρισης (latency). Οι μετρήσεις διαχωρίζονται σε Remote Server και Edge Server. Κάθε μέτρηση περιλαμβάνει αποτελέσματα για το Goodput και το RTT (Latency). Συνοπτικά, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο Goodput εμφανίζει ο αλγόριθμος TCP BBR και ακολούθως ο TCP HighSpeed. Ωστόσο, και οι δύο αλγόριθμοι εμφανίζουν το μεγαλύτερο RTT. Επίσης, ο αλγόριθμος TCP New Reno και ακολούθως ο TCP CUBIC εμφανίζουν το χαμηλότερο Goodput, παρατηρείται ωστόσο ότι έχουν και το μικρότερο RTT.

Αναλυτικά στον πίνακα (3) παρουσιάζονται οι μετρήσεις που εξάχθηκαν από το σενάριο εφαρμογής TCP σε τρένο υψηλής ταχύτητας και αφορούν μέγεθος πακέτου TCP (MSS) ίσο με **14KB**.

MSS=P=14KB, B=BDP 			
TCP NewReno	Remote	Goodput: 0.9GB/s	RTT: 48ms
	Edge	Goodput: 1.8GB/s	RTT: 8ms
TCP CUBIC	Remote	Goodput: 1.4GB/s	RTT: 55ms
	Edge	Goodput: 1.7GB/s	RTT: 7ms
HighSpeed TCP	Remote	Goodput: 1.7GB/s	RTT: 63ms
	Edge	Goodput: 1.95GB/s	RTT: 8.2ms
TCP BBR	Remote	Goodput: 1.9GB/s	RTT: 54ms
	Edge	Goodput: 1.9GB/s	RTT: 8.2ms
MSS=P=14KB, B=BDP, AQM 			
TCP NewReno	Remote	Goodput: 0.8GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 2GB/s	RTT: 8.3ms
TCP CUBIC	Remote	Goodput: 0.9GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 1.6GB/s	RTT: 7ms
HighSpeed TCP	Remote	Goodput: 1.4GB/s	RTT: 42ms
	Edge	Goodput: 2GB/s	RTT: 9.8ms
TCP BBR	Remote	Goodput: 1.9GB/s	RTT: 46ms
	Edge	Goodput: 1.9GB/s	RTT: 8.5ms
MSS=P=14KB, B=10% BDP 			
TCP NewReno	Remote	Goodput: 0.5GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 0.5GB/s	RTT: 5ms
TCP CUBIC	Remote	Goodput: 0.8GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 0.4GB/s	RTT: 5ms
HighSpeed TCP	Remote	Goodput: 1.2GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 0.5GB/s	RTT: 5ms
TCP BBR	Remote	Goodput: 1.4GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 1.4GB/s	RTT: 5ms
MSS=P=14KB, B= Oversized Buffer 			
TCP BBR	Remote	Goodput: 1.95GB/s	RTT: 82ms
	Edge	Goodput: 2GB/s	RTT: 8.5ms

Πίνακας 3: Δεδομένα για σενάριο εφαρμογής TCP σε τρένο υψηλής ταχύτητας (MSS=14KB)²

Μελετώντας τα αποτελέσματα παρατηρούμε αρχικά ότι συνολικά οι Edge Servers είναι πολύ αποδοτικότεροι σε σχέση με τους Remote Servers. Παρατηρούμε ότι η διαφορά που έχουν είναι αρκετά μεγάλη καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις με χρήση των Edge Servers επιτυγχάνεται διπλάσια ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων (Goodput) και ταυτόχρονα έως και οκτώ (8) φορές μικρότερος χρόνος απόκρισης.

Με χρήση Remote Server παρατηρούμε ότι ο αποδοτικότερος αλγόριθμος είναι ο TCP BBR για μέγεθος RLC Buffer ίσο με 100% του BDP και χρήση τεχνολογίας AQM, καθώς επιτυγχάνει πολύ μεγάλο Goodput (1,9GB/s) και μικρό RTT (46ms) σε σχέση με τα υπόλοιπα αποτελέσματα. Εάν εστιάσουμε το ενδιαφέρον στο πιο μικρό RTT, ο αποδοτικότερος αλγόριθμος είναι ο TCP BBR με χρήση 10% του BDP, καθώς

² Με πράσινο απεικονίζονται οι καλύτερες μετρήσεις για Edge Server ενώ με μπλε για Remote Servers

επιτυγχάνει RTT ίσο με 40 ms κρατώντας την ταχύτητα Goodput σε υψηλά επίπεδα (1,4GB/s).

Επίσης, όσον αφορά τη χρήση Edge Server όταν το μέγεθος του RLC Buffer είναι ίσο με το 100% του BDP, ο αποδοτικότερος αλγόριθμος είναι ο TCP HighSpeed και ο TCP BBR οι οποίοι επιτυγχάνουν πολύ υψηλά Goodput (1,90-1,95GB/s) και ταυτόχρονα πολύ μικρό χρόνο απόκρισης (8,2ms). Ωστόσο, με το ίδιο μέγεθος RLC Buffer και χρήση της τεχνολογίας AQM ο αποδοτικότερος αλγόριθμος είναι ο TCP New Reno αφού επιτυγχάνει το μεγαλύτερο Goodput (2GB/s) και πολύ χαμηλό RTT (8,3ms). Ακόμα, για υπερμεγέθη RLC Buffer (oversized) ο TCP BBR αποτελεί μία πολύ καλή και αξιόπιστη λύση, αφού επιτυγχάνει το μεγαλύτερο Goodput (2GB/s) και ο χρόνος απόκρισης παραμένει πολύ χαμηλός (8.5ms). Παρατηρείται ότι οι αλγόριθμοι που αυξάνουν το cwnd πολύ γρήγορα είναι πιο αποδοτικοί αφού λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζουν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς στο χιλιοστομετρικό φάσμα (mmWave), υπάρχει συχνά διαλλειπτική λειτουργία με αποτέλεσμα οι αλγόριθμοι με πιο σταδιακή αύξηση να μην προλαβαίνουν να αναπτύξουν επαρκώς το cwnd.

Τέλος, με χρήση των Edge Servers όταν το μέγεθος του RLC Buffer είναι ίσο με το 10% του BDP, παρατηρούμε ότι το Goodput που επιτυγχάνεται είναι αισθητά μικρότερο στις περισσότερες περιπτώσεις. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι επιτυγχάνονται οι μικρότεροι χρόνοι απόκρισης, αφού όλοι οι αλγόριθμοι έχουν RTT ίσο με 5ms. Ο αποδοτικότερος αλγόριθμος είναι και πάλι ο TCP BBR ο οποίος επιτυγχάνει Goodput ίσο με 1,4GB/s. Εκ νέου παρατηρείται ότι με χρήση μικρότερης χωρητικότητας του δικτύου έχουμε χαμηλότερους χρόνους απόκρισης, ωστόσο δεν μπορούν να επιτευχθούν οι ταχύτητες που προσφέρει το χιλιοστομετρικό φάσμα (mmWave).

Αναλυτικά στον πίνακα (4) παρουσιάζονται οι μετρήσεις που εξάχθηκαν από το σενάριο εφαρμογής TCP σε τρένο υψηλής ταχύτητας και αφορούν μέγεθος πακέτου TCP (MSS) ίσο με **1.4KB**.

MSS=P=1.4KB, B=BDP			
TCP NewReno	Remote	Goodput: 0.4GB/s	RTT: 42ms
	Edge	Goodput: 1.5GBs	RTT: 6.4ms
TCP CUBIC	Remote	Goodput: 0.7GB/s	RTT: 50ms
	Edge	Goodput: 0.9GB/s	RTT: 6.5ms
HighSpeed TCP	Remote	Goodput: 1.5GB/s	RTT: 60ms
	Edge	Goodput: 1.85GB/s	RTT: 8.7ms
TCP BBR	Remote	Goodput: 1.6GB/s	RTT: 65ms
	Edge	Goodput: 1.8GB/s	RTT: 7.8ms
MSS=P=1.4KB, B=BDP, AQM			
TCP NewReno	Remote	Goodput: 0.3GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 1.5GB/s	RTT: 6.2ms
TCP CUBIC	Remote	Goodput: 0.5GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 1.1GB/s	RTT: 7ms
HighSpeed TCP	Remote	Goodput: 1.1GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 1.8GB/s	RTT: 9ms
TCP BBR	Remote	Goodput: 1.7GB/s	RTT: 46ms
	Edge	Goodput: 1.85GB/s	RTT: 8ms

MSS=P=1.4KB, B=10% BDP			
TCP NewReno	Remote	Goodput: 0.15GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 0.4GB/s	RTT: 5ms
TCP CUBIC	Remote	Goodput: 0.4GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 0.2GB/s	RTT: 5ms
HighSpeed TCP	Remote	Goodput: 0.7GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 0.5GB/s	RTT: 4.8ms
TCP BBR	Remote	Goodput: 1.55GB/s	RTT: 40ms
	Edge	Goodput: 1.55GB/s	RTT: 4.8ms
MSS=P=1.4KB, B= Oversized Buffer			
TCP BBR	Remote	Goodput: 1.85GB/s	RTT: 80ms
	Edge	Goodput: 1.9GB/s	RTT: 8ms

Πίνακας 4: Δεδομένα για σενάριο εφαρμογής TCP σε τρένο υψηλής ταχύτητας (MSS=1.4KB)

Μελετώντας στον πίνακα (4) τα αποτελέσματα, παρατηρούμε πάλι ότι συνολικά οι Edge Servers είναι πολύ αποδοτικότεροι σε σχέση με τους Remote Servers. Στις περισσότερες περιπτώσεις η διαφορά που έχουν είναι αρκετά μεγάλη καθώς με χρήση των Edge Servers επιτυγχάνεται πολλαπλάσια ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων (Goodput) και ταυτόχρονα έως και επτά (7) φορές μικρότερος χρόνος απόκρισης. Εξαιρεση αποτελεί ο αλγόριθμος TCP BBR, όπου η διαφορά που παρουσιάζει στο Goodput είναι αρκετά μικρή της τάξεως των 0,05 – 0,2 GB/s.

Με χρήση Remote Server παρατηρούμε ότι ο αποδοτικότερος αλγόριθμος είναι ο TCP BBR για μέγεθος RLC Buffer ίσο με 100% του BDP και χρήση τεχνολογίας AQM, καθώς επιτυγχάνει πολύ μεγάλο Goodput (1,55GB/s) και το μικρότερο RTT (40ms) σε σχέση με τα υπόλοιπα αποτελέσματα. Επίσης, αξίζει να αναφέρουμε ότι για υπερμεγέθη Buffer (oversized) ο αλγόριθμος TCP BBR επιτυγχάνει πολύ υψηλές ταχύτητες δεδομένων (1,9GB/s), αλλά ο χρόνος απόκρισης είναι αρκετά υψηλός (80ms).

Επίσης, όσον αφορά τη χρήση Edge Server όταν το μέγεθος του RLC Buffer είναι ίσο με το 100% του BDP, ο αποδοτικότερος αλγόριθμος είναι ο TCP HighSpeed και ο TCP BBR οι οποίοι επιτυγχάνουν πολύ υψηλά Goodput (1,80-1,85GB/s) και ταυτόχρονα πολύ μικρούς χρόνους απόκρισης (7,8-8,7ms). Ωστόσο, εστιάζοντας στο χαμηλότερο χρόνο απόκρισης παρατηρούμε ότι με χρήση του 100% του BDP και της τεχνολογίας AQM, ο αλγόριθμος TCP New Reno επιτυγχάνει το χαμηλότερο RTT το οποίο είναι ίσο με 6,2ms διατηρώντας σχετικά υψηλό Goodput (1,5GB/s).

Τέλος, με χρήση των Edge Servers όταν το μέγεθος του RLC Buffer είναι ίσο με το 10% του BDP, παρατηρούμε ότι το Goodput που επιτυγχάνεται είναι αισθητά μικρότερο στις περισσότερες περιπτώσεις. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι ο TCP BBR επιτυγχάνει το μικρότερο χρόνο απόκρισης από όλες τις δοκιμές όπου είναι 4,8ms, ενώ διατηρεί υψηλό Goodput (1,55GB/s).

Αποτελέσματα σύγκρισης παράθυρου συμφόρησης (CWND) LTE (4G) με mmWave (5G)

Στον πίνακα (5) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως εξάχθηκαν από το [47] στα οποία συγκρίνεται η απόδοση και συμπεριφορά του παράθυρου συμφόρησης (cwnd) σε δίκτυα 4^{ης} γενιάς (LTE) με τα νεότερα δίκτυα 5^{ης} γενιάς (mmWave).

Διπλωματική Εργασία: Μελέτη Του Πρωτοκόλλου TCP στα Μικροκυματικά (mmWave) Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας Πέμπτης Γενιάς (5G)

Time (s)	TCP NewReno		
	Type of Network	MSS=14KB	MSS=1.4KB
1	LTE (4G)	CWND: 0.5MB	CWND: 0.5MB
	mmWave (5G)	CWND: 4MB	CWND: 4MB
10	LTE (4G)	CWND: 0.2MB	CWND: 0.2MB
	mmWave (5G)	CWND: 6MB	CWND: 0.5MB
20	LTE (4G)	CWND: 0.3MB	CWND: 0.3MB
	mmWave (5G)	CWND: 3MB	CWND: 0.5MB
30	LTE (4G)	CWND: 0.2MB	CWND: 0.1MB
	mmWave (5G)	CWND: 1MB	CWND: 0.5MB
40	LTE (4G)	CWND: 0.5MB	CWND: 0.4MB
	mmWave (5G)	CWND: 5MB	CWND: 0.5MB
Time (s)	TCP CUBIC		
	Type of Network	MSS=14KB	MSS=1.4KB
1	LTE (4G)	CWND: 0.5MB	CWND: 0.5MB
	mmWave (5G)	CWND: 5MB	CWND: 4MB
10	LTE (4G)	CWND: 0.2MB	CWND: 0.2MB
	mmWave (5G)	CWND: 2MB	CWND: 4MB
20	LTE (4G)	CWND: 0.5MB	CWND: 0.3MB
	mmWave (5G)	CWND: 6MB	CWND: 2.5MB
30	LTE (4G)	CWND: 0.2MB	CWND: 0.15MB
	mmWave (5G)	CWND: 2MB	CWND: 1.5MB
40	LTE (4G)	CWND: 0.4MB	CWND: 0.4MB
	mmWave (5G)	CWND: 2MB	CWND: 1.5MB
Time (s)	TCP HighSpeed		
	Type of Network	MSS=14KB	MSS=1.4KB
1	LTE (4G)	CWND: 0.5MB	CWND: 0.5MB
	mmWave (5G)	CWND: 5MB	CWND: 5MB
10	LTE (4G)	CWND: 0.25MB	CWND: 0.15MB
	mmWave (5G)	CWND: 10MB	CWND: 5MB
20	LTE (4G)	CWND: 0.5MB	CWND: 0.5MB
	mmWave (5G)	CWND: 14MB	CWND: 9MB
30	LTE (4G)	CWND: 0.2MB	CWND: 0.3MB
	mmWave (5G)	CWND: 4MB	CWND: 3MB
40	LTE (4G)	CWND: 0.2MB	CWND: 0.5MB
	mmWave (5G)	CWND: 6MB	CWND: 3MB
Time (s)	TCP BBR		
	Type of Network	MSS=14KB	MSS=1.4KB
1	LTE (4G)	CWND: 1MB	CWND: 1MB
	mmWave (5G)	CWND: 20MB	CWND: 30MB
10	LTE (4G)	CWND: 0.2MB	CWND: 0.6MB
	mmWave (5G)	CWND: 25MB	CWND: 25MB
20	LTE (4G)	CWND: 0.7MB	CWND: 0.7MB
	mmWave (5G)	CWND: 5MB	CWND: 25MB
30	LTE (4G)	CWND: 0.5MB	CWND: 0.5MB
	mmWave (5G)	CWND: 5MB	CWND: 5MB
40	LTE (4G)	CWND: 0.6MB	CWND: 0.5MB
	mmWave (5G)	CWND: 25MB	CWND: 25MB

Πίνακας 5: Αποτελέσματα σύγκρισης LTE (4G) με mmWave (5G)

Μελετώντας τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι συνολικά η επίδραση του πακέτου MSS στα δίκτυα LTE (4G) είναι πολύ μικρή και αυτό λόγω του μικρού εύρους ζώνης (Bandwidth) που διαθέτουν. Η αύξηση της τιμής του παράθυρου συμφόρησης για τα εν λόγω δίκτυα για μεγάλα πακέτα MSS (14KB) είναι της τάξεως των 0.1 – 0.2 MB, τιμές οι οποίες θεωρούνται αρκετά μικρές και συνεπώς δεν βοηθούν στην αισθητή αύξηση της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων.

Ακόμα, συγκρίνοντας τις διαφορές που παρουσιάζονται στα mmWave δίκτυα (5G), παρατηρούμε ότι για τους αλγόριθμους TCP NewReno και TCP CUBIC χρησιμοποιώντας μεγάλα πακέτα MSS το παράθυρο συμφόρησης αυξάνεται πιο γρήγορα σε σχέση με μικρά πακέτα, με αποτέλεσμα να παρέχεται μεγαλύτερο Goodput στο δίκτυο για τους χρήστες. Με μεγαλύτερα πακέτα MSS οι δύο ανωτέρω αλγόριθμοι αποδίδουν έως και τρεις (3) φορές καλύτερα, με αποτέλεσμα η μεγάλη ευρυζωνικότητα που παρέχουν τα mmWave 5G δίκτυα να εκμεταλλεύεται περισσότερο.

Ωστόσο, για τους αλγόριθμους TCP HighSpeed και TCP BBR οι διαφορές που παρουσιάζονται όταν χρησιμοποιούνται μεγάλα πακέτα MSS σε σχέση με μικρότερα είναι αμελητέα, ενώ ορισμένες φορές παρατηρούμε ότι τα μικρότερα πακέτα MSS αυξάνουν πιο γρήγορα το cwnd και συνεπώς παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες. Αυτό συμβαίνει διότι οι TCP HighSpeed και BBR είναι επιθετικοί αλγόριθμοι και αυξάνουν το παράθυρο συμφόρησης πολύ γρήγορα χρησιμοποιώντας είτε μικρά είτε μεγάλα πακέτα MSS.

5.3.2 Αποτελέσματα σεναρίου σε αστικό περιβάλλον

Το σενάριο εφαρμογής TCP σε αστικό περιβάλλον εξετάζει την απόδοση του πρωτοκόλλου TCP στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς για χρήστες (UE) που βρίσκονται είτε ακίνητοι είτε περπατούν και οι συνθήκες διάδοσης H/M κυμάτων είναι καλές. Εξετάζονται τρεις (3) διαφορετικές περιπτώσεις οι οποίες είναι:

- Οι χρήστες (UE) είναι ορατοί (LOS) από την κεραία gNB.
- Οι χρήστες (UE) δεν είναι ορατοί (NLOS) από την κεραία gNB.
- Οι χρήστες (UE) βρίσκονται εντός κάποιου κτιρίου (INDOOR).

Ειδικότερα, μελετάται πως επιδρούν οι τέσσερις (4) βασικοί αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης (CC), καθώς και η τοποθεσία των διακομιστών (Edge και Remote). Το μέγεθος του πακέτου MSS καθώς και το μέγεθος του RLC Buffer παραμένουν αμετάβλητα (1.4KB και 1.5MB αντίστοιχα), και συνεπώς δεν εξετάζεται η επιρροή τους σε αυτό το σενάριο. Στο εν λόγω σενάριο κάθε αλγόριθμος πρέπει να επιτύχει κάποιες οριζόμενες τιμές Goodput και RTT, ώστε να εκπληρώνει τις απαιτήσεις της τεχνολογίας 5G. Συγκεκριμένα, σκοπός είναι το Goodput να είναι μεγαλύτερο από 100Mb/s ενώ το RTT μικρότερο από 10ms.

Στον πίνακα (6) παρουσιάζονται τα δεδομένα που εξάχθηκαν από το [47], τα οποία αφορούν το σενάριο εφαρμογής TCP σε αστικό περιβάλλον.

		LOS ³	NLOS	INDOOR
TCP NewReno	Remote	Goodput: 150MB/s RTT: 70ms	Goodput: 120MB/s RTT: 70ms	Goodput: 50MB/s RTT: 100ms
	Edge	Goodput: 160MB/s RTT: 60-80ms	Goodput: 120-140MB/s RTT: 60ms	Goodput: 60MB/s RTT: 100ms
TCP CUBIC	Remote	Goodput: 150MB/s RTT: 100ms	Goodput: 110MB/s RTT: 125ms	Goodput: 50MB/s RTT: 200ms
	Edge	Goodput: 160MB/s RTT: 75ms	Goodput: 110-130MB/s RTT: 70-90ms	Goodput: 60MB/s RTT: 160ms
TCP HighSpeed	Remote	Goodput: 150MB/s RTT: 100ms	Goodput: 120MB/s RTT: 125ms	Goodput: 50MB/s RTT: 200ms
	Edge	Goodput: 160MB/s RTT: 65ms	Goodput: 120-140MB/s RTT: 75-90ms	Goodput: 60MB/s RTT: 150ms
TCP BBR	Remote	Goodput: 150MB/s RTT: 75ms	Goodput: 120MB/s RTT: 80ms	Goodput: 50MB/s RTT: 80ms
	Edge	Goodput: 160MB/s RTT: 5-10ms	Goodput: 120-130MB/s RTT: 5-10ms	Goodput: 60MB/s RTT: 10ms

Πίνακας 6: Δεδομένα για σενάριο εφαρμογής TCP σε αστικό περιβάλλον

Παρατηρούμε ότι ο μόνος αλγόριθμος που επιτυγχάνει το στόχο του σεναρίου είναι ο TCP BBR, ο οποίος σε περίπτωση που γίνεται χρήση Edge Server και όταν οι χρήστες βρίσκονται είτε LOS είτε NLOS καταφέρνει να έχει Goodput άνω των 100Mb/s ενώ ταυτόχρονα κρατάει το RTT σε πολύ χαμηλά επίπεδα (κάτω από 10ms). Ακόμα, παρατηρούμε ότι οι υπόλοιποι αλγόριθμοι έχουν σχεδόν την ίδια απόδοση για κάθε περίπτωση ξεχωριστά χωρίς να επηρεάζει η τοποθεσία του διακομιστή. Τέλος, παρατηρείται ότι στην περίπτωση όπου ο χρήστης βρίσκεται εντός κτιρίου η απόδοση του πρωτοκόλλου TCP στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς μειώνεται σε τεράστιο βαθμό, αφού το Goodput υποδιπλασιάζεται ενώ ο χρόνος απόκρισης RTT σε ορισμένες περιπτώσεις τριπλασιάζεται.

5.4 Συμπεράσματα / Διαπιστώσεις

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που αναλύθηκαν στις προηγούμενες υποενότητες βοηθούν αρκετά στην εξαγωγή κάποιων αξιόπιστων και ταυτόχρονα πολύ σημαντικών συμπερασμάτων, που δύναται να συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του πρωτοκόλλου TCP πάνω στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς (5G) στο χιλιοστομετρικό φάσμα (mmWave). Με τα δύο αυτά σενάρια μπορούν να εντοπιστούν οι αδυναμίες που παρουσιάζει το πρωτόκολλο TCP καθώς και οι περιπτώσεις που δεν αποδίδει. Ακόμα, μέσω των σεναρίων μελετήθηκαν ποιες είναι οι κατάλληλες παράμετροι για κάθε κατάσταση που βρίσκεται ο χρήστης και τέλος διαπιστώθηκε ότι πρέπει να επαναξιολογηθούν τα μεγέθη των τιμών σε βασικές παραμέτρους του TCP (π.χ. μέγεθος MSS).

³ LOS με SINR = 48 dB, NLOS με SINR = 20 dB, Indoor με SINR = 5 dB

Αναλυτικότερα, παρακάτω παραθέτουμε τα συμπεράσματα και διαπιστώσεις που εξάγαμε από τα ανωτέρω σενάρια εφαρμογής TCP πάνω στα μικροκυματικά δίκτυα 5G (mmWave).

Συμπεράσματα για τους Servers (Διακομιστές)

Συνολικά, μπορούμε να αναφέρουμε ότι η απόδοση των Edge Server είναι καλύτερη σε σύγκριση με τους Remote Server. Ο χρόνος απόκρισης (RTT) και στα δύο σενάρια ήταν πολύ χαμηλότερος σε Edge Server, ενώ στο μεγαλύτερο ποσοστό των περιπτώσεων η ταχύτητα που παρουσιάζουν είναι υψηλότερη. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση όπου γίνεται χρήση μικρού μεγέθους RLC Buffer, όπου οι TCP CUBIC και TCP HighSpeed επιτυγχάνουν υψηλότερες ταχύτητες με Remote Servers. Γενικά η χρήση Remote Server παρουσιάζει σχετικά υψηλές αποδόσεις μόνο σε χαμηλής κινητικότητας περιβάλλον όπου οι ταχύτητες είναι υψηλές και ταυτόχρονα ο χρόνος απόκρισης παρέμενε σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο σε καμία περίπτωση με χρήση Remote Server δεν μπορούσαν να επιτευχθούν οι τιμές που στοχεύει η νέα τεχνολογία 5^{ης} γενιάς.

Αναλυτικά, όσον αφορά την χρήση Edge Server σε περιβάλλον υψηλής κινητικότητας (τρένο υψηλής ταχύτητας), παρατηρούμε ότι αποδίδουν καλύτερα με χρήση των αλγορίθμων TCP BBR και TCP HighSpeed, όπου το μέγεθος του RLC Buffer είναι ίσο με το 100% του BDP. Το μέγεθος του πακέτου MSS επιδρά θετικά μόνο στο χρόνο απόκρισης με μικρές διαφορές (8ms έναντι 5ms). Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση του αλγόριθμου TCP NewReno σε Edge Server με μέγεθος RLC Buffer ίσο με BDP, χρήση τεχνολογίας AQM και μεγάλο μέγεθος πακέτου MSS (14KB) επιτυγχάνει πολύ καλά αποτελέσματα (Goodput: 2GB/s – RTT: 8.3ms) και συνεπώς αποτελεί μία αξιόπιστη και αποδοτική λύση. Σε περιβάλλον χαμηλής κινητικότητας οι Edge Servers αποδίδουν καλύτερα με τη χρήση του αλγόριθμου TCP BBR, ο οποίος είναι ο μοναδικός που επιτυγχάνει τους στόχους που έχουν τεθεί για τα δίκτυα 5G. Υψηλή απόδοση παρουσιάζει και ο TCP HighSpeed, ο οποίος ωστόσο αποδίδει υψηλούς χρόνους απόκρισης.

Ακόμα, όσον αφορά τη χρήση Remote Server σε περιβάλλον υψηλής κινητικότητας, καλύτερη δυνατή απόδοση επιτυγχάνεται με τη χρήση του αλγόριθμου TCP BBR, όπου το μέγεθος του πακέτου MSS είναι μεγάλο (14KB), το μέγεθος του RLC Buffer είναι ίσο με BDP και γίνεται χρήση της τεχνολογίας AQM. Σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες (Goodput: 1.9GB/s), ενώ ο χρόνος απόκρισης παραμένει υψηλός (RTT: 46ms). Σε περιβάλλον χαμηλής κινητικότητας οι Remote Servers έχουν εν γένει καλύτερη συμπεριφορά αφού όλοι οι αλγόριθμοι παρουσιάζουν σχετικά υψηλές αποδόσεις, ενώ συνολικά οι καταλληλότεροι αλγόριθμοι είναι οι TCP NewReno και TCP BBR αφού επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες (Goodput: 150-160MB/s). Οι TCP HighSpeed και TCP CUBIC αποτελούν μία αξιόπιστη λύση σε περιπτώσεις όπου ο χρήστης είναι εντός του ορίζοντα της κεραίας gNB.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιβάλλον υψηλής κινητικότητας δεν μπορεί να αξιολογηθεί πλήρως το μέγεθος της επιρροής του χιλιοστομετρικού φάσματος στην απόδοση των διακομιστών αναλόγως της τοποθεσίας τους, ωστόσο λόγω της μικρότερης εμβέλειας που παρέχουν οι κεραίες gNB στους χρήστες είναι απαραίτητη η

ύπαρξη των διακομιστών όσο πιο κοντά στο δίκτυο κορμού για επίτευξη μικρότερων χρόνων απόκρισης (latency). Επίσης, σε περιβάλλον χαμηλής κινητικότητας διαπιστώνεται ότι το χιλιοστομετρικό φάσμα δεν επηρεάζει αισθητά την τοποθεσία των διακομιστών αφού από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι είτε σε Remote είτε σε Edge servers η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων βρίσκεται στα ίδια επίπεδα, ενώ οι χρόνοι απόκρισης είναι υψηλοί και στις δύο περιπτώσεις.

Συμπεράσματα για τους αλγόριθμους ελέγχου συμφόρησης (CC)

Οι διαφορές που παρουσιάζουν οι τέσσερις (4) αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης στα πειράματα που μελετήθηκαν είναι μεγάλες, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις κάποιοι αλγόριθμοι επηρεάζουν πολύ την απόδοση του πρωτοκόλλου TCP. Συνολικά, την καλύτερη απόδοση παρουσιάζει ο αλγόριθμος TCP BBR, ο οποίος και στα δύο σενάρια αποδίδει υψηλές ταχύτητες ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνει χαμηλούς χρόνους απόκρισης. Ακόμα, υψηλή απόδοση επιτυγχάνει και ο TCP HighSpeed, ο οποίος ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις παρουσιάζει αρκετά υψηλούς χρόνους απόκρισης. Όπως αναφέρθηκε, ο αλγόριθμος TCP NewReno με χρήση των κατάλληλων παραμέτρων, αποτελεί μία πολύ καλή λύση σε περιβάλλον υψηλής κινητικότητας.

Αναλυτικότερα, σε περιβάλλον υψηλής κινητικότητας ο αλγόριθμος TCP BBR είναι ο μοναδικός που με χρήση οποιασδήποτε παραμέτρου επιτυγχάνει υψηλές ταχύτητες και ταυτόχρονα χαμηλούς χρόνους απόκρισης. Χαρακτηριστικά να αναφέρουμε ότι η χαμηλότερη ταχύτητα που επιτυγχάνει είναι 1,40GB/s ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις κυμαίνεται από 1.80GB/s – 1.90GB/s. Ακολούθως ο αλγόριθμος TCP HighSpeed παρέχει πολύ υψηλές αποδόσεις. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ο TCP HighSpeed επιτυγχάνει πολύ χαμηλές αποδόσεις και δεν συνίσταται η χρήση του, όταν το μέγεθος του RLC Buffer είναι μικρό (10% BDP), αφού οι ταχύτητες που παρουσιάζει είναι της τάξεως των 0.5-0.7GB/s.

Σε περιβάλλον χαμηλής κινητικότητας, ο αλγόριθμος TCP BBR παρουσιάζει πάλι τις υψηλότερες τιμές, ο οποίος είναι και ο μοναδικός που επιτυγχάνει τους στόχους που τέθηκαν (Goodput: 150-160MB/s – RTT: 5-10ms). Ακολούθως, οι υπόλοιποι αλγόριθμοι επιτυγχάνουν σχετικά υψηλές ταχύτητες, με τον TCP NewReno να αποδίδει λίγο χαμηλότερους χρόνους απόκρισης.

Συνολικά παρατηρείται ότι οι αλγόριθμοι που αυξάνουν το cwnd πολύ γρήγορα (TCP BBR & HighSpeed) είναι πιο αποδοτικοί αφού στο χιλιοστομετρικό φάσμα (mmWave) λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζουν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς υπάρχει συχνά διαλλειπτική λειτουργία με αποτέλεσμα οι αλγόριθμοι με πιο αργή αύξηση να μην προλαβαίνουν να αναπτύξουν επαρκώς το cwnd.

Συμπεράσματα για μέγεθος πακέτου MSS

Το μέγεθος του πακέτου MSS εξετάστηκε μόνο στο σενάριο τρένου υψηλής ταχύτητας, όπου εκτελέστηκε σύγκριση του προεπιλεγμένου πακέτου MSS (1.4KB) με έτερο μεγέθους δέκα (10) φορές μεγαλύτερο (14KB). Από το σενάριο παρατηρούμε ότι

σε περιβάλλον υψηλής κινητικότητας ένα πολύ μεγάλο πακέτο MSS μπορεί να δώσει υψηλές ταχύτητες, ωστόσο αυξάνεται πολύ ο χρόνος απόκρισης (RTT), καθώς σε περιπτώσεις συμφόρησης το cwnd πρέπει να διαχειριστεί πολύ μεγαλύτερα πακέτα. Ειδικότερα, συμπεραίνουμε ότι με χρήση μεγαλύτερου πακέτου MSS οι loss-based TCP CC (NewReno, CUBIC, HighSpeed) παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα, για το λόγο ότι στη φάση αποφυγής συμφόρησης οι εν λόγω αλγόριθμοι αυξάνουν το cwnd κατά ένα (1) MSS. Έτσι, με χρήση μεγάλου πακέτου MSS μπορούν να επιτύχουν πολύ γρήγορα μεγάλες ταχύτητες, εκμεταλλεύοντας με αυτό τον τρόπο το μεγάλο Bandwidth που παρέχουν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς.

Αναλυτικότερα, διαπιστώνουμε ότι με μεγαλύτερο πακέτο MSS οι αλγόριθμοι TCP New Reno και TCP CUBIC παρουσιάζουν πολύ καλύτερη απόδοση, καθώς οι ταχύτητες που επιτυγχάνουν σε σύγκριση με το προεπιλεγμένο πακέτο MSS είναι μεγαλύτερες κατά 0.3 – 0.9GB/s. Ειδικότερα, παρατηρούμε ότι ο TCP NewReno κάνοντας χρήση όλου του BDP και της τεχνολογίας AQM επιτυγχάνει ταχύτητα 2GB/s, με χρόνο απόκρισης αρκετά χαμηλό (8.3ms). Οι ανωτέρω αλγόριθμοι εκμεταλλεύονται το μεγαλύτερο πακέτο MSS με πολύ αποτελεσματικό τρόπο. Αντιθέτως, η απόδοση των TCP BBR και TCP HighSpeed παραμένει σχεδόν η ίδια είτε με χρήση του μεγάλου είτε με χρήση του μικρού πακέτου MSS.

Επίσης, μελετώντας τη σύγκριση που εκτελέστηκε ανάμεσα στο δίκτυο LTE (4G) και το mmWave (5G) διαπιστώνουμε ότι αλγόριθμοι TCP NewReno και CUBIC, με χρήση μεγάλου πακέτου MSS, εκμεταλλεύονται στο μέγιστο την μεγάλη ευρυζωνικότητα που παρέχουν τα δίκτυα 5G αφού όπως φαίνεται στον πίνακα (5) το cwnd είναι έως και δέκα (10) φορές μεγαλύτερο. Εκ των loss-based TCP αλγορίθμους παρατηρούμε ότι μόνο ο TCP HighSpeed δεν αυξάνει την απόδοση του με χρήση μεγάλου πακέτου MSS, για το λόγο ότι αυξάνει πολύ γρήγορα το παράθυρο συμφόρησης του είτε με μικρό είτε με μεγάλο πακέτο MSS.

Συνολικά, διαπιστώνουμε ότι λόγω της υψηλής συχνότητας και ευρυζωνικότητας που προσφέρει η χιλιοστομετρική ζώνη (mmWave) τα μεγάλα πακέτα MSS προσφέρουν τα μέγιστα στους αλγορίθμους που παρέχουν πιο αργή αύξηση (TCP New Reno & CUBIC) στο cwnd για το λόγο ότι μπορούν να εκμεταλλευτούν πολύ πιο γρήγορα την μεγάλη χωρητικότητα που παρέχει το δίκτυο και έτσι να αυξάνουν το cwnd σχεδόν το ίδιο γρήγορα με τους επιθετικούς αλγορίθμους (TCP BBR & HighSpeed).

Συμπεράσματα για μέγεθος RLC Buffer

Το μέγεθος RLC (Radio Link Control) Buffer αποτελεί καθοριστικό παράγοντα αφού τα νέα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς προσφέρουν τεράστια ευρυζωνικότητα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του σεναρίου σε τρένο υψηλής ταχύτητας συμπεραίνουμε ότι η χρήση μεγάλου μεγέθους Buffer (RLC Buffer) προσφέρει αρκετά μεγαλύτερες ταχύτητες, για το σύνολο των αλγορίθμων ελέγχου συμφόρησης.

Ειδικότερα, όταν το μέγεθος του Buffer είναι μικρό (10% BDP), η υψηλότερη ταχύτητα μετάδοσης ήταν 1.55GB/s, όπου επιτεύχθηκε από τον TCP BBR ο οποίος είναι ο μόνος που κατάφερε σχετικά υψηλές ταχύτητες. Οι αλγόριθμοι loss-based TCP

παρουσιάζουν πολύ μικρότερη απόδοση κάνοντας χρήση μικρού BDP. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο TCP New Reno όπου με χρήση μικρού Buffer (MSS=14KB) επιτυγχάνει Goodput: 0.5GB/s – RTT: 5ms, ενώ ο ίδιος με μεγάλο Buffer και χρήση τεχνολογίας AQM επιτυγχάνει Goodput: 2GB/s – RTT: 8.3ms. Με χρήση μεγάλου Buffer παρατηρούμε ότι αυξάνεται ο χρόνος απόκρισης, ωστόσο η διαφορά είναι σχετικά μικρές (βλ. ανωτέρω παράδειγμα).

Ακόμα, συμπεραίνουμε ότι η τεχνολογία AQM αποτελεί μία αρκετά αποτελεσματική λύση για την αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης με χρήση μεγάλου Buffer. Στο σύνολο των TCP αλγορίθμων συμφόρησης με χρήση της τεχνολογίας AQM υπήρξε μία αύξηση της ταχύτητας της τάξεως 0.2-0.4GB/s. Εξαιρεση αποτελεί ο TCP HighSpeed όταν χρησιμοποιεί μικρό μέγεθος πακέτου MSS, όπου με χρήση της τεχνολογίας AQM μειώνεται η απόδοση του κατά 0.05GB/s. Ωστόσο, συνολικά η τεχνολογία AQM αποτελεί μία πολύ αποδοτική τεχνολογία για την αύξηση της ταχύτητας.

Επιπρόσθετα, από τις μετρήσεις που εκτελέστηκαν στο σενάριο σε αστικό περιβάλλον συμπεραίνουμε ότι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς (5G) στο mmWave φάσμα απαιτούν περισσότερες κεραιές gNB, για το λόγο ότι σε σημεία εκτός του ορίζοντα αυτών μειώνεται δραστικά η απόδοση τους και έτσι δεν εκμεταλλεύεται η μεγάλη ευρυζωνικότητα που παρέχουν. Επίσης, η χρήση μικρότερων κυψελών 5G αυξάνει συνολικά την απόδοση του δικτύου και παρέχει μεγαλύτερη σταθερότητα, αποφεύγοντας τυχόν ανωμαλίες (π.χ. Bufferbloat). Τέλος, παρατηρούμε ότι εντός κτιρίων όπου το H/M κύμα πρέπει να διαπεράσει μέσα από υλικές κατασκευές (NLOS), η απόδοση του πρωτοκόλλου TCP πάνω στα mmWave δίκτυα 5G είναι πολύ μειωμένη και συνεπώς δεν πληρούνται οι στόχοι που έχουν τεθεί για τα εν λόγω δίκτυα.

6. Τρόποι βελτίωσης μηχανισμών του TCP

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το πρωτόκολλο TCP αντιμετωπίζει αρκετές δυσκολίες και ανωμαλίες κατά τη μεταφορά των πακέτων δεδομένων, λόγω της μεγάλης ευαισθησίας που παρουσιάζουν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς στο χιλιοστομετρικό φάσμα (mmWave). Συνολικά, παρατηρούμε ότι το πρωτόκολλο TCP δεν μπορεί να έχει μία σταθερή απόδοση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ειδικότερα, σε περιοχές όπου υπάρχουν εμπόδια ή οι κινητές συσκευές είναι NLOS η απόδοση των δικτύων 5G είναι πολύ χαμηλή και σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να επιτευχθούν οι στόχοι που είχαν τεθεί για αυτά. Για την αντιμετώπιση αυτών των ανωμαλιών μελετώνται και δοκιμάζονται σε πειραματικό στάδιο κάποιες τεχνικές με τις οποίες το πρωτόκολλο TCP μπορεί να λειτουργεί πιο αποδοτικά εκμεταλλεύοντας έτσι τη μεγάλη ευρυζωνικότητα των δικτύων 5^{ης} γενιάς (5G).

6.1 Multi-Path TCP (MP-TCP)

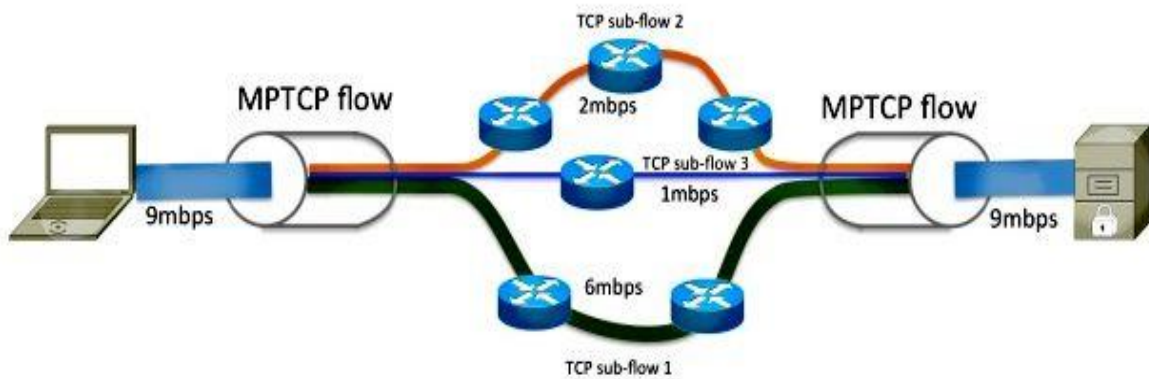
Όπως αναφέρθηκε στο τρίτο κεφάλαιο, για την αποστολή πακέτων το πρωτόκολλο TCP εγκαθιδρύει μία σύνδεση μεταξύ των δύο χρηστών, με την οποία αποστέλλονται δεδομένα. Ωστόσο, για την αποστολή πακέτων από τον ένα χρήστη στον άλλο, το πρωτόκολλο TCP ακολουθεί προεπιλεγμένα μία συγκεκριμένη διαδρομή. Έτσι, σύμφωνα με τον αλγόριθμο συμφόρησης που χρησιμοποιεί, το μέγεθος cwnd διαμορφώνεται ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου η οποία είναι ανάλογη της συμφόρησης που έχει η προεπιλεγμένη διαδρομή που ακολουθούν τα πακέτα. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο (κατά τη διαδρομή των πακέτων), το cwnd αναγκάζεται να μειωθεί με αποτέλεσμα οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται συνολικά στο δίκτυο να είναι μικρές και οι χρόνοι απόκρισης του μεγάλοι. Ειδικότερα, η χρήση των δικτύων 5^{ης} γενιάς (mmWave) έχει αυξήσει αρκετά το ανωτέρω φαινόμενο λόγω των ευαισθησιών που παρουσιάζει, με αποτέλεσμα το μέγεθος cwnd να αυξομειώνεται συνεχώς και να μην επιτυγχάνονται οι επιθυμητές ταχύτητες.

Παρατηρούμε ότι λόγω της ύπαρξης μίας προεπιλεγμένης διαδρομής (Single-Path), το cwnd είναι αρκετά εκτεθειμένο στις ανωμαλίες του δικτύου και ανεξάρτητα της υψηλής απόδοσης και των βελτιώσεων που μπορεί να υποστούν οι αλγόριθμοι συμφόρησης πάντα θα υπόκειται σε μειώσεις λόγω συμφόρησης. Ωστόσο, η χρήση της τεχνολογίας MP-TCP (Multi-Path TCP) έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τη συμβατική χρήση του TCP (SPTCP – Single Path TCP) και μπορεί να βελτιώσει αρκετά τη συμπεριφορά του cwnd. Το MP-TCP αποτελεί μία επέκταση του πρωτοκόλλου TCP όπου εγκαθιδρύει μία σύνδεση η οποία χρησιμοποιεί πολλές διαδρομές (multiple paths) μέσω διαφορετικών διεπαφών (interfaces), με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας στο δίκτυο και επιπλέον ύπαρξη εφεδρείας (redundancy). [63]

Αναλυτικότερα, η τεχνολογία MP-TCP διαφοροποιείται από το συμβατικό TCP (SP-TCP), καθώς μπορεί και διαχειρίζεται πολύ ευέλικτα το cwnd. Το MP-TCP χωρίζει τα πακέτα και τα αποστέλλει μέσω διαφορετικών διεπαφών και όχι μέσω μίας προεπιλεγμένης. Οι διεπαφές αυτές που χρησιμοποιούνται για την αποστολή των πακέτων μέσω διαφορετικών διαδρομών (sub flows), ενσωματώνουν διάφορους τύπους επικοινωνιών όπως το Wi-Fi, τις διαφορετικές γενιές κινητής τηλεφωνίας (LTE & mmWave) καθώς και ενσύρματες συνδέσεις (Ethernet). Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί δύο μηχανισμούς όπου στον πρώτο μπορεί για κάθε διαδρομή να αναπτύσσει ένα ανεξάρτητο cwnd (uncoupled), ενώ στο δεύτερο υπάρχει ένα καθολικό cwnd για όλες τις διαδρομές το οποίο λειτουργεί με συντονισμένο τρόπο λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις συμφορές που μπορεί να προκύψουν σε κάθε διαδρομή. Έτσι, με τον διαχωρισμό των πακέτων, το MP-TCP επιτυγχάνει να έχει πάντα ίση ή και καλύτερη απόδοση από το συμβατικό TCP αφού πάντα θα υπάρχουν διαθέσιμες διαδρομές οι οποίες είτε δεν θα παρουσιάζουν συμφόρηση είτε η συμφόρηση που θα παρουσιάζουν θα είναι μικρότερη από αυτή της προεπιλεγμένης διαδρομής. [63], [64]

Μελετώντας πειράματα που εκτελέστηκαν στα [64], [65] συγκρίνοντας το SP-TCP με το MP-TCP συμπεραίνουμε ότι το δεύτερο συνολικά επιτυγχάνει πολύ υψηλότερες ταχύτητες. Αναλυτικότερα, συγκρίνοντας το SP-TCP με χρήση του συμβατικού αλγορίθμου CUBIC με το MP-TCP κάνοντας χρήση δύο δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς (28GHz & 73GHz mmWave), παρατηρούμε ότι το δεύτερο επιτυγχάνει πολύ υψηλότερες ταχύτητες (έως και 40% υψηλότερη) σε συνθήκες όπου η κεραία gNB είναι ορατή από την κινητή συσκευή (LOS). Επίσης, σε μεγαλύτερες αποστάσεις όπου η κεραία gNB μπορεί να μην είναι ορατή από την κινητή συσκευή (NLOS) η τεχνολογία MP-TCP με χρήση διαφορετικών γενεών κινητής τηλεφωνίας (LTE & 28GHz mmWave) επιτυγχάνει πάλι πολύ υψηλότερες ταχύτητες (έως και 100% υψηλότερη), καθώς και μικρότερο χρόνο απόκρισης (latency). Ωστόσο, παρατηρούμε ότι σε μεγάλες αποστάσεις από την κεραία gNB κάνοντας χρήση της τεχνολογίας MP-TCP με δύο δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς (28GHz & 73GHz mmWave), παρατηρήθηκε αισθητή μείωση της απόδοσης της σε ταχύτητα αλλά και χρόνο απόκρισης. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, η τεχνολογία MP-TCP είχε υψηλότερη απόδοση από το συμβατικό SP-TCP.

Συμπερασματικά, αναφέρουμε ότι η τεχνολογία MP-TCP μπορεί να βελτιώσει αισθητά την απόδοση του πρωτοκόλλου TCP στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς (mmWave) και συνδυάζοντας την με άλλα τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών όπως οι ενσύρματες συνδέσεις (Ethernet) ή τα δίκτυα LTE, θα υπάρχει μία αισθητή βελτίωση στην ταχύτητα αποστολής των δεδομένων αλλά και το χρόνο απόκρισης.



Εικόνα 28: Απεικόνιση Λειτουργίας MPTCP [66]

6.2 Χρήση Τεχνικών Μηχανικής Μάθησης (ML)

Η μηχανική μάθηση αποτελεί έναν τομέα ο οποίος προσφέρει λύσεις σε πολλές αδυναμίες ή προβλήματα που έχουν προκύψει στον κόσμο των πληροφοριακών συστημάτων. Οι τεχνικές που διαθέτει μπορούν να προσαρμοστούν σχεδόν σε κάθε πρόβλημα που προκύπτει και για αυτό το λόγο έχουν εκτελεστεί αρκετές μελέτες που αφορούν τη βελτίωση των μηχανισμών του πρωτοκόλλου TCP πάνω στο χιλιοστομετρικό φάσμα (mmWave) των δικτύων 5^{ης} γενιάς. Υπάρχουν τρεις (3) βασικές τεχνικές μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση του TCP, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω και είναι η τεχνική LP-TCP η οποία διαθέτει αλγορίθμους επιβλεπόμενης μάθησης, η RL-TCP η οποία διαθέτει αλγορίθμους ενισχυτικής μάθησης και τέλος η DL-TCP η οποία αποτελείται κυρίως από Νευρωνικά Δίκτυα. Επιπρόσθετα, θα αναλυθούν τρόποι βελτίωσης του πρωτοκόλλου TCP με χρήση Τυχαίων Δασικών Αλγορίθμων (Random Forests).

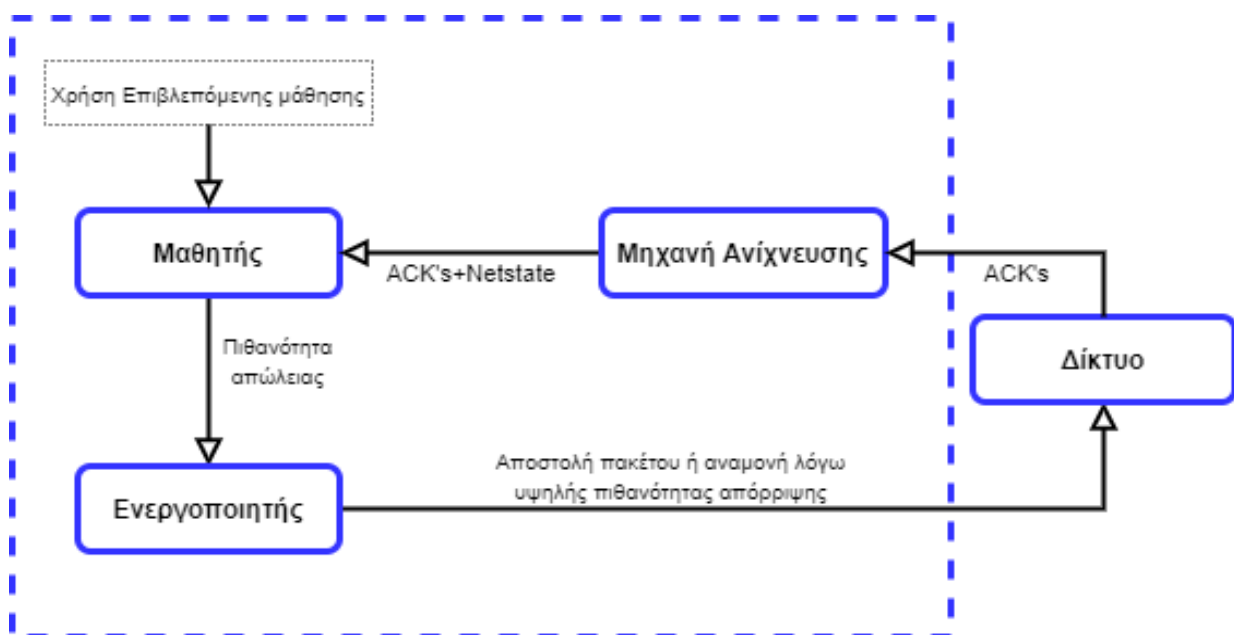
6.2.1 Loss Predictor TCP (LP-TCP)

Το LP-TCP αποτελεί μία μέθοδο η οποία κάνει χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης με σκοπό να προβλέψει τη συμπεριφορά του δικτύου. Εντοπίζει καταστάσεις συμφόρησης ή ανωμαλιών στο δίκτυο, τις οποίες εκμεταλλεύεται με σκοπό να μειώσει τις απώλειες των πακέτων TCP και τη συχνότητα υποδιπλασιασμού του μεγέθους του cwnd. Το LP-TCP κατά βάση χρησιμοποιεί αλγορίθμους και τεχνικές επιβλεπόμενης μάθησης (Supervised Machine Learning), καθώς απαιτεί μηχανισμούς πρόβλεψης, και για αυτό το λόγο πολύ συχνά συνδυάζεται με τα Δέντρα απόφασης, μία κατηγορία αλγορίθμων πολύ απλή και αποτελεσματική. [63]

Το LP-TCP αποτελείται από μία μηχανή ανίχνευσης (sensing engine), ένα μαθητή (learner) και ένα ενεργοποιητή (actuator). Η διαδικασία που ακολουθεί για την αποδοτικότερη χρήση του πρωτοκόλλου TCP είναι η εξής: [67]

- Αρχικά, η μηχανή ανίχνευσης δέχεται από το δίκτυο τις επιβεβαιώσεις αποστολής των πακέτων (ACK's) καθώς και την κατάσταση αυτού, τις οποίες μεταβιβάζει στον μαθητή.
- Ο μαθητής δέχεται το τρέχων μέγεθος του cwnd, τη σειρά του τρέχοντος πακέτου στο cwnd, τον ελάχιστο χρόνο μεταξύ των αφίξεων των ACK's και τον ελάχιστο χρόνο μεταξύ της αποστολής των πακέτων.
- Ακολούθως, ο μαθητής υπολογίζει βάσει των ανωτέρω την πιθανότητα απώλειας του πακέτου και την αποστέλλει στον ενεργοποιητή.
- Τέλος, ο ενεργοποιητής συγκρίνει την πιθανότητα με ένα κατώφλι (threshold) που έχει τεθεί και εάν το ξεπερνάει δεν αποστέλλει το πακέτο στο δίκτυο. Θα το αποστείλει μόνο σε περίπτωση όπου η πιθανότητα απώλειας είναι μικρότερη από το οριζόμενο κατώφλι που έχει τεθεί.

Όπως γίνεται κατανοητό, ο μαθητής ο οποίος επιτελεί την πιο σημαντική λειτουργία στην ανωτέρω μέθοδο, ουσιαστικά προβλέπει την επιτυχή ή ανεπιτυχή αποστολή των πακέτων TCP. Συνεπώς, για τη σωστή και αξιόπιστη πρόβλεψη απαιτείται η χρήση ενός αλγορίθμου επιβλεπόμενης μάθησης πάνω στο μαθητή. Είναι εφικτό να κάνουμε χρήση αρκετών αλγορίθμων επιβλεπόμενης μάθησης όπως τα Δέντρα Απόφασης (Decision Trees) ή τα Τυχαία Δασικά Μοντέλα (Random Forest), τα οποία αποτελούν μία εξέλιξη των δέντρων απόφασης. Για τη συλλογή των δεδομένων εκπαίδευσης μπορούμε να εκτελέσουμε προσομοιώσεις πάνω σε συμβατικούς αλγορίθμους ελέγχου συμφόρησης όπως ο New Reno ή ο CUBIC και να καταγράψουμε την απώλεια των πακέτων καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτών. Για κάθε απώλεια πακέτου μπορούμε να βάζουμε μία ετικέτα – αποτέλεσμα (π.χ. το “1”), ενώ για κάθε επιτυχή αποστολή μία άλλη ετικέτα (π.χ. το “0”). Εφόσον έχουμε συλλέξει μεγάλο όγκο δεδομένων εκπαίδευσης (έχει συλλεχθεί μεγάλος αριθμός απωλειών), μπορούμε να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο πάνω στο μαθητή και ακολούθως σε άγνωστα δεδομένα. Τελικά, ο μαθητής έχοντας τα δεδομένα θα μπορεί να προβλέψει πότε ένα πακέτο θα απορριφθεί ή θα αποσταλεί επιτυχώς. [67]



Εικόνα 29: Μέθοδος LP-TCP [67]

6.2.2 Reinforcement Learning TCP (RL-TCP)

Η μέθοδος LP-TCP με χρήση αλγορίθμων επιβλεπόμενης μάθησης αποτελεί μία πολύ αποτελεσματική και αξιόπιστη λύση σε περιπτώσεις όπου η τοπολογία και οι παράμετροι του δικτύου παραμένουν ίδιες. Παρατηρούμε ωστόσο, ότι εάν αλλάξει η τοπολογία του δικτύου ή κάποια βασική του παράμετρος, απαιτείται εκ νέου εκπαίδευση στον αλγόριθμο μάθησης ούτως ώστε ο μαθητής να μπορεί να εξάγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Συνεπώς, η συνεχής επανεκπαίδευση του αλγορίθμου απαιτεί αρκετούς υπολογιστικούς πόρους και μειώνει την ευελιξία του. Η αδυναμία αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με τη χρήση της ενισχυτικής μάθησης (Reinforcement Learning), αφού οι αλγόριθμοι αυτού του τύπου μηχανικής μάθησης μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα και να προσαρμόζονται στις αλλαγές του δικτύου. [63]

Η μέθοδος RL-TCP αποτελεί μία εξέλιξη του LP-TCP αφού μοιράζεται την ίδια αρχιτεκτονική, αλλά κάνει χρήση αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης με σκοπό να μπορεί να προσαρμόζεται αυτόνομα στις αλλαγές του δικτύου. Συγκεκριμένα, το RL-TCP αποτελείται και αυτό από μία μηχανή ανίχνευσης, ένα μαθητή και ένα ενεργοποιητή, ωστόσο ο μαθητής λαμβάνει επιπλέον ως είσοδο μία τιμή επιβράβευσης “r” από τη μηχανή ανίχνευσης την οποία προωθεί στον ενεργοποιητή. Στην αρχή της TCP σύνδεσης ο ενεργοποιητής αφού δεν έχει δεδομένα εκπαίδευσης, λαμβάνει μία απόφαση βάσει των δεδομένων που διαθέτει και η οποία είναι σχετικά ασφαλής. Εάν η απόφαση που λάβει είναι σωστή δίνεται επιβράβευση, ενώ αν είναι λανθασμένη (π.χ. αποφασίσει να αποσταλεί το πακέτο και τελικά απορριφθεί λόγω συμφόρησης) λαμβάνει ποινή. Ο αλγόριθμος επιδιώκει συνεχώς να αυξάνει τις ανταμοιβές και να μειώνει τις ποινές με σκοπό να μάθει επαρκώς την κατάσταση του δικτύου που λειτουργεί (τοπολογία, παράμετροι κ.α.) και τελικά να εκπαιδευτεί ώστε να αποφασίζει σωστά, περιορίζοντας των αριθμό των απωλειών των πακέτων TCP. [67], [68]

6.2.3 Deep Learning TCP (DL-TCP)

Η βαθιά μάθηση (Deep Learning) αποτελεί έναν πολύ εξελιγμένο τύπο μηχανικής μάθησης, ο οποίος όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιεί κυρίως νευρωνικά δίκτυα και χρησιμοποιείται ευρέως σε πληθώρα σύγχρονων και απαιτητικών εφαρμογών. Η διαλλειπτική λειτουργία που παρουσιάζουν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς στο χιλιοστομετρικό φάσμα (mmWave), σε περιοχές όπου υπάρχουν εμπόδια ή κτήρια, όπου αποτελεί και τη βασική ευαισθησία των εν λόγω δικτύων, απαιτεί νέες, σύγχρονες και αποτελεσματικές μεθόδους. Συνεπώς, έχει δημιουργηθεί μία μέθοδος γνωστή ως DL-TCP (Deep Learning TCP) η οποία βασίζεται κυρίως σε τεχνικές βαθιάς μάθησης και χρησιμοποιεί κατά βάσει βαθιά νευρωνικά δίκτυα (DNN).

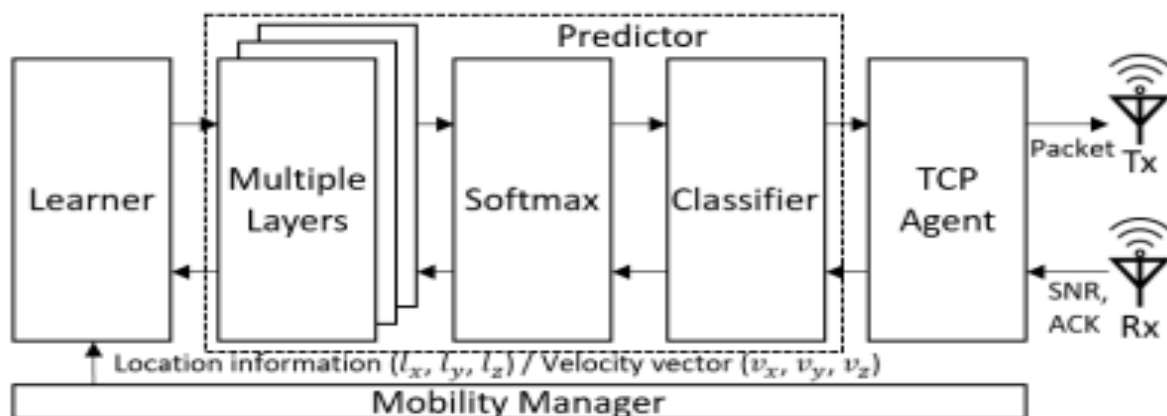
Κύριος στόχος του DL-TCP είναι η κατάλληλη προσαρμογή του μεγέθους $cwnd$ κατά τη διάρκεια αποσυνδέσεων ή ανωμαλιών στο δίκτυο λόγω εμποδίων, αποτρέποντας την επαναφορά του στην αρχική κατάσταση (φάση αργής εκκίνησης – slow start). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνει να κρατάει το μέγεθος του $cwnd$ σε σχετικά

υψηλά επίπεδα χωρίς να επαναφέρεται συνεχώς (λόγω των επαναλαμβανόμενων διακοπών) στην αρχική κατάσταση όπου το μέγεθος είναι μικρό και συνεπώς δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να εκμεταλλευτεί το μεγάλο εύρος ζώνης που παρέχουν τα δίκτυα 5G (mmWave).

Αναλυτικότερα, το DL-TCP χρησιμοποιεί βαθιά νευρωνικά δίκτυα για να επιτελέσει αποδοτικά τη λειτουργία του. Το νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιεί αποτελείται από τέσσερις (4) βασικές παραμέτρους (είσοδοι⁴) οι οποίες είναι: ο SNR (Signal to Noise Ratio) όπου αποτελεί μία μονάδα μέτρησης αξιολόγησης της κατάστασης του δικτύου, ο χρόνος του χρησιμοποιηθέντος SNR, η τοποθεσία που περιλαμβάνει πληροφορίες τοποθεσίας του αποστολέα TCP και τέλος η ταχύτητα η οποία αφορά το ρυθμό αποστολής των πακέτων από τον αποστολέα. Με βάση αυτές τις παραμέτρους χωρίζει τις ανωμαλίες του δικτύου σε τρία (3) βασικά επίπεδα (έξοδοι⁵), τη μακροπρόθεσμη αποτυχία, τη βραχυπρόθεσμη αποτυχία και τη συμφόρηση.

Ακολούθως, το DL-TCP αποτελείται από τέσσερις βασικούς μηχανισμούς οι οποίοι είναι ένας μαθητής (learner), ένας προβλεπτικός παράγοντας (predictor), ένας διαχειριστής κινητικότητας δικτύου (mobility manager) και ένας TCP πράκτορας (agent), οι οποίοι αναλύονται ως εξής:

- **Μαθητής:** Μαθαίνει τη διάρκεια αποσύνδεσης του δικτύου (μακροπρόθεσμη ή βραχυπρόθεσμη) σύμφωνα με τις πληροφορίες που έχει λάβει από το διαχειριστή κινητικότητας και την κεραία gNB.
- **Προβλεπτικός παράγοντας:** Προβλέπει σύμφωνα με τις πληροφορίες που λαμβάνει εάν μία αποσύνδεση του δικτύου θα είναι προσωρινή ή μεγάλη.
- **Διαχειριστής κινητικότητας δικτύου:** Παρέχει τις βασικές πληροφορίες τοποθεσίας του δικτύου καθώς και την ταχύτητα μετάδοσης πακέτων TCP του αποστολέα.
- **Πράκτορας TCP:** Ελέγχει το μέγεθος του cwnd με βάση τις πληροφορίες που συλλέγει από τον προβλεπτικό παράγοντα.



Εικόνα 30: Λειτουργία μεθόδου DL-TCP [69]

⁴ Αποτελούν τις εισόδους στο Deep Neural Network του DL-TCP.

⁵ Αποτελούν τις εξόδους στο Deep Neural Network του DL-TCP.

Με τους ανωτέρω μηχανισμούς και παραμέτρους, το DL-TCP χρησιμοποιεί δύο βασικούς αλγόριθμους. Ο πρώτος αλγόριθμος είναι υπεύθυνος για τη σωστή πρόβλεψη της διάρκειας αποτυχίας του δικτύου, σε περίπτωση απόρριψης πακέτων, την οποία μεταβιβάζει στον προβλεπτικό παράγοντα. Εισάγει τις παραμέτρους στο νευρωνικό δίκτυο και με χρήση κατάλληλων τιμών βάρους προβλέπει τη διάρκεια αποτυχίας του δικτύου, εφόσον υπάρξει απόρριψη πακέτων. Ακολουθώντας, ο δεύτερος αλγόριθμος είναι υπεύθυνος για την κατάλληλη προσαρμογή του cwnd εάν συμβεί απόρριψη πακέτων. Ο δεύτερος αλγόριθμος λαμβάνει από τον πρώτο τη διάρκεια αποτυχίας που θα έχει το δίκτυο (βάσει πρόβλεψης) και ακολουθώντας μέσω του πράκτορα TCP αποφασίζει για το μέγεθος του cwnd. [69]

Αναλυτικότερα, σε περίπτωση όπου ο πράκτορας TCP λάβει από τον προβλεπτικό παράγοντα ότι υπάρχει μακροπρόθεσμη αποσύνδεση του δικτύου (σε μία TCP σύνδεση μεταφράζεται ως RTO), κρατάει σταθερό το μέγεθος του cwnd ενώ καθυστερεί το RTO με χρόνο ίσο T_{RTO} . Σε περίπτωση όπου ο πράκτορας TCP λάβει βραχυπρόθεσμη αποσύνδεση κρατάει πάλι το μέγεθος του cwnd σταθερό, αποστέλλοντας ταυτόχρονα τα πακέτα που έχουν χαθεί. Τέλος, εάν εντοπιστεί συμφόρηση δικτύου ο πράκτορας αρχικοποιεί το μέγεθος του cwnd και εισέρχεται σε σταθερή κατάσταση λειτουργώντας ομαλά. [69]

Συνοπτικά, συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος DL-TCP αποτελεί μία πολύ αποτελεσματική μέθοδο, αφού ανταποκρίνεται στις αδυναμίες που παρουσιάζουν τα δίκτυα 5G (mmWave) και επιτυγχάνει να κρατήσει το μέγεθος του cwnd σε υψηλά επίπεδα. Η συμβατική λειτουργία του πρωτοκόλλου TCP είναι αρκετά ευάλωτη στο χιλιοστομετρικό φάσμα των δικτύων 5^{ης} γενιάς, καθώς σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αποσύνδεση (είτε μικρή είτε μεγάλη) ή συμφόρηση στο δίκτυο, αρχικοποιεί το μέγεθος cwnd, με αποτέλεσμα να μην μπορεί σχεδόν ποτέ να εκμεταλλευτεί την τεράστια ευρυζωνικότητα που παρέχεται. Αντιθέτως, το DL-TCP καταφέρνει και κρατάει το μέγεθος του cwnd σε υψηλά επίπεδα ανεξαρτήτως του χρόνου διάρκειας της αποσύνδεσης του δικτύου.

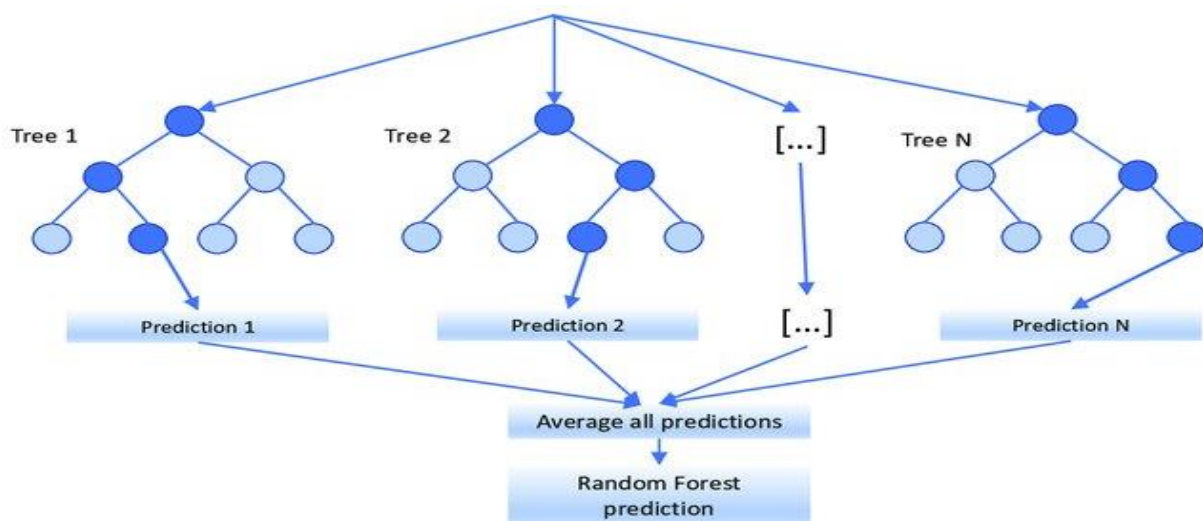
6.2.4 Τυχαία Δασικά Μοντέλα (Random Forests)

Τα τυχαία δασικά μοντέλα γνωστά και ως “Random Forests” αποτελούν πολύ διάσημα αλγοριθμικά μοντέλα για την επίλυση προβλημάτων ταξινόμησης και παλινδρόμησης. Αποτελούν μοντέλα της επιβλεπόμενης μάθησης και δημιουργούν πολλαπλά δέντρα απόφασης ώστε να μπορούν να διαχειριστούν μεγάλο όγκο δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα κάνουν προβλέψεις με υψηλά ποσοστά επιτυχίας. Φυσικά, η χρήση τους εκτελείται επί το πλείστον σε προβλήματα ταξινόμησης όπου κατηγοριοποιούν κάποια γνωστά δεδομένα σε κατάλληλες κατηγορίες με σκοπό να προβλέψουν την κατάσταση άγνωστων δεδομένων. Συνεπώς, τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ αποτελεσματικά σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς (5G), αφού μπορεί να εκτελεστεί ταξινόμηση – κατηγοριοποίηση των διαφορετικών καταστάσεων στις οποίες δύναται να βρεθεί (ύπαρξη εμποδίων, κλιματική αλλαγή κ.α.) και ακολουθώντας αναλόγως της κατάστασης που θα προβλέψει το μοντέλο, το

πρωτόκολλο TCP μπορεί να αλλάξει τον τρόπο λειτουργίας του (αλλαγή του μεγέθους cwnd ή χρήση διαφορετικών αλγορίθμων), με σκοπό την αποδοτικότερη χρήση του. Με αυτό τον τρόπο οι τυχόν ανωμαλίες που παρουσιάζουν τα δίκτυα 5G στο φάσμα mmWave θα αντιμετωπίζονται αποδοτικά με σκοπό την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων (Goodput) και ταυτόχρονα μικρού χρόνου απόκρισης (Latency).

Αναλυτικότερα, μία παράμετρος που μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε με σκοπό να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του δικτύου και ακολούθως να προβλέψουμε την μελλοντική του κατάσταση είναι το είδος των εμποδίων που υπάρχουν. Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα εμπόδια ανάλογα με το μέγεθος τους, αν κινούνται ή όχι (π.χ. λεωφορεία) ή ακόμα και το υλικό τους (π.χ. ανθρώπινο σώμα, τοίχος ή παράθυρο). Συνεπώς, με την πρόβλεψη ότι υπάρχει για παράδειγμα ένα λεωφορείο που δεν κινείται μπορούμε να ελέγχουμε τη συμφόρηση του δικτύου, επανεκπέμποντας τα πακέτα ή/και μειώνοντας τον ρυθμό αποστολής των πακέτων. Ακολούθως, όταν το μοντέλο προβλέψει ότι το λεωφορείο κινείται μπορεί να αυξήσει πάλι το ρυθμό αποστολής των πακέτων. Με τη σωστή κατηγοριοποίηση των καταστάσεων που δύναται να βρεθεί το δίκτυο και την κατάλληλη εκπαίδευση του αλγορίθμου με δεδομένα εκπαίδευσης, το TCP θα λειτουργεί πολύ αποδοτικά αποφεύγοντας συχνές περιπτώσεις συμφόρησης όπου αναγκάζεται να μειώσει το cwnd. [63]

Ακόμα, σε προχωρημένες περιπτώσεις μπορούμε να εισάγουμε στο μοντέλο και την επιλογή διαφορετικών αλγορίθμων ελέγχου συμφόρησης. Έτσι, σε περιπτώσεις όπου το πρωτόκολλο TCP υλοποιεί για παράδειγμα τον TCP HighSpeed, και το Δασικό μοντέλο πραγματοποιήσει πρόβλεψη ότι υφίστανται μεγάλα εμπόδια, το TCP μπορεί άμεσα να εκτελέσει αλλαγή του αλγορίθμου σε κάποιον ποιο σταθερό όπως ο TCP New Reno ή ο CUBIC. Φυσικά, στο δασικό μοντέλο μπορούμε να εισάγουμε και άλλες παραμέτρους όπως το MSS ή το μέγεθος του Buffer. Με αυτό τον τρόπο, αναλόγως την πρόβλεψη που θα πραγματοποιήσει το μοντέλο θα δύναται να αλλάζουν και έτεροι παράμετροι του πρωτοκόλλου TCP με σκοπό την αποδοτικότερη λειτουργία του. Φυσικά, αυτό προϋποθέτει πολύ καλή κατηγοριοποίηση των καταστάσεων στα δέντρα απόφασης του δασικού μοντέλου, ενώ απαιτείται μεγάλος αριθμός δεδομένων εκπαίδευσης με σκοπό την σωστή και ομαλή εκπαίδευση του.



Εικόνα 31: Απεικόνιση τυχαίου δασικού μοντέλου (Random Forest) [70]

6.3 Σύγκριση τεχνικών βελτίωσης μηχανισμών του TCP

Όπως είδαμε στις προηγούμενες υπό ενότητες υπάρχουν αρκετές τεχνικές βελτίωσης των μηχανισμών TCP, οι περισσότερες εκ των οποίων αποτελούν εργαλεία της Μηχανικής Μάθησης (ML). Το σύνολο των τεχνικών στοχεύει στην αντιμετώπιση του προβλημάτων που παρουσιάζουν τα δίκτυα 5G στο χιλιοστομετρικό φάσμα (mmWave). Ωστόσο, είναι απαραίτητο να εξετάσουμε ποια τεχνική αποδίδει περισσότερο, καθώς και σε ποιες περιπτώσεις προτείνεται η χρήση της κάθε μίας τεχνικής. Έτσι, θα εκτελεστούν κάποιες συγκρίσεις οι οποίες αφορούν τις ανωτέρω τεχνικές. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παρακάτω συγκρίσεις και αποτελέσματα αποτελούν μελέτη της παρούσης διπλωματικής εργασίας και συνεπώς ουδεμία σχέση έχουν με κάποια έτερη ερευνητική ή διπλωματική εργασία.

Μελετώντας τις τεχνικές παρατηρούμε ότι ο LP-TCP είναι μία αρκετά αποτελεσματική τεχνική για την αποφυγή συμφόρησης στο δίκτυο. Ωστόσο, δεν διαχειρίζεται τόσο αποτελεσματικά το cwnd αφού απλά εκτελεί πρόβλεψη εάν ένα πακέτο θα αποσταλεί επιτυχώς ή θα απορριφθεί. Με αυτό τον τρόπο το μοντέλο αυτό αποτρέπει από ενδεχόμενη συμφόρηση το δίκτυο αλλά δεν διαχειρίζεται αποτελεσματικά το cwnd με σκοπό την μεγιστοποίηση της απόδοσης του TCP στα δίκτυα 5G (mmWave). Ακόμα, το LP-TCP επηρεάζεται αρκετά και από την τοποθεσία αφού σε περίπτωση αλλαγής περιβάλλοντος πρέπει να εκπαιδευτεί εκ νέου για να μπορεί να εκτελέσει προβλέψεις σε άγνωστα δεδομένα.

Το RL-TCP ωστόσο, ξεπερνάει το πρόβλημα της τοποθεσίας αφού κάνει χρήση αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης, όπου ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται μόνος του χωρίς απαραίτητα τη χρήση δεδομένων εκπαίδευσης. Έτσι, μπορούμε να πούμε συνολικά ότι είναι αποδοτικότερος από τον LP-TCP. Φυσικά, πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η εκπαίδευση ενός αλγόριθμου με γνωστά δεδομένα βελτιώνει αρκετά την λήψη αποφάσεων σε άγνωστα δεδομένα και συνεπώς ο LP-TCP αποτελεί μία αρκετά ασφαλής και αξιόπιστη λύση.

Ακόμα, ο DL-TCP αποτελεί μία αρκετά βελτιωμένη τεχνική για την αύξηση της απόδοσης του TCP στα δίκτυα 5G (mmWave). Ο DL-TCP διαχειρίζεται πολύ αποτελεσματικά το cwnd, αφού μπορεί να προβλέψει τυχόν μακροπρόθεσμη ή βραχυπρόθεσμη αποτυχία στο δίκτυο, καθώς και συμφόρηση. Με σωστές προβλέψεις διαχειρίζεται κατάλληλα το cwnd ώστε να μην μειώνεται συνεχώς το μέγεθος του και συνεπώς η ταχύτητα του δικτύου, αλλά να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Ωστόσο, ο DL-TCP κάνει χρήση Βαθιάς Μάθησης και Νευρωνικών Δικτύων βάθους, τα οποία αποτελούν αρκετά πολύπλοκες μεθόδους οι οποίες απαιτούν αρκετά καλή σχεδίαση καθώς και μεγάλο όγκο δεδομένων εκπαίδευσης.

Η χρήση τυχαίων δασικών μοντέλων (Random Forests), αποτελεί μία αρκετά καινοτόμα και αποτελεσματική λύση καθώς μπορεί να προβλέψει την ύπαρξη εμποδίων και με κατάλληλη κατηγοριοποίηση αυτών να χειριστεί κατάλληλα το cwnd με σκοπό την αποτελεσματική λειτουργία του TCP. Ακόμα, πέρα από το χειρισμό του cwnd μπορεί να διαχειριστεί και έτερες παραμέτρους όπως το MSS, το μέγεθος του RLC Buffer ή τους αλγορίθμους ελέγχου συμφόρησης (CC), και με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα για

ακόμα αποδοτικότερη λειτουργία του TCP. Αναλόγως της κατάστασης του δικτύου θα εφαρμόζει διαφορετικούς συνδυασμούς στις παραμέτρους του TCP, οι οποίες θα έχουν μελετηθεί με σκοπό την αποδοτικότερη λειτουργία του. Δεν ευρέθησαν επίσημες δοκιμές ή πειράματα όπου να πραγματοποιείται αξιολόγηση της απόδοσης των τυχαίων δασικών μοντέλων όσον αφορά το πρωτόκολλο TCP.

Συνολικά, παρατηρούμε ότι όλες οι τεχνικές είναι αρκετά επιβλητικές για την αποδοτικότερη λειτουργία του TCP. Απαιτούνται αρκετές δοκιμές και πειράματα για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Φυσικά, η Βαθιά Μάθηση και η χρήση Νευρωνικών Δικτύων αποτελούν μεθόδους πολλά υποσχόμενες καθώς είναι πολύ ευέλικτες και εξελίσσονται συνεχώς. Τέλος, στον πίνακα (7) εκτελείται μία σύγκριση των τεχνικών που μελετήθηκαν, με κάποιες βασικές παραμέτρους:

	LP-TCP	RL-TCP	DL-TCP	RANDOM FORESTS
Πολυπλοκότητα	ΜΙΚΡΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΓΑΛΗ	ΜΕΓΑΛΗ
Επιρροή από Τοποθεσία	ΜΕΓΑΛΗ	ΜΙΚΡΗ	ΜΙΚΡΗ	ΜΙΚΡΗ
Χρήση δεδομένων εκπαίδευσης	ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ	ΔΕΝ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ	ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ	ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ
Διαχείριση cwnd	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ	ΥΨΗΛΗ	ΥΨΗΛΗ
Διαχείριση έτερων Παραμέτρων TCP	ΔΕΝ ΔΥΝΑΤΑΙ	ΔΕΝ ΔΥΝΑΤΑΙ	ΔΕΝ ΔΥΝΑΤΑΙ	ΔΥΝΑΤΑΙ
Εκτέλεση δοκιμών	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ

Πίνακας 7: Σύγκριση τεχνικών βελτίωσης μηχανισμών TCP⁶

⁶ Τα χρώματα απεικονίζουν τη βαθμολογία σε τρεις διαβαθμίσεις που έχει κάθε τεχνική ανάλογα την παράμετρο (Πράσινο: Υψηλή, Κίτρινο: Μέτρια, Κόκκινο: Χαμηλή)

Βιβλιογραφία

- [1] Vasco Pereira, Tiago Sousa, Paulo Mendes, Edmundo Monteiro, "Evaluation of Mobile Communications: From Voice Calls to Ubiquitous Multimedia Group Communications", in Proc. of the 2nd International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks, HET-NETs'04, Ilkley, West Yorkshire, U.K., July 2004.
- [2] "Cellular Wireless Networks", www.tutorialspoint.com [Online]. Available: https://www.tutorialspoint.com/wireless_communication/wireless_communication_cellular_networks.htm.
- [3] Halonen, Timo, Javier Romero, and Juan Melero, "GSM, GPRS and EDGE performance: evolution towards 3G/UMTS". John Wiley & Sons, 2004.
- [4] "About 3GPP", www.3gpp.org [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/about-us>.
- [5] T. Ojanpera and R. Prasad, "An overview of air interface multiple access for IMT-2000/UMTS," in IEEE Communications Magazine, vol. 36, no. 9, pp. 82-86, 1998.
- [6] Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J., & Beming, P. "3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband." Academic press. 2010.
- [7] Cox, Christopher. "An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications." John Wiley & Sons, 2012.
- [8] "Difference Between OFDM and OFDMA." www.differencebetween.com. [Online]. Available: <https://www.differencebetween.com/difference-between-ofdm-and-vs-ofdma/>
- [9] F. Wang, A. Ghosh, C. Sankaran, P. J. Fleming, F. Hsieh and S. J. Benes, "Mobile WiMAX systems: performance and evolution," in IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 10, pp. 41-49, October 2008.
- [10] "3GPP meets IMT-2020", www.3gpp.org/ [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/3gpp-meets-imt-2020>.
- [11] "ITU towards IMT for 2020 and beyond". www.itu.int/ [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>.
- [12] "5G-PPP". 5g-ppp.eu [Online]. Available: <https://5g-ppp.eu/5g-ppp-phase-1-projects/>.
- [13] "No63, Επικοινωνίες εν Τάχει τεύχος. EETT." www.eett.gr/ [Online]. Available: <https://www.eett.gr/wp-content/uploads/2021/10/63.pdf>.
- [14] "E2E Architecture Overview." forum.huawei.com. [Online]. Available: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/e2e-architecture-overview/thread/554267-100305>.
- [15] "What is RAN (Radio Access Network)? What is CRAN(Centralized-RAN) and DRAN(Distributed-RAN)." www.teppeilog.com/ [Online]. Available: https://teppeilog.com/cran_dran-e/.
- [16] "What is the difference in 5G between Fronthaul, Midhaul and Backhaul." 5gworldpro.com [Online] Available: <https://www.5gworldpro.com/blog/2022/05/15/what-is-difference-in-5g-between-fronthaul-midhaul-and-backhaul/>

- [17] "How Will SDN Change the Future Network." <https://medium.com> [Online]. Available: <https://medium.com/@fiberstoreorenda/how-will-sdn-change-the-future-network-a0bbad6a3f1d>.
- [18] Alcardo Alex Barakabitze, Arslan Ahmad, Rashid Mijumbi, Andrew Hines, "5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges", Computer Networks, Volume 167, 2020.
- [19] S. Wijethilaka and M. Liyanage, "Survey on Network Slicing for Internet of Things Realization in 5G Networks," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 2, pp. 957-994, Secondquarter 2021.
- [20] F. A. Pereira de Figueiredo, "An Overview of Massive MIMO for 5G and 6G," in IEEE Latin America Transactions, vol. 20, no. 6, pp. 931-940, June 2022.
- [21] Kansal, L.; Berra, S.; Mounir, M.; Miglani, R.; Dinis, R.; Rabie, K. Performance Analysis of Massive MIMO-OFDM System Incorporated with Various Transforms for Image Communication in 5G Systems. Electronics 2022, 11, 621.
- [22] "The emergence of 5G mmWave." <https://www.accton.com> [Online]. Available: <https://www.accton.com/Technology-Brief/the-emergence-of-5g-mmwave/>.
- [23] M. S. Sim, Y. -G. Lim, S. H. Park, L. Dai and C. -B. Chae, "Deep Learning-Based mmWave Beam Selection for 5G NR/6G With Sub-6 GHz Channel Information: Algorithms and Prototype Validation," in IEEE Access, vol. 8, pp. 51634-51646, 2020.
- [24] Socolofsky, T. J., and C. J. Kale. "RFC1180: TCP/IP tutorial." ,1991.
- [25] "TCP/IP layers and their functions". <https://linuxhint.com> [Online]. Available: <https://linuxhint.com/tcp-ip-layers-and-functions/>.
- [26] Howser, G. "The OSI Seven Layer Model. In: Computer Networks and the Internet." Springer, Cham. 2020.
- [27] Postel, J., "RFC 791: Internet Protocol." September 1981.
- [28] "IPv4 Packet Format." <https://www.support.huawei.com> [Online]. Available: <https://support.huawei.com/enterprise/fr/doc/EDOC1100112351/dd76ea1f/ipv4-packet-format>.
- [29] Postel, J., "RFC 793: Transmission Control Protocol." September 1981.
- [30] "Πρωτόκολλο Ελέγχου Μεταφοράς". www.el.wikipedia.org [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%81%CF%89%CF%84%CF%8C%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%BB%CE%BF_%CE%95%CE%BB%CE%AD%CE%B3%CF%87%CE%BF%CF%85_%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%AC%CF%82.
- [31] Hsu F-H, Hwang Y-L, Tsai C-Y, Cai W-T, Lee C-H, Chang K. TRAP: A Three-Way Handshake Server for TCP Connection Establishment. Applied Sciences. 2016.
- [32] "TCP flow control and the sliding window." www.ibm.com [Online]. Available: <https://www.ibm.com/docs/en/spectrum-protect/8.1.8?topic=tuning-tcp-flow-control>
- [33] R. Al-Saadi, G. Armitage, J. But and P. Branch, "A Survey of Delay-Based and Hybrid TCP Congestion Control Algorithms," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 4, pp. 3609-3638, Fourthquarter 2019

- [34] Allman, M., Paxson, V., and E. Blanton, "RFC 5681: TCP Congestion Control", September 2009
- [35] "6.3 TCP Congestion Control." book.systemsapproach.org [Online]. Available: <https://book.systemsapproach.org/congestion/tcpcc.html>
- [36] "Explain how TCP controls the congestion in the network using different strategies." www.ques10.com [Online]. Available: <https://www.ques10.com/p/21500/explain-how-tcp-controls-the-congestion-in-the-net>
- [37] M. R. Kanagarathinam et al., "NexGen D-TCP: Next Generation Dynamic TCP Congestion Control Algorithm," in IEEE Access, vol. 8, pp. 164482-164496, 2020.
- [38] Fall, K. and S. Floyd, "Simulation-based Comparisons of Tahoe, Reno and SACK TCP", Computer Communication Review, July 1996.
- [39] "What is TCP New Reno." www.geeksforgeeks.org [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/what-is-tcp-new-reno/>
- [40] W. Hua and G. Jian, "Analysis of TCP BIC Congestion Control Implementation," 2012 International Conference on Computer Science and Service System, Nanjing, China, 2012.
- [41] "BIC TCP". www.en.wikipedia.org [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/BIC_TCP
- [42] Rhee, I., Xu, L., Ha, S., Zimmermann, A., Eggert, L., and R. Scheffenegger, "RFC 8312: CUBIC for Fast Long-Distance Networks", February 2018.
- [43] "TCP (Transmission Control Protocol) Congestion Control." www.noction.org [Online]. Available: <https://www.noction.com/blog/tcp-transmission-control-protocol-congestion-control>.
- [44] Floyd, S., "RFC 3649: HighSpeed TCP for Large Congestion Windows", December 2003.
- [45] Scholz, Dominik, et al. "Towards a deeper understanding of TCP BBR congestion control." 2018 IFIP networking conference (IFIP networking) and workshops. IEEE, 2018.
- [46] G. -H. Kim and Y. -Z. Cho, "Delay-Aware BBR Congestion Control Algorithm for RTT Fairness Improvement," in IEEE Access, vol. 8, pp. 4099-4109, 2020.
- [47] M. Zhang et al., "Will TCP Work in mmWave 5G Cellular Networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 1, pp. 65-71, January 2019.
- [48] R. Poorzare and A. C. Augé, "Challenges on the Way of Implementing TCP Over 5G Networks," in IEEE Access, vol. 8, pp. 176393-176415, 2020.
- [49] "Find out what MTU and MSS are." www.wallarm.com [Online]. Available: <https://www.wallarm.com/what/find-out-what-mtu-and-mss-are>.
- [50] S. Zhang, "An Overview of Network Slicing for 5G," in IEEE Wireless Communications, vol. 26, no. 3, pp. 111-117, June 2019.
- [51] "5G Network Slicing" www.viavisolutions.com [Online]. Available: <https://www.viavisolutions.com/en-us/5g-network-slicing>.
- [52] "Unsupervised Learning" www.ibm.com [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/unsupervised-learning>

- [53] "Supervised Learning" www.ibm.com [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/supervised-learning>
- [54] "Supervised machine learning" www.javatpoint.com [Online]. Available: <https://www.javatpoint.com/supervised-machine-learning>
- [55] "Reinforcement learning" www.developer.ibm.com [Online]. Available: <https://developer.ibm.com/learningpaths/get-started-automated-ai-for-decision-making-api/what-is-automated-ai-for-decision-making/>
- [56] "Reinforcement learning Tutorial" www.javatpoint.com [Online]. Available: <https://www.javatpoint.com/reinforcement-learning>
- [57] "Decision Trees" www.ibm.com [Online]. Available: <https://www.ibm.com/en/topics/decision-trees>
- [58] "Decision Trees" www.philippe-fournier-viger.com [Online]. Available: <https://www.philippe-fournier-viger.com/spmf/ID3.php>
- [59] "What are Neural Networks" www.ibm.com [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/neural-networks>
- [60] "Neural Networks" www.shiksha.com [Online]. Available: <https://www.shiksha.com/online-courses/articles/neural-networks-in-deep-learning/>
- [61] "Training Deep Neural Networks" www.towardsdatascience.com [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/training-deep-neural-networks-9fdb1964b964>
- [62] "Deep Learning" www.ibm.com [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/deep-learning>
- [63] R. Poorzare and A. C. Augé, "Challenges on the Way of Implementing TCP Over 5G Networks," in IEEE Access, vol. 8, pp. 176393-176415, 2020.
- [64] M. Polese, R. Jana and M. Zorzi, "TCP and MP-TCP in 5G mmWave Networks," in IEEE Internet Computing, vol. 21, no. 5, pp. 12-19, 2017.
- [65] C. Lee, J. Jung and J. -M. Chung, "DEFT: Multipath TCP for HighSpeed Low Latency Communications in 5G Networks," in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 20, no. 12, pp. 3311-3323, 1 Dec. 2021.
- [66] "MPTCP and Product Support Overview" www.cisco.com [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/transmission-control-protocol-tcp/116519-technote-mptcp-00.html>
- [67] Yiming Kong, Hui Zang, and Xiaoli Ma. "Improving TCP Congestion Control with Machine Intelligence" in Proceedings of the 2018 Workshop on Network Meets AI & ML (NetAI'18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 2018.
- [68] J. Kaur, M. A. Khan, M. Iftikhar, M. Imran and Q. Emad Ul Haq, "Machine Learning Techniques for 5G and Beyond," in IEEE Access, vol. 9, pp. 23472-23488, 2021.
- [69] W. Na, B. Bae, S. Cho and N. Kim, "DL-TCP: Deep Learning-Based Transmission Control Protocol for Disaster 5G mmWave Networks," in IEEE Access, vol. 7, pp. 145134-145144, 2019.
- [70] Segura, David, Emil J. Khatib, and Raquel Barco. 2022. "Dynamic Packet Duplication for Industrial URLLC" Sensors 22, no. 2: 587.