



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΑΠΟ ΑΚΡΗ ΣΕ ΑΚΡΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΑΝΑΘΕΣΗ
ΠΟΡΩΝ ΓΙΑ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΠΙΓΕΙΑ ΚΑΙ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ 6ης ΓΕΝΙΑΣ»



Του φοιτητή
Μπρατσούδη Χαράλαμπου
Αρ. Μητρώου: 517102

Επιβλέπουσα
Δρ. Αγάπη Μεσοδιακάκη
Έκτακτο Διδακτικό Προσωπικό

29 Σεπτεμβρίου 2023

Τίτλος Δ.Ε.: Από άκρη σε άκρη βέλτιστη ανάθεση πόρων για ενοποιημένα επίγεια και δορυφορικά δίκτυα 6ης γενιάς

Κωδικός Δ.Ε.: 22134

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Χαράλαμπος Μπρατσούδης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Αγάπη Μεσοδιακάκη

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 17-10-2022

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 9-9-2023

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μπρατσούδη Χαράλαμπου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Αυτή η διπλωματική αφιερώνεται σε όλους όσοι πιστεύουν στη δύναμη της εξερεύνησης και της μάθησης. Μπορεί να σηματοδοτεί το τέλος ενός κεφαλαίου, αλλά είναι επίσης η αφετηρία για νέες προκλήσεις και ανακαλύψεις.»

Πρόλογος

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής αποτελεί αντικείμενο πολλών μελετών για την βελτίωση των επόμενων γενεών κινητής τηλεφωνίας. Η επιλογή του είχε ως σκοπό την εμβάθυνση σε ένα θέμα που βρήκα πολύ ενδιαφέρον και που θα μου προσφέρει την ευκαιρία να το εξερευνήσω περισσότερο. Η ιδέα του να ασχοληθώ με τους δορυφόρους και το πως αυτοί μπορούν να βελτιώσουν την καθημερινότητά μας σε συνδυασμό με τα επίγεια δίκτυα μου φάνηκε και ότι ταιριάζει και με τα προσωπικά μου αντικείμενα αρεσκείας που απέκτησα μέσα στην σχολή, τα δίκτυα και τις τηλεπικοινωνίες. Η έρευνα και η ανάλυση που χρειάστηκαν για αυτή την εργασία με βοήθησαν στο να αποκτήσω, ερευνητικές και αναλυτικές δεξιότητες, αντίστοιχα, οι οποίες στο μέλλον ενδέχεται να μου φανούν χρήσιμες σε επαγγελματικό ή ακαδημαϊκό επίπεδο. Επίσης, κατά την εκπόνησή της διπλωματικής βελτιώθηκαν περαιτέρω οι ικανότητες μου στον προγραμματισμό, την οργάνωση και την κριτική σκέψη, αυξάνοντας, έτσι, την απόδοσή μου και την μετέπειτα επαγγελματική μου αξία.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εστιάζει στα δίκτυα επόμενης γενιάς 6G, τα οποία αναμένονται το 2030 και μαζί τους μία πληθώρα νέων τεχνολογιών και δυνατοτήτων. Αρχικά, αναλύονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και οι γενιές τους, ξεκινώντας από το μακρινό 1G μέχρι το τωρινό 5G και η πορεία τους μέσα από τις εξελίξεις όλα αυτά τα χρόνια, ενώ παραθέτονται οι τεχνολογίες κλειδιά και οι δυνατότητες που ενδέχεται να έχει το 6G, με τις προκλήσεις που έρχεται να αντιμετωπίσει. Έπειτα, παρουσιάζεται η σχετική βιβλιογραφική έρευνα άλλων επιστημόνων πάνω στο θέμα που καλείται να αναλύσει η εργασία, παρουσιάζοντας διάφορες λύσεις για το παρόν πρόβλημα. Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με τη βιβλιογραφία, η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά εκτενώς και από κοινού τα προβλήματα της σύνδεσης των χρηστών με τους σταθμούς βάσης, της βέλτιστης κατανομής των πόρων και της δρομολόγησης των δεδομένων στο δίκτυο, με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος και η αποδοχή των χρηστών από το δίκτυο. Για την επιτυχημένη ανάθεση των υπολογιστικών, επικοινωνιακών και αποθηκευτικών πόρων του συστήματος, προτείνεται ένας ευρετικός αλγόριθμος, ο οποίος εισάγεται στο MATLAB για να προσομοιωθεί και να συγκριθεί με τη βιβλιογραφία. Η σύγκριση έδειξε πως ο προτεινόμενος ευρετικός αλγόριθμος παρουσιάζει πολύ καλύτερες επιδόσεις από αυτόν της βιβλιογραφίας, φτάνοντας μέχρι και τα 54% καλύτερη ενεργειακή απόδοση, ενώ εισάγει χαμηλή επιπρόσθετη πολυπλοκότητα στο σύστημα. Τέλος, από την μελέτη των αποτελεσμάτων εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα ενώ προτείνονται κάποιες προσθήκες που μπορούν να βελτιώσουν τον αλγόριθμο σημαντικά στο μέλλον, αλλά και να μειώσουν περαιτέρω την πολυπλοκότητά του.

«End-to-end resource allocation in integrated terrestrial and non-terrestrial 6G networks»

«Charalampos Bratsoudis»

Abstract

This thesis focuses on next generation 6G networks, the deployment of which is expected not earlier than 2030, and which will bring a variety of new technologies and capabilities. First, mobile networks and their generations are analysed, starting from the distant 1G to the current 5G networks and their development throughout the years, while the key 6G technologies as well as the new possibilities they may offer are listed, along with the challenges they may face. Then, the related work is presented on the topic that this paper is called to analyze, presenting various solutions for the present problem. In particular, in contrast to the literature, this thesis provides a thorough joint study of the user association, computational resource allocation and traffic routing problems, with the aim of maximizing the energy efficiency of the network in conjunction with the user acceptance ratio. For the efficient allocation of the system's communication, computational and storage resources, a heuristic algorithm is proposed, which is simulated in MATLAB and compared with the state-of-the-art. The performance evaluation results demonstrated the superiority of the proposed solution compared to the reference approach under different traffic scenarios and simulation parameters. In particular, the proposed solution is shown to achieve up to 54% higher energy efficiency, while introducing low additional complexity to the system. Finally, useful conclusions are drawn, while some aspects requiring further study are analyzed to significantly improve the algorithm performance, and further reduce its complexity.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τους εκπαιδευτικούς μου, τους φίλους και την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη και την έμπνευση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της πορείας. Οι συζητήσεις μας, οι συμβουλές και οι προκλήσεις μας με κράτησαν σε συνεχή αναζήτηση γνώσης και προόδου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων	ix
Κατάλογος Πινάκων	x
Συνομογραφίες	xi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας	1
1.3 Γενιές ασύρματων δικτύων	2
1.3.1 Δίκτυα Πρώτης Μέχρι Τέταρτης Γενιάς (1G - 4G)	3
1.3.2 Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς 5G	6
1.4 Δίκτυα Έκτης Γενιάς 6G	10
1.5 Θέμα και στόχοι παρούσας διπλωματικής εργασίας	12
1.6 Μεθοδολογία	13
1.7 Επίλογος	15
2 Σύγχρονη Βιβλιογραφική Έρευνα και Προσεγγίσεις	17
2.1 Εισαγωγή	17
2.2 Σχετικές Εργασίες και Έρευνες	17
2.2.1 Σχετικές Εργασίες για τα Επίγεια Δίκτυα	18
2.2.2 Σχετικές Εργασίες για τα Δορυφορικά Δίκτυα	18
2.2.3 Σχετικές Εργασίες για τα Ενοποιημένα Δίκτυα	19
2.3 Επίλογος	20
3 Μοντέλο Συστήματος και Πρόβλημα προς Επίλυση	21
3.1 Εισαγωγή	21
3.2 Μοντέλο Συστήματος (System Model)	21
3.2.1 Σηματοθορυβική Σχέση	21
3.2.2 Δορυφορικό τμήμα	23
3.2.3 Power Model Συστήματος	30
3.2.4 Εύρεση Δορυφόρου στην Τροχιά	32
3.3 Πρόβλημα προς Επίλυση και Προτεινόμενος Αλγόριθμος	34
3.4 Επίλογος	35
4 Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση	37
4.1 Εισαγωγή	37
4.2 Περιβάλλον Προσομοίωσης	37
4.3 Αποτελέσματα	40
4.4 Επίλογος	52
5 Συμπεράσματα ή/και Προτάσεις Βελτίωσης	53
5.1 Εισαγωγή	53
5.2 Συμπεράσματα	53
5.3 Κατευθύνσεις για Περαιτέρω Έρευνα	53
5.4 Επίλογος	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	56
Α□ΚΩΔΙΚΑΣ	62

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Η ανεκτίμητη προσφορά του διαδικτύου στο κόσμο.	1
1.2	Η βασική αρχιτεκτονική ενός κυψελωτού δικτύου στις κινητές τηλεφωνίες.	2
1.3	Η αύξηση του όγκου πληροφορίας στις κινητές συσκευές.	3
1.4	Η αύξηση των χρηστών στα δίκτυα κινητής επικοινωνίας.	4
1.5	Το σύστημα μεταγωγής κυκλώματος.	5
1.6	Το σύστημα μεταγωγής πακέτου.	5
1.7	Η απεικόνιση της λειτουργίας του MIMO.	6
1.8	Τα KPIs του 5G σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά, το 4G.	8
1.9	Τα σενάρια χρήσης του 5G σε συνάρτηση με τις προδιαγραφές του.	9
1.10	Η πορεία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας μέχρι το 2030.	10
1.11	Οι μεταβολές στην καθυστέρηση, στην χωρητικότητα και στην κάλυψη συναρτίζει την αύξηση της συχνότητας.	11
1.12	Η επικοινωνία των οχημάτων στο μέλλον της αυτόνομης οδήγησης.	12
1.13	Η επανάσταση του IoE που αναμένεται να έρθει μαζί με το 6G.	13
1.14	Ο σταθμός βάσης επικοινωνεί με τον χρήστη μέσω του RIS, αποφεύγοντας ενδιάμεσα εμπόδια.	14
1.15	Τα σενάρια χρήσης των δορυφορικών επικοινωνιών.	15
3.1	Αναλυτική παρουσίαση του σχεδιαγράμματος του ενοποιημένου δορυφορικού και επίγειου δικτύου στην παρούσα εργασία.	21
3.2	Αναλυτικό σχεδιάγραμμα υπολογισμού απόστασης ενός δορυφόρου από τη Γη.	23
3.3	Τα στοιχεία που απαρτίζουν μία τροχιά και που χρησιμοποιούνται για την εύρεση των δορυφόρων σε αυτήν.	33
3.4	Τα στοιχεία του δορυφόρου HellasSat4 στην μορφή TLE.	34
3.5	Σύγκριση μεταξύ των δύο ειδών κεντρικότητας που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, όπου κόκκινο σημαίνει την αύξηση της κεντρικότητας.	36
4.1	Αναλυτική παρουσίαση της τοποθεσίας των επίγειων και των δορυφορικών σταθμών, όπως αυτά λαμβάνονται στον αλγόριθμο της παρούσας εργασίας.	38
4.2	Ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$ και $1/\lambda=10$	40
4.3	Ο χρόνος εκτέλεσης του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$ και $1/\lambda=10$	41
4.4	Η αποδεκτικότητα των χρηστών του συστήματος ως προς τον αριθμό τους για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$ και $1/\lambda=10$	42
4.5	Η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$	42
4.6	Η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$	43
4.7	Η μέση ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$ και $1/\lambda=10$	44
4.8	Η μέση ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$ και $1/\lambda=10$	45
4.9	Αναλυτική μέση ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$	45
4.10	Αναλυτική μέση ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$	46
4.11	Αναλυτική μέση ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$	46
4.12	Αναλυτική μέση ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$	47
4.13	Ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος για 10 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$	48
4.14	Ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος για 10 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$	48
4.15	Ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος για 40 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$	49

4.16	Ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος για 40 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$	49
4.17	Ποσοστιαία ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος για 10 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$	50
4.18	Ποσοστιαία ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος για 10 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$	51
4.19	Ποσοστιαία ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος για 40 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$	51
4.20	Ποσοστιαία ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος για 40 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$	52

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.	7
2.1	Βιβλιογραφική Έρευνα.	17
4.1	Τα 5 διαφορετικά είδη των SFCs και οι απαιτήσεις του καθενός.	38
4.2	Τα 6 διαφορετικά είδη των VNFs και οι απαιτήσεις του καθενός.	38
4.3	Οι τιμές των δεδομένων της προσομοίωσης.	39

Συνομογραφίες

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
6G	Sixth Generation
AI	Artificial Intelligence
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AN	Access Network
CDMA	Code-Division Multiple Access
CPU	Central Power Unit
CS	Circuit Switch
E2E	End to End
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
eMBB	enhanced Mobile Broadband
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FM	Frequency Modulation
FW	Firewall
Gbps	Giga bit per second
GEO	Geostationary Earth Orbit
gNB	gNodeB
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile communication
HAPS	High Altitude Platform Station
HSPA	High Speed Packet Access
HSPA+	Evolved High-Speed Packet Access
IDPS	Intrusion Detection/Prevention System
IoE	Internet of Everything
IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunication Union
Kbps	Kilo bits per second
KHz	Kilo Hertz
KPI	Key Performance Indicators
LEO	Low Earth Orbit
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
Mbps	Mega bits per second
MEC	Mobile Edge Computing
MEO	Medium Earth Orbit
MHz	Mega Hertz
mMTC	Massive machine type communications
mmWAVE	Millimeter wave
NAT	Network Address Translation
NFV	Network Functions Virtualization

NMT	Nordic Mobile Telephone
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
PS	Packet Switch
QoS	Quality of Service
RB	Resource Block
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces
RL	Reinforcement Learning
SC	Small Cells
SFC	Service Function Chain
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SoA	State of the Art
TDMA	Time Division Multiple Access
THz	Tera Hertz
TM	Traffic Monitor
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
URLLC	Ultra-reliable and low latency communications
VNF	Virtual Network Functions
VOC	Video Optimization Controller
W-CDMA	Wideband-Code Division Multiple Access
WOC	WAN Optimization Controller

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Η πρώτη πετυχημένη τηλεδιάδοση ραδιοκυμάτων έγινε το 1895, όταν ο Μακρόνι, ένας Ιταλός εφευρέτης, κατάφερε να διαδώσει σήματα Μορς σε μία απόσταση 3.2 χιλιομέτρων [1]. Έτσι γεννήθηκε η έννοια των τηλεπικοινωνιών. Οι τηλεπικοινωνίες είναι ένας συνεχώς εξελισσόμενος τομέας που υπάρχει εδώ και αιώνες. Ορίζεται ως η επιστήμη και η τεχνολογία της επικοινωνίας σε απόσταση, συνήθως χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά σήματα. Οι τηλεπικοινωνίες χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση πληροφοριών από το ένα μέρος στο άλλο, συμπεριλαμβανομένων της φωνής, των δεδομένων και βίντεο. Αποτελεί ζωτικό μέρος του σύγχρονου κόσμου και χρησιμοποιείται σχεδόν σε κάθε κλάδο. Η ιστορία των τηλεπικοινωνιών χρονολογείται από την εφεύρεση του τηλέγραφου στις αρχές του 1800 [2]. Αυτή η εφεύρεση έφερε επανάσταση στην επικοινωνία επιτρέποντας στους ανθρώπους να στέλνουν μηνύματα σε μεγάλες αποστάσεις. Από τότε, οι τηλεπικοινωνίες έχουν σημειώσει μεγάλη πρόοδο π.χ. με την εφεύρεση του τηλεφώνου, του ραδιοφώνου και της τηλεόρασης. Η εφεύρεση του Διαδικτύου στα τέλη του 20ου αιώνα είχε τεράστιο αντίκτυπο στις τηλεπικοινωνίες, επιτρέποντας τη μετάδοση δεδομένων και πληροφοριών με πολύ ταχύτερο ρυθμό [3]. Σήμερα, οι τηλεπικοινωνίες χρησιμοποιούνται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Επιτρέπουν τη σύνδεση ανθρώπων από όλο τον κόσμο, δίνοντας τους τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο και να μεταδίδουν δεδομένα, όπως email, έγγραφα και εικόνες. Οι τηλεπικοινωνίες χρησιμοποιούνται επίσης για την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο, το οποίο έχει γίνει βασικό εργαλείο για επιχειρήσεις και ιδιώτες, έχοντας, πλέον, ενσωματωθεί σε διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένων των τραπεζών, της εκπαίδευσης, της κυβέρνησης όπως επίσης στον ιατρικό τομέα, επιτρέποντας στους γιατρούς να διαβουλεύονται μεταξύ τους, να ανταλλάσσουν ιατρικές πληροφορίες ή ακόμα και να κάνουν εξ' αποστάσεως χειρουργεία [4].

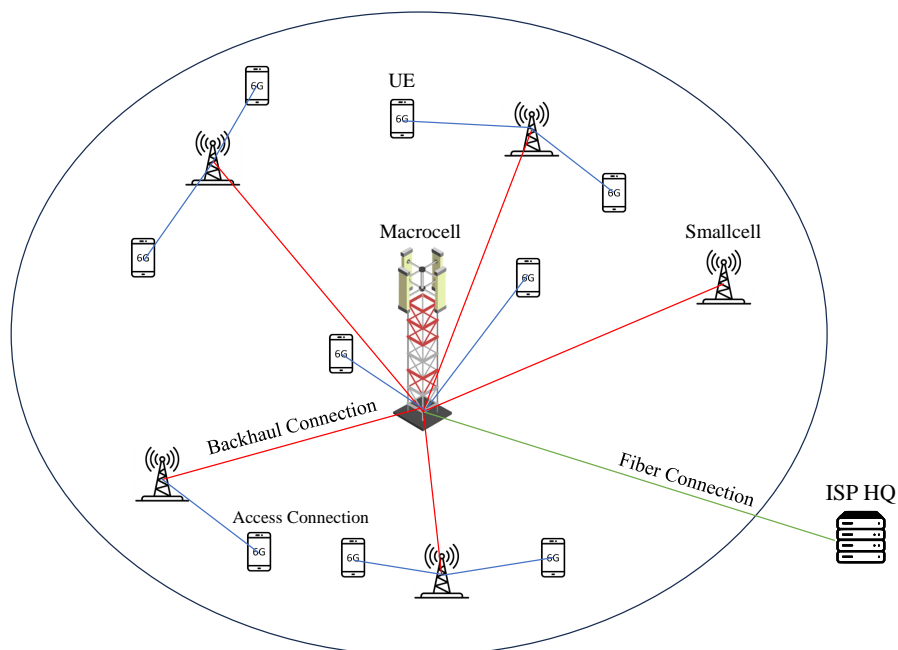


Σχήμα 1.1: Η ανεκτίμητη προσφορά του διαδικτύου στο κόσμο. [5]

1.2 Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας γίνονται όλο και πιο σημαντικά καθώς όλο και περισσότεροι άνθρωποι βασίζονται στις κινητές συσκευές τους για επικοινωνία και ψυχαγωγία. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

μας επιτρέπουν να παραμένουμε συνδεδεμένοι μεταξύ μας, να έχουμε πρόσβαση σε πληροφορίες και να μοιραζόμαστε δεδομένα γρήγορα και με ασφάλεια. Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από μια ποικιλία διαφορετικών στοιχείων, συμπεριλαμβανομένων των σταθμών βάσης, των φορητών συσκευών και του δικτύου κορμού. Ο σταθμός βάσης είναι το κύριο στοιχείο ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας και είναι υπεύθυνος για τη σύνδεση του τελικού χρήστη ή της τελικής συσκευής με το ευρύτερο δίκτυο. Οι κεραίες των σταθμών βάσης χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση και λήψη των σημάτων προς/από τις κινητές συσκευές και συνήθως βρίσκονται σε πύργους ή στέγες. Οι κινητές συσκευές, όπως τα smartphone και τα tablet, είναι οι συσκευές τελικού χρήστη που συνδέονται στο δίκτυο και μας επιτρέπουν να έχουμε πρόσβαση στις διαθέσιμες υπηρεσίες. Το δίκτυο κορμού αποτελεί τον πυρήνα της σύνδεσης των χρηστών αναμεταξύ τους, μιας και είναι αυτό που διαχειρίζεται την κίνηση των δεδομένων από τους χρήστες. Ο πιο κοινός τύπος αρχιτεκτονικής δικτύου κινητής τηλεφωνίας είναι τα κυψελωτά δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούν ραδιοσήματα για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών και χωρίζονται σε διαφορετικές γενιές, με κάθε γενιά να προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες και περισσότερες δυνατότητες, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

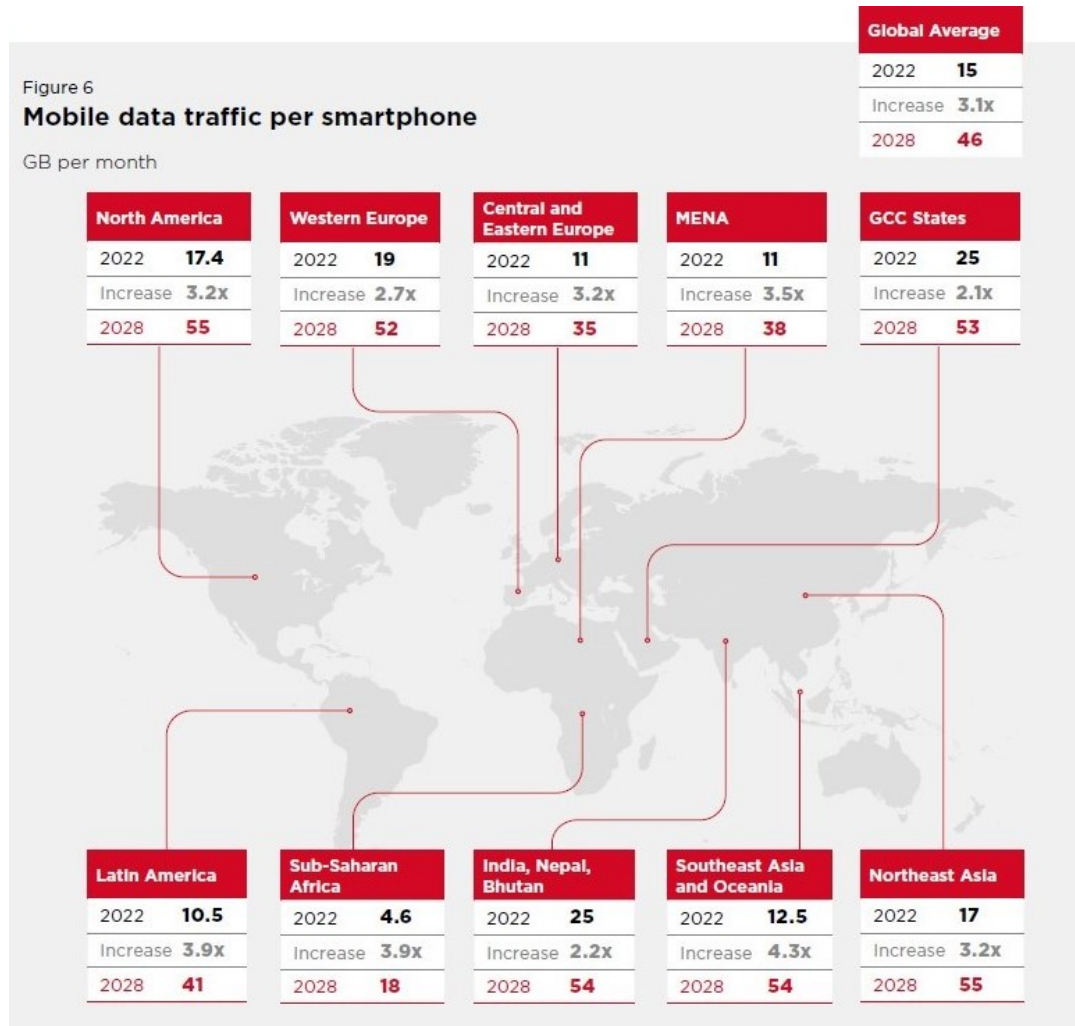


Σχήμα 1.2: Η βασική αρχιτεκτονική ενός κυψελωτού δικτύου στις κινητές τηλεφωνίες.

1.3 Γενιές ασύρματων δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας από την πρώτη εφαρμογή τους μέχρι και σήμερα έχουν εξελιχθεί σε σημαντικό βαθμό. Από αναλογικά μετατράπηκαν σε ψηφιακά, οι δυνατότητές τους πολλαπλασιάστηκαν, εξυπηρετούν πλέον ένα πολύ μεγάλο ποσοστό ανθρώπων στον πλανήτη και η ασφάλεια και η ποιότητα των υπηρεσιών τους αναβαθμίστηκαν σημαντικά. Μέχρι το 2022 η κάθε συσκευή κατανάλωνε περίπου 15 Gb δεδομένων μηνιαίως, ενώ ο όγκος αυτός αναμένεται να τριπλασιαστεί παγκοσμίως και να φτάσει τα 46 Gb ανά συσκευή μέχρι το 2028 (σχήμα 1.3).

Επιπλέον, σύμφωνα με το σχήμα 1.4 παρατηρούμε ότι μέχρι το 2030 οι χρήστες των δικτύων κινητών επικοινωνιών θα αυξηθούν κατά 1.1 δισεκατομμύρια. Αυτή η όλο και μεγαλύτερη αύξηση των ανθρώπων



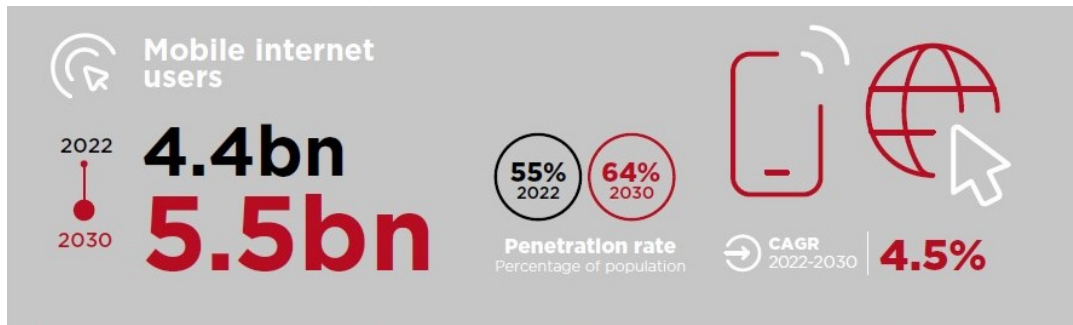
Σχήμα 1.3: Η αύξηση του όγκου πληροφορίας στις κινητές συσκευές. [6]

που χρησιμοποιούν τα ασύρματα δίκτυα έχει οδηγήσει και στην ανάγκη για την όλο και μεγαλύτερη εξέλιξή τους.

1.3.1 Δίκτυα Πρώτης Μέχρι Τέταρτης Γενιάς (1G - 4G)

Η πρώτη γενιά κινητών δικτύων έκανε την εμφάνισή της στο Τόκιο το 1979 από την Nippon Telephone and Telegraph company (NTT) [7]. Χρησιμοποιούσε αναλογικά σήματα, η οποία σαν τεχνολογία ονομαζόταν AMPS (Advanced Mobile Phone System) [8]. Ως τεχνική κωδικοποίησης χρησιμοποιούσε την πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας FM (Frequency Modulation), ενώ για πολλαπλή πρόσβαση χρησιμοποιούσε την πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας FDMA (Frequency Division Multiple Access). Το FDMA επιτρέπει την αποστολή πολλαπλών σημάτων στον ίδιο χώρο στο ίδιο μέσο αλλά σε διαφορετική συχνότητα το καθένα. Λειτουργούσε σε συχνότητες μεταξύ 800 MHz και 900 MHz, με το εύρος ζώνης να φτάνει μέχρι και τα 10 MHz, και κάθε κανάλι να έχει έως 30 KHz εύρος ζώνης. Πρόσφερε ταχύτητα 2.4 kbps ενώ ήταν δυνατή η μετάδοση μόνο φωνητικών σημάτων.

Στην συνέχεια, στην Φινλανδία το 1991 πρωτοκυκλοφόρησε το 2G από την Radiolinja, με την ονομασία GSM (Global System for Mobile communication) [9]. Σε σύγκριση με τον προκάτοχο του, το 2G πέρασε

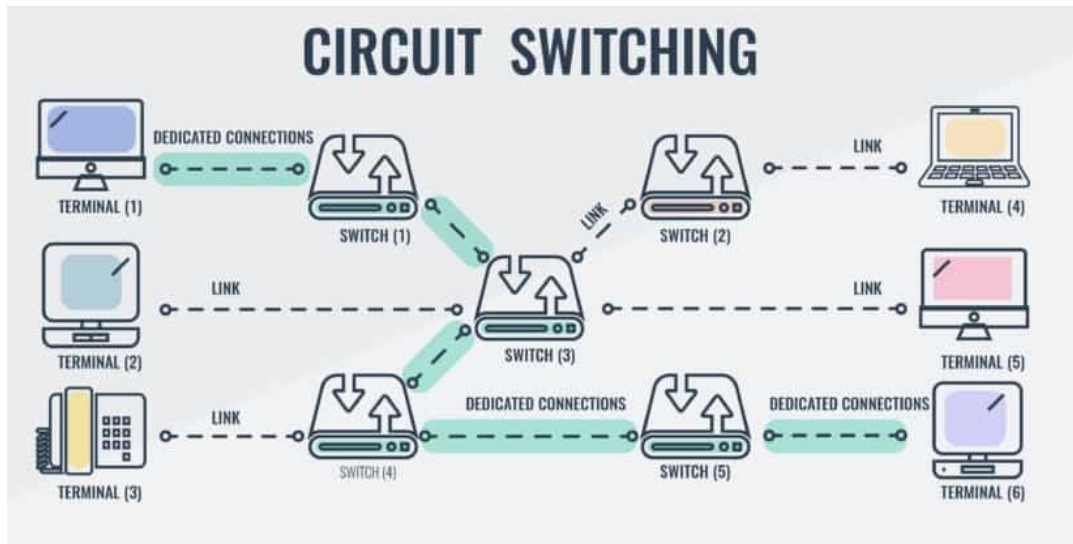


Σχήμα 1.4: Η αύξηση των χρηστών στα δίκτυα κινητής επικοινωνίας. [6]

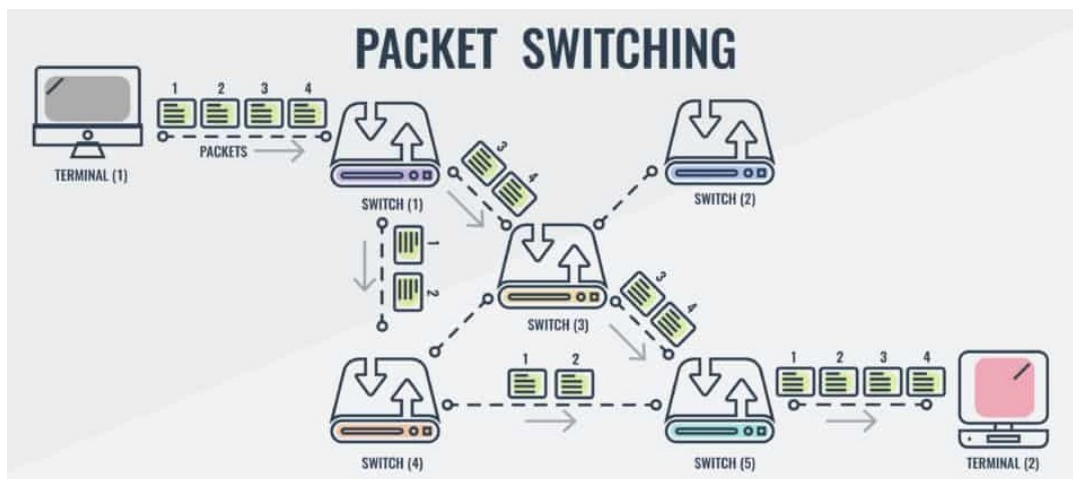
στην ψηφιακή μετάδοση σήματος για πρώτη φορά. Είχε ονομαστικές ταχύτητες μέχρι και 64 kbps, τα οποία ήταν αρκετά για την αποστολή SMS ή e-mail. Για την πολλαπλή πρόσβαση χρησιμοποιούσε τόσο το FDMA, όπως και ο προκάτοχος του, όσο και τη πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου TDMA (Time Division Multiple Access). Στο TDMA, αντίθετα από το FDMA, είναι δυνατή η πολλαπλή πρόσβαση στο ίδιο μέσο χρησιμοποιώντας την ίδια συχνότητα αλλά στέλνοντας σε άλλη χρονική στιγμή (time slot) αφήνοντας παράλληλα ένα κενό ασφαλείας ανάμεσα σε διαδοχικές μεταδόσεις. Για πολυπλεξία χρησιμοποιούσε διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Duplex) και κάθε κανάλι είχε εύρος ζώνης 200 kHz. Επιπλέον, το 2G γνώρισε και δύο βελτιωμένες εκδοχές του, το 2.5G, με την ονομασία GPRS (General Packet Radio Service), και το 2.75G, με την ονομασία EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution) [10]. Το πρώτο είχε μέγιστη θεωρητική ταχύτητα 115 kbps και κυκλοφόρησε το 1999, ενώ το δεύτερο είχε 384 kbps μέγιστη ταχύτητα και κυκλοφόρησε το 2003 [11] [12].

Η μεγάλη αλλαγή που έφεραν αυτές οι νέες γενιές του 2G είναι ότι περάσαμε από την μεταγωγή κυκλώματος (circuit switching) στην μεταγωγή πακέτου (packet switching), που μετέπειτα θα επέτρεπε την ταχύτερη βελτίωση της απόδοσης των κινητών δικτύων. Στην μεταγωγή κυκλώματος το μέσο καταλαμβάνεται εξ ολοκλήρου για την αποκλειστική σύνδεση δύο χρηστών (αναλογική μετάδοση της φωνής), μη επιτρέποντας την χρήση του μέσου από διαφορετικούς χρήστες, και μένει κατειλημμένο όσο οι χρήστες επικοινωνούν. Αντίθετα, στην μεταγωγή πακέτου γίνεται χρήση του ίδιου μέσου από διαφορετικούς χρήστες, με τον καθένα να καταλαμβάνει μέρος του συνολικού εύρους ζώνης (ψηφιακή μετάδοση της φωνής), χάρη στην πακετοποίηση, η οποία επέτρεψε την μετατροπή της αναλογικής φωνής σε μικρότερα ψηφιακά κομμάτια, τα οποία ονομάζονται πακέτα [13].

Έπειτα, το 2001 κυκλοφόρησε η τρίτη γενιά κινητών δικτύων, το 3G με την ονομασία UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [15]. Είχε μέγιστη θεωρητική ταχύτητα τα 2 Mbps, κάτι το οποίο επέτρεψε για πρώτη φορά την περιήγηση στο διαδίκτυο μαζί με όλα τα πλεονεκτήματα των προηγούμενων γενιών. Για πολλαπλή πρόσβαση χρησιμοποιούσε ευρυζωνική πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα W-CDMA (Wideband-Code Division Multiple Access), ενώ το εύρος του καναλιού αυτή τη φορά έφτανε τα 5 MHz. Το CDMA διαφέρει από τα FDMA και TDMA ως προς το ότι λειτουργεί στην ίδια συχνότητα και στον ίδιο χρόνο αλλά τα σήματα ξεχωρίζουν με τη χρήση κωδικών. Προς τα τέλη της δεκαετίας του 2000 παρουσιάστηκαν και δύο νέες εκδοχές του 3G, το 3.5G με την ονομασία HSPA (High Speed Packet Access) και HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access). Η πρώτη εκδοχή είχε μέγιστη ταχύτητα 14 Mbps και παρουσίαζε σημαντικές βελτιώσεις στην διεπαφή αέρα. Η πραγματική εξέλιξη ήρθε όμως με το HSPA+, αφού εκτός από την πλέον μέγιστη ταχύτητα των 42 Mbps, επιτεύχθηκε η χρήση τάξης διαμόρφωσης 64QAM αντί για 16QAM αυξάνοντας τον ρυθμό της πληροφορίας



Σχήμα 1.5: Το σύστημα μεταγωγής κυκλώματος. [14]

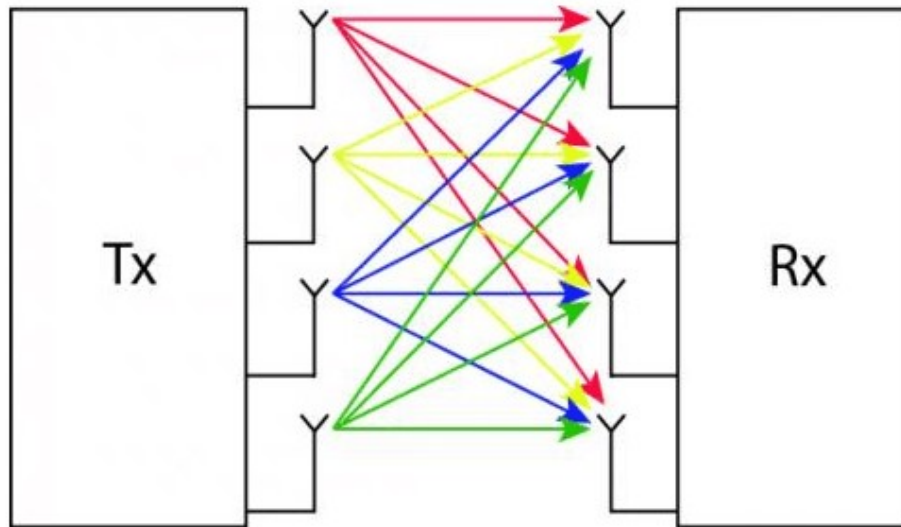


Σχήμα 1.6: Το σύστημα μεταγωγής πακέτου. [14]

κατά 50% και εισήχθηκε για πρώτη φορά η τεχνολογία MIMO (Multiple Input-Multiple Output) [16], ενώ πλέον χρησιμοποιούνται τέσσερα κανάλια των 5 MHz μεγαλώνοντας το συνολικό εύρος ζώνης στα 20 MHz από 5 MHz.

Χάρη στην τεχνολογία MIMO, η κάθε συσκευή μπορεί να υποστηρίξει περισσότερες από μία κεραίες στον πομπό και στο δέκτη με αποτέλεσμα να μπορεί να δέχεται και να εξάγει περισσότερες από μία ροές σημάτων και να συνδέεται με ακόμα περισσότερες συσκευές. Αυτή η σημαντική τεχνολογία έχει αντιμετωπιστεί πολύ θετικά από την επιστημονική κοινότητα λόγω των βασικών της πλεονεκτημάτων και για αυτό έχει γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Σαν τεχνολογία έχει τρία διαφορετικά σενάρια που μπορεί να εκμεταλλευτούν οι δυνατότητές του. Ένα από αυτά τα σενάρια είναι για χωρο-χρονική κωδικοποίηση των συμβόλων εκπομπής στον πομπό, όταν, δηλαδή, λαμβάνεται το ίδιο σήμα στον δέκτη από διαφορετικές κεραίες, το οποίο οδηγεί στην αύξηση του κέρδους διαφορισμού (diversity gain). Διαφορετικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing), το οποίο σημαίνει πως ο δέκτης λαμβάνει διαφορετικά σήματα από διαφορετικές κεραίες και, πιθανόν, διαφορετικούς χρήστες, αυξάνοντας σε αυτήν την περίπτωση το συνολικό ρυθμό μετάδοσης του συστήματος. Ο

τρίτος τρόπος που χρησιμοποιείται αυτή η τεχνολογία είναι στην ουσία ο συνδυασμός των δύο παραπάνω τρόπων, που εξαρτάται σημαντικά από τις συνθήκες και τις δυνατότητες του εκάστοτε καναλιού, μιας και η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι πολύ απαιτητική και για να εφαρμοστεί απαιτεί ένα πολύ ισχυρό κανάλι [17].



Σχήμα 1.7: Η απεικόνιση της λειτουργίας του MIMO. [18]

Τέλος, το 2009 στην Σκανδιναβία χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 4G με την ονομασία LTE (Long Term Evolution). Προσέφερε ταχύτητα 100 Mbps στην κάτω ζεύξη με μέγιστο εύρος καναλιού τα 100 MHz [19]. Σημαντική ήταν και η μείωση στην καθυστέρηση με αποτέλεσμα να υποστηριχθούν πολλές νέες υπηρεσίες για τις κινητές συσκευές, όπως η παρακολούθηση βίντεο ή και ζωντανών μεταδόσεων χωρίς να διακόπτεται η ροή. Όπως και στην τελευταία γενιά του 3G έτσι και στο 4G, γίνεται χρήση τεχνικών MIMO με δύο κεραίες στον πομπό και στον δέκτη, ενώ σημαντική αύξηση είχε και η κινητικότητα χρήστη που μπορούσε να υποστηριχθεί, με ταχύτητες που έφταναν τα 350 χλμ την ώρα. Για πολλαπλή πρόσβαση το 4G χρησιμοποιεί την ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), μία παραλλαγή του FDMA, η οποία επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση του εύρους ζώνης μειώνοντας την απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων των μεταδιδόμενων σημάτων και αυξάνοντας έτσι τη φασματική αποδοτικότητα του συστήματος [20]. Σημαντική προσθήκη αποτέλεσε η εφαρμογή της ποιότητας υπηρεσίας QoS (Quality of Service), η οποία επιτρέπει την διαβάθμιση των πακέτων βάση της σημαντικότητάς τους και την παραχώρηση προτεραιότητας σε αυτά, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη. Το 2013 έγινε εμπορικά διαθέσιμο και το 4G+ ή LTE+ (LTE Advanced) με ονομαστικές ταχύτητες έως και 1 Gbps στην κάτω ζεύξη, και εξίσου βελτιωμένες καθυστερήσεις [21]. Πλέον, το σύστημα MIMO υποστήριζε έως και 8 ταυτόχρονες κεραίες στον πομπό και στον δέκτη, βελτιώνοντας ακόμα περισσότερο τον ρυθμό πληροφορίας, καθιστώντας δυνατές υψηλότερες τάξεις διαμόρφωσης έως και 256QAM [22].

1.3.2 Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς 5G

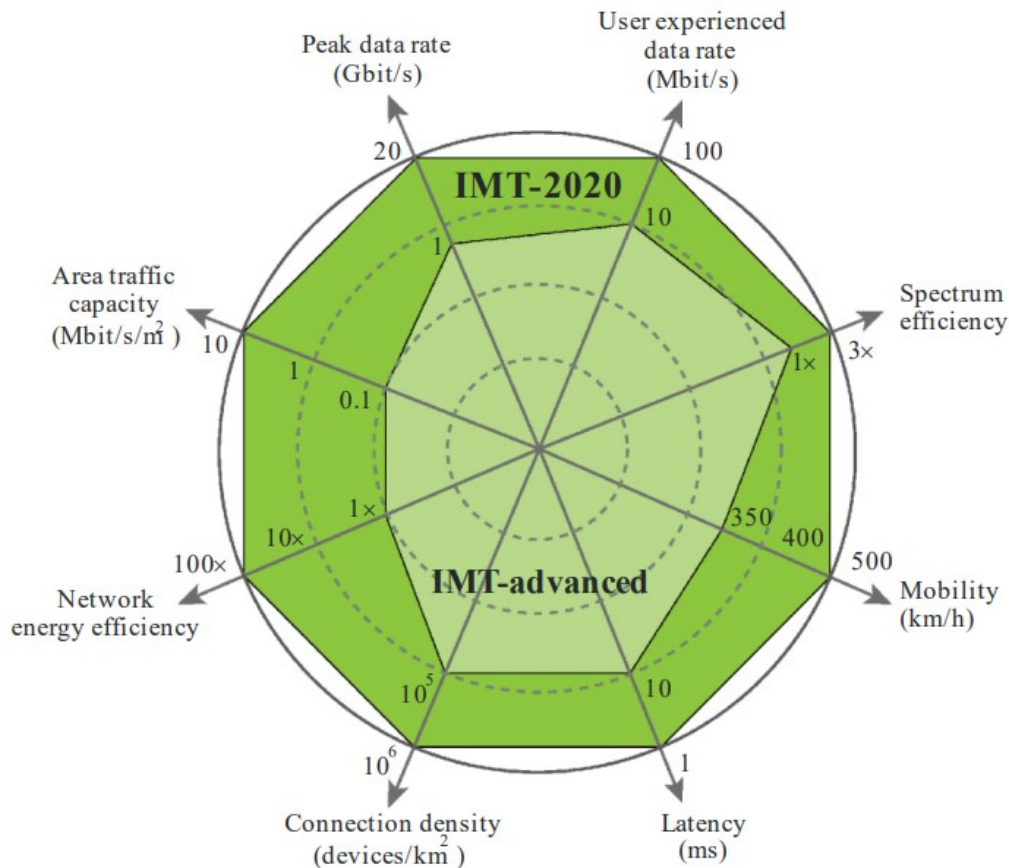
Η πέμπτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας, ευρέως γνωστή και ως 5G [23], ξεκίνησε να έχει παγκοσμίως εμπορική εφαρμογή το 2019, ενώ στην Ελλάδα για πρώτη φορά ήρθε το 2018 στην πόλη των

	1G	2G	3G	4G	5G	6G
Χρονολογία	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s	2030s
Προδιαγραφές	AMPS, NMT, TACS	GSM, GPRS, EDGE	UMTS, HSPA, HSPA+	LTE, LTE+	NR	N/A
Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	OFDMA, SC-FDMA	OFDMA	NOMA, OTFS
Μέθοδοι Πολυπλεξίας	FDD	FDD	FDD,TDD	FDD,TDD	FDD,TDD	N/A
Τεχνικές Μεταγωγής	CS	CS, PS	CS, PS	PS	PS	PS
Μέγιστη Ρυθμαπόδοση	2.4 Kbps	384 Kbps	30, 84, 168 Mbps	1 Gbps	20 Gbps	1 Tbps
Μέγιστη Ρυθμαπόδοση Χρήστη	N/A	N/A	N/A	up to 90 Mbps	up to 100 Mbps	up to 1 Gbps
Συχνότητα	800-900 MHz	850-1900 MHz	1.6-2.5 GHz	2-8 GHz	3-300 GHz	THz Bands
Εύρος Ζώνης Καναλιού	30 KHz	200 KHz	5 MHz	20, 40, 100 MHz	400 MHz, 1 GHz	N/A
Κωδικοποίηση	N/A	GMSK, 8PSK	8PSK, 16QAM, 64QAM	up to 256 QAM	up to 256 QAM	up to 1024 QAM
MIMO	N/A	N/A	2x2	8x8	N/A	N/A
Υποστήριξη Μέγιστης Ταχύτητας Χρήστη	N/A	N/A	N/A	350 km/h	500 km/h	1000 km/h
E2E Καθυστερήση	N/A	N/A	N/A	50 ms	1 ms	«1ms
Αξιοπιστία	N/A	N/A	N/A	99.99 %	99.999 %	99.99999 %

Πίνακας 1.1: Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Τρικάλων [24]. Η τεχνολογία του 5G αποτελεί μια εξέλιξη των προηγούμενων γενιών ασύρματων δικτύων, με την υπόσχεση να προσφέρει υπεργρήγορες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, υψηλή ευαισθησία στη συνδεσιμότητα και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση. Αυτές οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του 5G ανοίγουν τον δρόμο για νέες εφαρμογές, όπως την πραγματοποίηση επικοινωνιών πραγματικού χρόνου σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως οι έξυπνες πόλεις και τα αυτόνομα οχήματα. Ωστόσο, η επιτυχία

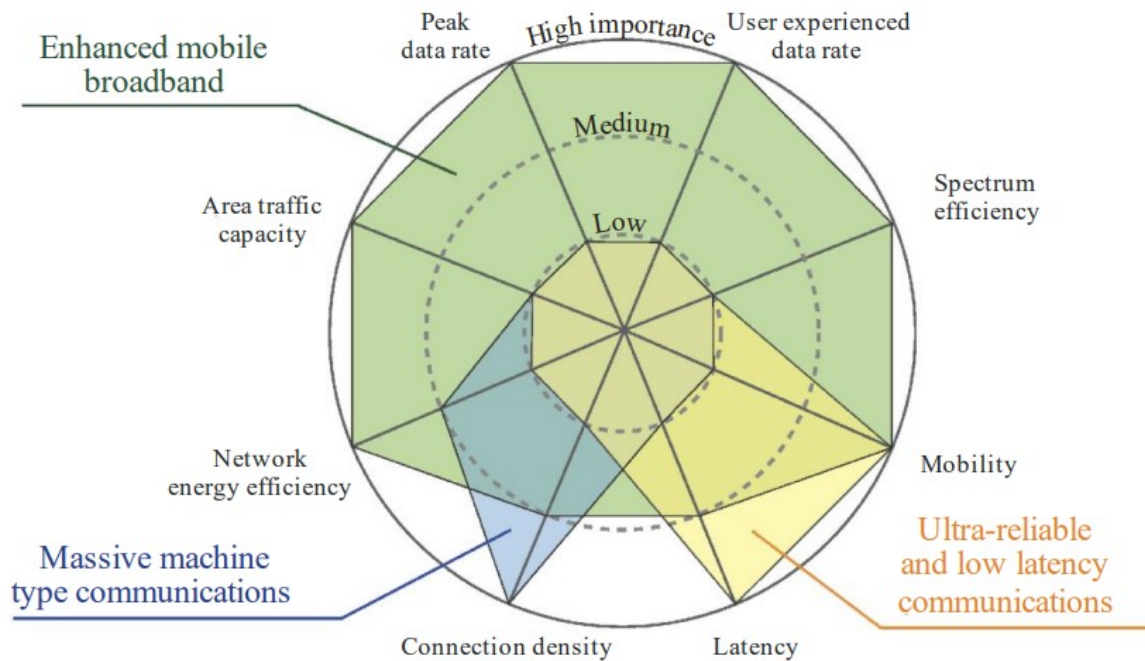
της τεχνολογίας του 5G επιβάλλει επίσης την αντιμετώπιση προκλήσεων σχετικά με την ασφάλεια των δεδομένων, τη διαχείριση του μεγάλου όγκου πληροφορίας και τη βιωσιμότητα του δικτύου. Στο σχήμα 1.10 παρατηρούμε την συνεχόμενη εξέλιξη του 5G, το οποίο μέχρι και το 2030 θα αποτελεί τη βασική γενιά ασύρματων δικτύων με τουλάχιστον 5 δισεκατομμύρια συνδέσεις και καταλαμβάνοντας πάνω από το 50% των συνολικών συνδέσεων παγκοσμίως.



Σχήμα 1.8: Τα KPIs του 5G σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά, το 4G. [25]

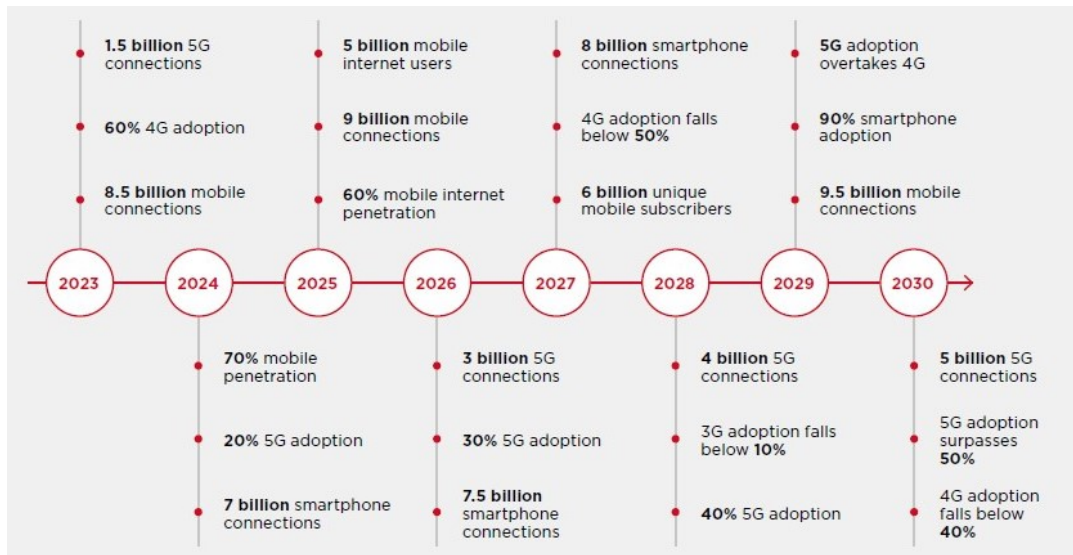
Σύμφωνα με την ITU-R [25], το 5G θα έχει τρία βασικά σενάρια χρήσης. Το πρώτο σενάριο χρήσης είναι για βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση για κινητές συσκευές (enhanced Mobile Broadband-eMBB) [26]. Αυτό αναφέρεται στην ικανότητα των δικτύων 5G να παρέχουν σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και βελτιωμένη χωρητικότητα δικτύου σε σύγκριση με προηγούμενες γενιές ασύρματης τεχνολογίας, όπως το 4G. Ο πρωταρχικός στόχος του eMBB είναι να προσφέρει μια βελτιωμένη εμπειρία χρήστη για κινητές ευρυζωνικές εφαρμογές, επιτρέποντας στους χρήστες να στέλνουν και να λαμβάνουν μεγάλο όγκο δεδομένων με πολύ πιο γρήγορες ταχύτητες. Το δεύτερο σενάριο είναι για εξαιρετικά αξιόπιστες και με χαμηλές καθυστερήσεις εφαρμογές (Ultra-reliable and low latency communications-URLLC) [27]. Αυτό το σενάριο βασίζεται σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά αξιόπιστες υπηρεσίες επικοινωνίας. Το URLLC εστιάζει στην παροχή ενός συνεχούς και προβλέψιμου επιπέδου υπηρεσιών για κρίσιμες εφαρμογές που απαιτούν στιγμιαίους χρόνους απόκρισης και ελάχιστη καθυστέρηση. Το τρίτο, και τελευταίο, σενάριο είναι για μαζικές επικοινωνίες ανάμεσα στις συσκευές (Massive machine type communications-mMTC) [28]. Αυτό εστιάζει στην ενεργοποίηση της συνδεσιμότητας ενός τεράστιου αριθμού συσκευών IoT χαμηλής κατανάλωσης και χαμηλού κόστους. Το mMTC έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει διάφορες εφαρμογές που περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό συσκευών, όπως έξυπνες

πόλεις, έξυπνη γεωργία, παρακολούθηση περιβάλλοντος και πολλά άλλα. Παρέχει μια επεκτάσιμη και αποτελεσματική λύση για τη σύνδεση μιας τεράστιας σειράς συσκευών IoT, καθιστώντας δυνατή τη συλλογή δεδομένων από διάφορες πηγές και τη χρήση τους για εφαρμογές όπως η προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance) [29], η περιβαλλοντική παρακολούθηση και η βελτιστοποίηση των υποδομών.



Σχήμα 1.9: Τα σενάρια χρήσης του 5G σε συνάρτηση με τις προδιαγραφές του. [25]

Σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές το 5G παρουσιάζει σημαντικές βελτιώσεις και αλλαγές ως προς τη λειτουργία του. Μία από αυτές τις αλλαγές αφορά στην χρήση υψηλών ζωνών συχνοτήτων όπως τα κύματα χιλιοστόμετρου mmWave (30-300 GHz), με κάθε φέρον να μπορεί να έχει συνολικό εύρος ζώνης μέχρι και 1 GHz [30]. Οι μεγαλύτερες συχνότητες επιτρέπουν την επίτευξη μεγαλύτερων ταχυτήτων σε σχέση με τις μικρότερες, εις βάρος της διαπεραστικότητας του σήματος και της μείωσης της ανθεκτικότητας του στα καιρικά φαινόμενα. Έτσι, το σήμα επηρεάζεται πολύ περισσότερο από πιθανά εμπόδια, όπως ένα δέντρο ή ένα τοίχο, ενώ οι ατμοσφαιρικές απώλειες αυξάνονται σημαντικά [31]. Μία ακόμα ριζική αλλαγή που φέρνει το 5G είναι η μαζική χρήση κεραιών στο πομπό και στο δέκτη (massive MIMO). Σύμφωνα με το [32], η τεχνολογία massive MIMO προϋποθέτει την ύπαρξη από 96 έως 128 κεραιές σε ένα σταθμό βάσης για εκπομπή και λήψη, αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τεχνολογία αυτή ξεκίνησε από το 3G, παρέχοντας αρχικά τη δυνατότητα για έως και 2 κεραιές στον πομπό και στον δέκτη, αντίστοιχα [33]. Η εντυπωσιακή αυτή αύξηση των κεραιών οφείλεται στο μέγεθος των κεραιών το οποίο είναι εμφανώς μικρότερο στις μεγαλύτερες συχνότητες που χρησιμοποιούνται στο 5G. Από την άλλη μεριά, για να αντισταθμιστούν οι προαναφερθείσες απώλειες των υψηλότερων συχνοτήτων, αναμένεται ο πολλαπλασιασμός των σταθμών βάσης μικρότερης εμβέλειας, γνωστοί και ως small cells (SC). Αυτό κρίνεται αναγκαίο, κυρίως, στις αστικές περιοχές, όπου ο πληθυσμός είναι πολύ πιο πυκνοκατοικημένος και η ζήτηση για δεδομένα είναι μεγαλύτερη. Αυτό, μάλιστα, θα επιτρέψει και την καλύτερη ανάθεση του φόρτου εργασίας ανάμεσα στους σταθμούς βάσης, με αποτέλεσμα η συνολική κατανάλωση ενέργειας να παραμένει σε φυσιολογικά επίπεδα.

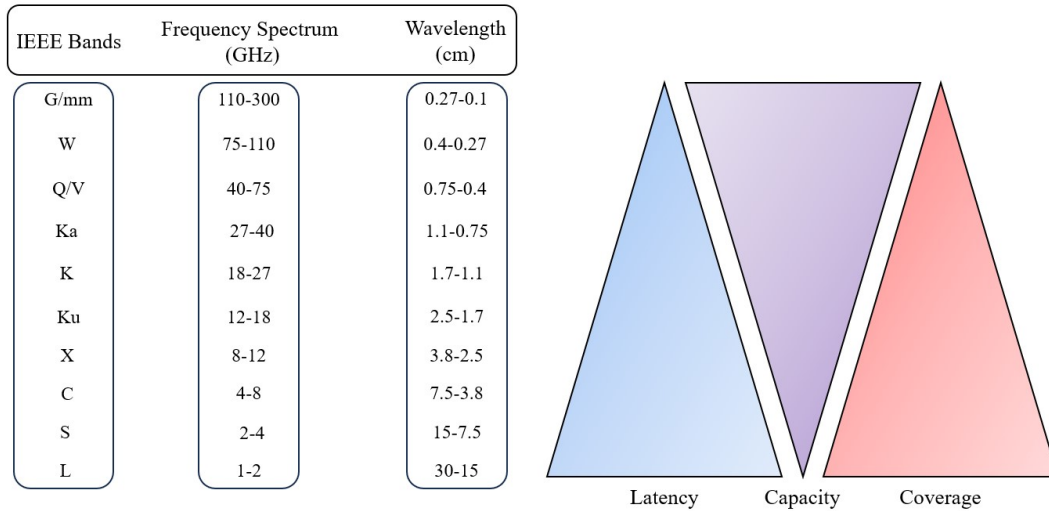


Σχήμα 1.10: Η πορεία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας μέχρι το 2030. [6]

1.4 Δίκτυα Έκτης Γενιάς 6G

Αν και η υλοποίηση των δικτύων 6ης γενιάς (6G) δεν αναμένεται νωρίτερα από το 2030, οι έρευνες σε παγκόσμιο επίπεδο στρέφονται προς αυτό. Η νέα αυτή γενιά υπόσχεται πολλά για το μέλλον, προτρέποντας έτσι και την σκέψη σε νέες τεχνολογίες και εφευρέσεις που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν με τις δυνατότητες της νέας αυτής γενιάς. Αναφορικά, κάποιοι στόχοι του 6G περιλαμβάνουν την είσοδο της εικονικής και της επαυξημένης πραγματικότητας στην καθημερινότητα των ανθρώπων, χωρίς καθυστερήσεις, την αναβάθμιση της εξ αποστάσεως επικοινωνίας μεταξύ των ανθρώπων μέσω ολογραμμάτων [34], και τη μετατροπή του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things-IoT) σε μαζικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Massive IoT) ή αλλιώς Διαδίκτυο των Πάντων (Internet of Everything-IoE) [35]. Ένα από τα σημαντικά προτερήματα όμως του 6G, έναντι των προηγούμενων γενιών, είναι η συζευγμένη χρήση επίγειων, εναέριων και δορυφορικών δικτύων. Χάρη σε αυτά, θα υπάρχει καλύτερη υποστήριξη στους ήδη υπάρχοντες επίγειους σταθμούς βάσης στις πυκνοκατοικημένες περιοχές παρέχοντας ένα αξιόπιστο μη επίγειο backhaul δίκτυο, παγκόσμια κάλυψη, ακόμα και σε δύσβατες ή αγροτικές περιοχές που στερούνται μερικώς ή και παντελώς αξιόπιστων υποδομών τηλεπικοινωνιακών δικτύων, ενώ παράλληλα θα βελτιώσει σημαντικά τις θαλάσσιες επικοινωνίες [36]. Στο σύνολό του, το 6G υπόσχεται να ξεπεράσει κατά πολύ τον προκάτοχό του, υποστηρίζοντας νέες τεχνολογίες/υπηρεσίες και συμβάλλοντας ενεργά στην εξέλιξη και την βελτίωση της καθημερινότητάς μας.

Μία από τις νέες τεχνολογίες είναι, όπως προαναφέρθηκε, η επικοινωνία μέσω ολογραμμάτων. Η τεχνολογία αυτή είναι πολύ απαιτητική σε ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και στις χρονοκαθυστερήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι, στην πραγματικότητα ένα ολόγραμμα απαρτίζεται από πολλές τρισδιάστατες εικόνες που συνθέτουν μία μεγάλη τρισδιάστατη εικόνα, π.χ. ενός ανθρώπου. Επιπλέον, λόγω της επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο, θα πρέπει οι αλλαγές στην εικόνα αυτή να είναι ακαριαίες, που σημαίνει ότι, για το συνολικό μέγεθος ενός ανθρώπου χρειάζονται τουλάχιστον 4 Tbps [37]. Ένα άλλο σενάριο χρήσης είναι οι εφαρμογές που απαιτούν χρονική ακρίβεια και την ελάχιστη δυνατή χρονοκαθυστερήση. Τέτοιες εφαρμογές είναι για παράδειγμα, στην ιατρική, οι εξ αποστάσεως επεμβάσεις, οι οποίες θα πρέπει να προσφέρουν άμεση εικόνα της κατάστασης στον χειρουργό και επιπλέον, να μεταφέρουν τις

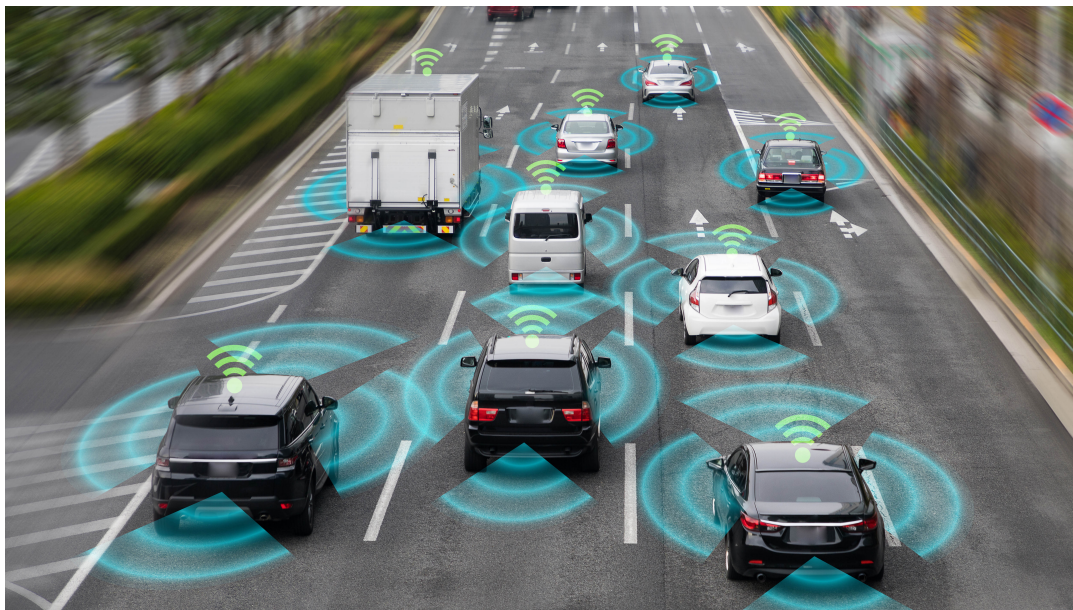


Σχήμα 1.11: Οι μεταβολές στην καθυστέρηση, στην χωρητικότητα και στην κάλυψη συναρτίζει την αύξηση της συχνότητας.

εντολές για τις κινήσεις των εργαλείων του με απόλυτη ακρίβεια και μηδενική καθυστέρηση. Δύο ακόμα παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι στις βιομηχανίες η αυτοματοποίηση, η οποία θα πρέπει να λειτουργεί χωρίς διακοπές και με ταυτόχρονη επικοινωνία μεταξύ των μηχανών τόσο μεταξύ τους όσο και με αυτούς που επιτηρούν την ομαλή λειτουργία τους, και στην καθημερινότητά μας η αυτόνομη οδήγηση που γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής.

Σχετικά με την αυτόνομη οδήγηση, αυτό που θέλουμε να επιτύχουμε είναι τα οχήματα, ανεξαρτήτου μάρκας, να έχουν επικοινωνία μεταξύ τους, δηλαδή να μοιράζονται τα δεδομένα από τους αισθητήρες τους και την τοποθεσία τους με τα υπόλοιπα γειτονικά οχήματα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μειωθούν σημαντικά τα τροχαία δυστυχήματα, μιας και όλα τα οχήματα θα γνωρίζουν τα δεδομένα από κάθε όχημα στο σημείο εκείνο όπως την ταχύτητά του και την κατάστασή του και, επιπλέον, θα υπάρξει καλύτερη διαχείριση στην κυκλοφοριακή συμφόρηση, αφού το κάθε σύστημα θα ειδοποιεί τους οδηγούς για την κυκλοφοριακή κατάσταση σε κάθε σημείο σε ζωντανό χρόνο, πράγμα το οποίο θα βοηθήσει πολύ, ειδικά στις μεγάλες πόλεις, όπου παρατηρείται έντονα αυτό το φαινόμενο. Ένα ακόμα σενάριο χρήσης για το 6G είναι τα κιάσκια-τοπικοί σταθμοί βάσης, οι οποίοι θα μπορούν να έχουν ταχύτητες έως και 1 Tbps, χάρη στις πολύ υψηλές συχνότητες, τα mmWave (όπως αναφέραμε πριν, mmWave ονομάζονται οι συχνότητες 30-300 GHz). Αυτού του είδους οι τοπικοί σταθμοί θα μπορούν να λειτουργήσουν σαν σταθμοί βάσης για τους ίδιους τους χρήστες σε πολυπληθή σημεία, όπως είναι το μετρό, τα λιμάνια και τα αεροδρόμια, αλλά και ως backhaul δίκτυα, βοηθώντας στην κίνηση των δεδομένων. [38].

Παρατηρείται, επίσης, μία συνεχώς ανοδική τάση των IoT συσκευών, στην κατηγορία των οποίων ανήκουν συσκευές όπως είναι οι διάφοροι αισθητήρες για μέτρηση βάρους, θερμότητας, κάποιων ιχνοστοιχείων του εδάφους (στον τομέα της γεωργίας) κ.α., και έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν στο διαδίκτυο. Μέχρι το 2028 αναμένεται να έχουμε 34,7 δισεκατομμύρια συσκευές IoT σε σύγκριση με το 2022 που είχαμε μόλις 13,2 δισεκατομμύρια [40]. Αυτή η τεράστια αύξηση θα οδηγήσει και σε μία τεράστια αύξηση κίνησης δεδομένων, που ακόμα και με τα σημερινά δεδομένα τεχνολογιών δεν θα μπορεί να εξυπηρετηθεί. Έτσι, το 6G αναμένεται να προσφέρει ταχύτητες τουλάχιστον 1 Tbps, με την εμπειρία του χρήστη



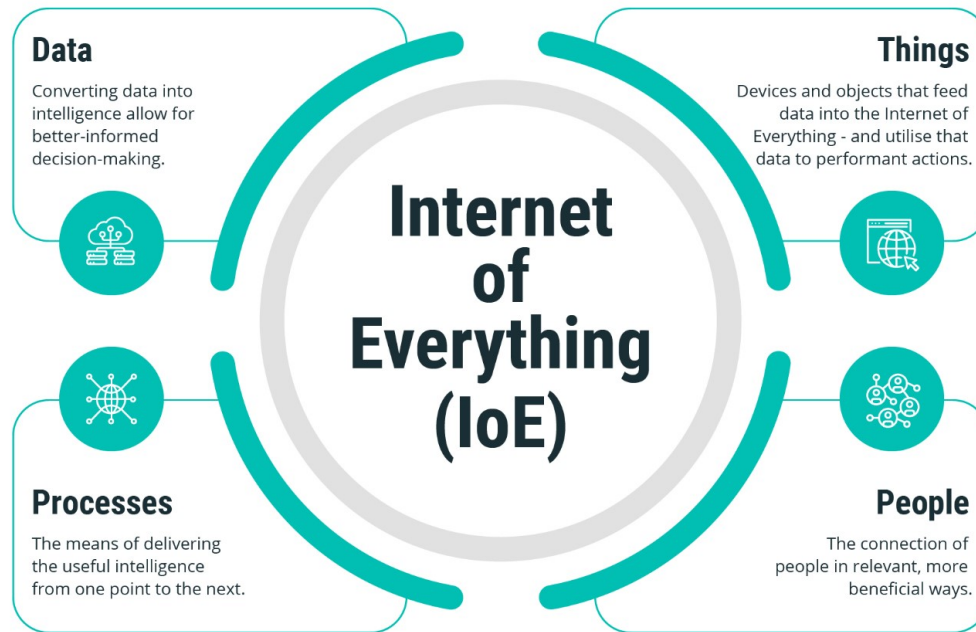
Σχήμα 1.12: Η επικοινωνία των οχημάτων στο μέλλον της αυτόνομης οδήγησης. [39]

να μπορεί να φτάσει μέχρι και το 1 Gbps [41]. Επίσης, αναμένεται να μπορεί να καλύψει και χρήστες που κινούνται και έως με 1000 χλμ/ώρα, ανοίγοντας έτσι νέους ορίζοντες για τις επικοινωνίες των αεροσκαφών, επιβατικών και μη. Σημαντική προσθήκη όμως στο 6G είναι οι υπερύψηλες συχνότητες που θα φτάνουν μέχρι και τις ζώνες συχνοτήτων THz, κάνοντας εφικτή την επίτευξη των προαναφερθέντων ταχυτήτων. Ωστόσο, λόγω των μεγαλύτερων ατμοσφαιρικών απωλειών σε τέτοιες συχνότητες, αναμένεται η χρήση τους κυρίως στις εναέριες και δορυφορικές επικοινωνίες, στις οποίες η ατμόσφαιρα επηρεάζει ένα ελάχιστο μέρος της διαδρομής και, επιπλέον, χρησιμοποιείται η διαμόρφωση δέσμης (γνωστή και ως beamforming), αντισταθμίζοντας σε ένα σημαντικό βαθμό τις απώλειες αυτές.

Σχετικά με το επίγειο κομμάτι, μία από τις τεχνολογίες κλειδιά του 6G αναμένεται να είναι οι επαναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces-RIS) [43]. Αυτού του είδους οι επιφάνειες θα έχουν εφαρμογή σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου συνήθως οι χρήστες περιβάλλονται από ψηλά κτήρια και ουρανοξύστες με αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει σε αυτούς αποδυναμωμένο. Έτσι, θα τοποθετηθούν στις οροφές των ψηλών κτηρίων και στα πλαϊνά τους μέρη, επιφάνειες, οι οποίες θα αποτελούνται από πολλούς μικρούς ανακλαστήρες, ώστε το σήμα να αντανακλά σε αυτούς και να μην χάνει ισχύ περνώντας μέσα από κτήρια, μειώνοντας έτσι τις απώλειες διαδρομής [44].

1.5 Θέμα και στόχοι παρούσας διπλωματικής εργασίας

Όπως προαναφέρθηκε, μία από τις σημαντικότερες διαφορές του 6G από τις υπόλοιπες μέχρι τώρα γενιές είναι η εισαγωγή των εναέριων και δορυφορικών μέσων στις επίγειες επικοινωνίες και, κατά συνέπεια, η ενοποίησή τους με αυτές. Η παρούσα εργασία μελετάει αυτήν την πιθανή ενοποίηση και το πως μπορεί να επιτευχθεί στο 6G, βλέποντας διάφορες τεχνικές σύνδεσης των σταθμών βάσης με τους χρήστες (user association algorithms), τη δρομολόγηση κίνησης στο δίκτυο (traffic routing), την βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων (Virtual Network Function Placement) και την εξοικονόμηση ενέργειας του όλου συστήματος (energy efficiency). Στόχος της εργασίας είναι να φτιαχτεί ένας αλγόριθμος που θα πραγματοποιεί τις παραπάνω διεργασίες με επιτυχία και θα λειτουργεί με τον καλύτερο



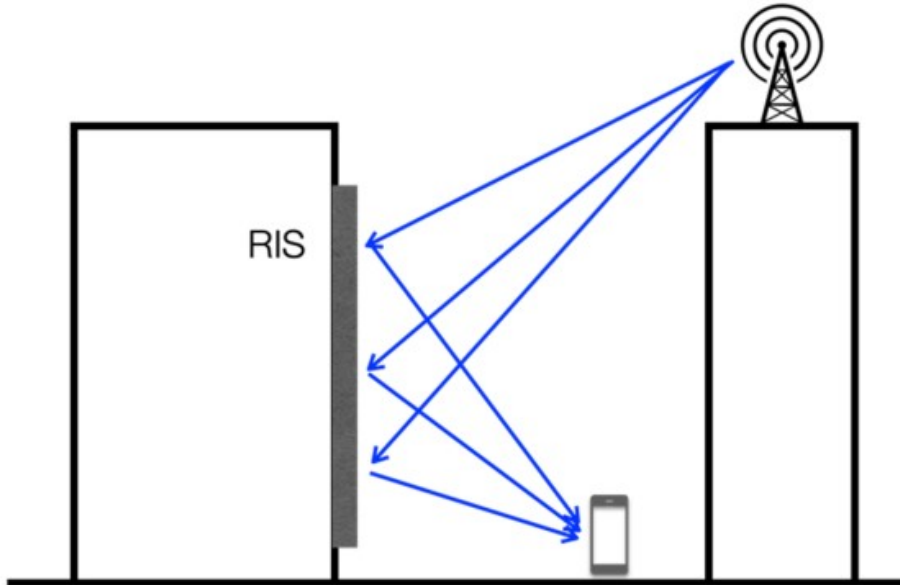
Σχήμα 1.13: Η επανάσταση του IoE που αναμένεται να έρθει μαζί με το 6G. [42]

δυνατό τρόπο, ξεπερνώντας αντίστοιχους State-of-Art (SoA) αλγόριθμους από την βιβλιογραφία, εισάγοντας παράλληλα χαμηλή πολυπλοκότητα στο δίκτυο.

1.6 Μεθοδολογία

Για να φτάσουμε στο σημείο αυτό, αρχικά, μελετήθηκε εις βάθος το 6G και οι νέες τεχνολογίες και εξελίξεις που αναμένεται να φέρει. Μία από τις βασικότερες τεχνολογίες κλειδιά που αναφέρονται στην βιβλιογραφία είναι και η ενοποίηση των δορυφορικών με τα επίγεια δίκτυα, για την οποία στην βιβλιογραφία δεν υπάρχουν άμεσες έρευνες και πειράματα που να δίνουν λύση στο πως μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτό. Λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός πως η εισαγωγή των δορυφορικών δικτύων στα επίγεια είναι ένα θέμα που απασχολεί τους ερευνητές πολλά χρόνια, θεωρήθηκε πως η ανάληψη ενός τέτοιου θέματος θα ήταν μία πολύ καλή επιλογή, η οποία θα έχει άμεση σχέση με μία σημαντική τεχνολογία. Έτσι, στην παρούσα εργασία, έχει αναπτυχθεί ένας ευρετικός αλγόριθμος που προτείνει μία πιθανή λύση στο παραπάνω πρόβλημα. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, έγινε περαιτέρω ανάλυση και έρευνα στους παράγοντες που αποτελούν το πρόβλημα, όπως είναι το πως μπορεί να λειτουργήσει ένα τόσο μεγάλο δίκτυο και πως μπορούν να ανατεθούν οι διαθέσιμοι επικοινωνιακοί και υπολογιστικοί πόροι σε αυτό, το οποίο είναι πλέον τρισδιάστατης μορφής, μιας και τώρα μιλάμε για τις οριζόντιες συνδέσεις μεταξύ των επίγειων σταθμών και μεταξύ των δορυφορικών σταθμών, μέσω των διαδορυφορικών συνδέσεων (Inter-Satellite Links), αλλά και μεταξύ επίγειων και δορυφορικών σταθμών.

Κάτι που προβληματίζε ιδιαίτερα, ήταν η επιλογή των σωστών δορυφόρων, οι οποίοι θα έπρεπε να είναι και αρκετοί σε ποσότητα αλλά και να ικανοποιούν στο σύνολο το σύστημα της εργασίας. Βάση αυτού, μελετήθηκαν διάφορες εταιρείες που προσφέρουν δορυφορικές υπηρεσίες και επιλέχθηκαν αυτές με τα προτιμότερα δεδομένα και που, φυσικά, πραγματεύονται στις τηλεπικοινωνίες. Για την επιλογή των δο-

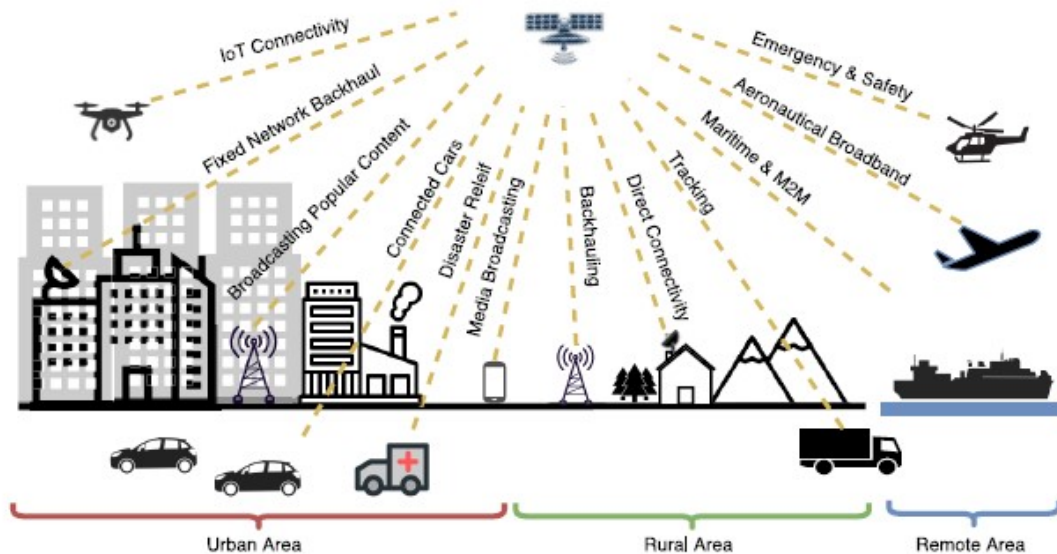


Σχήμα 1.14: Ο σταθμός βάσης επικοινωνεί με τον χρήστη μέσω του RIS, αποφεύγοντας ενδιάμεσα εμπόδια. [45]

ρυφόρων αυτών καθαυτών, έγινε εκτεταμένη έρευνα και ανάλυση των τροχιών και των βασικών τους στοιχείων που τις χαρακτηρίζουν (Orbital Elements) και οι δορυφόροι που κάλυπταν τις απαιτήσεις εισήχθησαν στο σύστημα. Επίσης, ένα ακόμα πρόβλημα για την ενοποίηση αυτή είναι ποιες λειτουργίες θα έχουν οι δορυφόροι ανάλογα με το υψομετρικό τους επίπεδο. Θεωρήθηκε, λοιπόν, για τους δορυφόρους χαμηλής γήινης τροχιάς και μέσης γήινης τροχιάς να έχουν την δυνατότητα υποστήριξης στο backhaul, προσφέροντας υπηρεσίες Edge Computing και Fog Computing, αντίστοιχα, αλλά και να δίνουν την δυνατότητα στους χρήστες να μπορούν να συνδεθούν σε αυτούς, συμμετέχοντας ενεργά και στο βασικό δίκτυο. Για τους γεωστατικούς δορυφόρους αποφασίστηκε να προσφέρουν μόνο υπηρεσίες Cloud Computing, συμβάλλοντας στην καλύτερη κατανομή του φόρτου εργασίας στο backhaul, βελτιώνοντας έτσι και στην απόδοση ενέργειας.

Στην συνέχεια, ερευνήθηκε το πως θα μπορούν οι χρήστες να συνδέονται απευθείας στους δορυφορικούς σταθμούς, μιας και οι αποστάσεις καθιστούν δύσκολη μία τέτοια σύνδεση, λόγω των μεγάλων απωλειών διαδρομής και της αυξημένης καθυστέρησης, σε συνδυασμό με την κατά πολύ μικρότερη ισχύ εκπομπής των συσκευών τελικού χρήστη (όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και τα τάμπλετ) και την περιορισμένη ενέργειά τους. Για το μοντέλο ενέργειας, υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε υπολογιστικό κόμβο η κατανάλωση και λαμβάνεται υπόψιν όταν αυτός χρησιμοποιείται ή όχι. Όταν κάποιος κόμβος δεν χρησιμοποιείται και βρίσκεται σε αδράνεια πάλι έχει κάποια μικρή κατανάλωση η οποία συμπεριλαμβάνεται και αυτή στους υπολογισμούς. Ένα πρόσθετο στοιχείο που έχει συμπεριληφθεί είναι και η ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service). Ανάλογα με την διεργασία που εκτελεί κάθε χρήστης έχει και τις ανάλογες απαιτήσεις σε χρόνο και εύρος ζώνης, οι οποίες στο σύστημα που έχει αναπτυχθεί παίζουν καθοριστικό ρόλο στην σύνδεση του χρήστη με τον αντίστοιχο κόμβο, ο οποίος θα πρέπει να είναι ικανός να ανταπεξέλθει σε αυτές.

Για το όλο σύστημα αποφασίστηκε να χτιστεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης MATLAB, λόγω της διαθε-



Σχήμα 1.15: Τα σενάρια χρήσης των δορυφορικών επικοινωνιών. [36]

σιμότητάς του ανοιχτά για το ακαδημαϊκό κοινό αλλά και για την πλούσια συλλογή του, τόσο σε toolbox που προσφέρει η ίδια η εταιρεία, όσο και σε αυτά που δημιουργούν οι χρήστες του και μοιράζονται με την υπόλοιπη κοινότητα. Ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία που υπήρχαν είναι το Satellite Communications Toolbox, το οποίο ήταν το κατάλληλο εναρκτήριο έμβασμα για την κατανόηση των δορυφορικών επικοινωνιών και τους παράγοντες που τις επηρεάζουν, ενώ στην συνέχεια οι ιδέες που αντλήθηκαν από αυτό προσαρμόστηκαν στο σύστημα της εργασίας. Έπειτα, επιλέχθηκε από την διαθέσιμη βιβλιογραφία μία διαφορετική εργασία που πραγματεύεται τα αντίστοιχα μέρη, η οποία υλοποιήθηκε και αυτή στο ίδιο πρόγραμμα.

Τέλος, τα σενάρια που έτρεξαν οι δύο αλγόριθμοι ήταν τα ίδια και από τα αποτελέσματά τους βγήκαν χρήσιμα συμπεράσματα, τόσο για την ποιότητα των δύο αλγορίθμων, όσο και το μέτρο σύγκρισής τους. Από τις μετρήσεις των αποτελεσμάτων αποδεικνύεται πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει καλύτερες επιδόσεις στο σύνολό του, όμως λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητάς του σε σχέση με αυτόν της βιβλιογραφίας, εμφανίζει μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης. Αυτό προτρέπει στο συμπέρασμα, πως τα μελλοντικά σχέδια για τον προτεινόμενο αλγόριθμο θα εστιάσουν, κυρίως, στην βελτίωση του σε αυτό το κομμάτι και στην ενσωμάτωση πιο εξελιγμένων τεχνολογιών, αυξάνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την απόδοσή του.

1.7 Επίλογος

Συνοψίζοντας, θα μπορούσε να ειπωθεί πως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι ένα μεγάλο κομμάτι της τεχνολογικής εξέλιξης προσφέροντας στους ανθρώπους την δυνατότητα να επικοινωνούν χωρίς να χρειάζεται να έρθουν σε άμεση επαφή. Η όλο και συνεχόμενη αύξηση στις απαιτήσεις τους οδηγεί τους ερευνητές παγκοσμίως να πρωτοπορούν και να δημιουργούν όλο και πιο ισχυρά συστήματα για να καλύψουν αυτές τις ανάγκες. Σε αυτή την αυξανόμενη ανάγκη για όλο και καλύτερες τηλεπικοινωνίες στηρίζεται και η παρούσα εργασία, επιχειρώντας να προσφέρει μία πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα, το οποίο έχει άμεσο στόχο την βελτίωση των κινητών δικτύων, την καλύτερη κατανομή του τηλεπικοινωνω-

Κεφάλαιο 1

νιακού φόρτου στο δίκτυο και την βέλτιστη ενεργειακή αποδοτικότητα.

Κεφάλαιο 2ο: Σύγχρονη Βιβλιογραφική Έρευνα και Προσεγγίσεις

2.1 Εισαγωγή

Τον τελευταίο καιρό όλο και περισσότερες έρευνες εστιάζουν στις δορυφορικές επικοινωνίες και πως αυτές μπορούν να μας εξυπηρετήσουν περαιτέρω. Συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές έρευνες πάνω σε διάφορα κομμάτια των δορυφορικών επικοινωνιών, όπως είναι η σύνδεση των χρηστών, η διαμόρφωση δέσμης (beamforming), η ανάθεση πόρων (resource allocation) και η επικοινωνία μεταξύ των δορυφόρων (inter-satellite links). Παρόλα αυτά όμως, οι έρευνες που εστιάζουν στην σύνδεση των δορυφορικών με τα επίγεια δίκτυα είναι ελάχιστες και δεν μελετούν το πρόβλημα εκτενώς, ενώ οι περισσότερες από αυτές ασχολούνται μόνο με δορυφόρους χαμηλής γήινης τροχιάς και καθόλου με δορυφόρους μέσης γήινης τροχιάς ή γεωστατικούς. Αυτός ο περιορισμός και μόνο απλοποιεί κατά πολύ το υπάρχον πρόβλημα, το οποίο απαιτεί μία εκτενή μελέτη για να βρεθούν οι μέθοδοι της βέλτιστης επίλυσής του.

2.2 Σχετικές Εργασίες και Έρευνες

	Ενεργειακή αποδοτικότητα (Energy Efficiency)	Σύνδεση χρηστών (User Association)	Τοποθέτηση VNF (VNF Placement)	Δρομολόγηση Κίνησης (Traffic Routing)	Επίγεια Δίκτυα (Terrestrial Networks)	Δορυφορικά Δίκτυα (Satellite Networks)
[46]			✓	✓	✓	
[47]	✓	✓	✓	✓	✓	
[48]		✓	✓			✓
[49]	✓					✓
[50]			✓	✓		✓
[51]	✓		✓			✓
[52]		✓	✓			✓
[53]		✓			✓	✓
[54]	✓		✓		✓	✓
[55]		✓	✓		✓	✓
[56]	✓		✓	✓	✓	✓
[57]			✓	✓	✓	✓
[58]		✓	✓	✓	✓	✓
[59]		✓		✓	✓	✓
Proposed	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Πίνακας 2.1: Βιβλιογραφική Έρευνα.

Στον πίνακα 2.1 μπορούμε να δούμε κάποιες βιβλιογραφικές εργασίες σχετικές με την παρούσα εργασία. Στην πρώτη στήλη αναγράφεται η αναφορά της κάθε βιβλιογραφικής σχετικής εργασίας, ενώ στις υπόλοιπες στήλες με ✓ σημειώνονται τα σημεία που έχει εμβαθύνει η καθεμία.

2.2.1 Σχετικές Εργασίες για τα Επίγεια Δίκτυα

Στα [46] και [47] βλέπουμε μία εκτεταμένη ανάλυση για την δρομολόγηση της πληροφορίας στο δίκτυο τους και την προσπάθεια για την καλύτερη δυνατή ανάθεση των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων. Αυτές οι δύο εργασίες όμως αφορούν μόνο τα επίγεια δίκτυα και δεν μελετούν το ενδεχόμενο ύπαρξης δορυφορικών συστημάτων. Συγκεκριμένα, το [46] εστιάζει στο πρόβλημα VNF Placement, CPU Allocation, and flow Routing (VNFPAR), δηλαδή στην από κοινού επίλυση της δυναμικής ανάθεσης υπολογιστικών πόρων και της δρομολόγησης κίνησης. Χρησιμοποιούνται λογαριθμικές συναρτήσεις για την προσέγγιση της κίνησης των VNFs και το πρόγραμμα αναλύεται ως MINLP (Mixed Integer Non Linear Program). Προτείνεται μία μέθοδος χαλάρωσης και προγραμματισμού για την βέλτιστη λύση μικρής κλίμακας VNFPAR, ενώ για μεγάλης κλίμακας σχεδιάζεται ένας πολυσταδιακός greedy αλγόριθμος. Στο [47], οι συγγραφείς μελετούν την σύνδεση των χρηστών με τους σταθμούς βάσης, την δρομολόγηση της κίνησης και την τοποθέτηση των VNFs στα 6G ετερογενή δίκτυα σε πραγματικό χρόνο, προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση του δικτύου και να διατηρήσουν σε υψηλά ποσοστά την αποδοχή των χρηστών από τους σταθμούς βάσης. Για να το πετύχουν αυτό, διατυπώνουν ένα μοντέλο και το συγκρίνουν με διαφορετικά SoA από την βιβλιογραφία, ενώ το πρόγραμμα αναλύεται ως MILP (Mixed Integer Linear Program).

2.2.2 Σχετικές Εργασίες για τα Δορυφορικά Δίκτυα

Οι σχετικές εργασίες [48], [49], [50], [51], [52] μελετάνε μόνο δορυφορικά δίκτυα και στο σύνολό τους έχουν καλύψει τους σκοπούς της παρούσας εργασίας στο δορυφορικό κομμάτι, χωρίς, όμως να περιλαμβάνεται το επίγειο. Στο [48] ερευνάται η σύνδεση των χρηστών και η ανακατανομή των πόρων σε ένα πυκνό δίκτυο δορυφόρων χαμηλής γήινης τροχιάς, αναπτύσσοντας δύο διαφορετικούς αλγόριθμους για την επίλυση των επιμέρους προβλημάτων, οι οποίοι συγκρίνονται με άλλους από την βιβλιογραφία. Επιπλέον, αναλύεται η πολυπλοκότητα των αλγόριθμων, και το πως μπορεί αυτή να μειωθεί, και η πιθανή χρήση παρόμοιων συστημάτων στο μέλλον σε πραγματικές συνθήκες. Στο [49] μελετάται το πρόβλημα της μεγιστοποίησης της ενεργειακής αποδοτικότητας υπό τους περιορισμούς της συνολικής ισχύος και του QoS. Παρουσιάζεται μία μέθοδος τετραγωνικού μετασχηματισμού δύο σταδίων που απλοποιεί το πρόβλημα και ένας αλγόριθμος ο οποίος επιλύει το απλοποιημένο πρόβλημα.

Στην συνέχεια, στο [50] οι συγγραφείς προτείνουν έναν αλγόριθμο, ο οποίος έχει σκοπό να μειώσει όσο το δυνατόν την ανάγκη για υπολογιστική ισχύ στις συσκευές τελικού χρήστη ικανοποιώντας το QoE με την βοήθεια ενός δορυφόρου χαμηλής τροχιάς που είναι εξοπλισμένος με έναν σέρβερ MEC (Mobile Edge Computing). Ο προτεινόμενος αλγόριθμος χωρίζεται σε δύο μέρη, το πρώτο είναι για την αποφόρτιση των συσκευών τελικού χρήστη και το δεύτερο για την ανάθεση των πόρων, ενώ το πρόβλημα είναι ένα MINLP. Στο [51], προτείνεται ένας αλγόριθμος, ο οποίος διαχειρίζεται τους επικοινωνιακούς και αποθηκευτικούς πόρους (transceiver resource and storage resource), με σκοπό να μεγιστοποιήσει τη ρυθμαπόδοση (throughput) δίνοντας προσοχή και στην ενεργειακή απόδοση του συστήματος για τα δορυφορικά δίκτυα. Στο [52], αναλύεται ο τρόπος σύνδεσης των συσκευών χρήστη σε 5G δορυφορικά δίκτυα, που απαρτίζονται από δορυφόρους χαμηλής γήινης τροχιάς, και η σωστή ανάθεση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος. Και σε αυτήν τη εργασία, το πρόβλημα χωρίζεται σε δύο μέρη, για το πρώτο μέρος οι συγγραφείς διατυπώνουν το πρόβλημα της σύνδεσης της κάθε συσκευής στους δορυφόρους και προτείνουν έναν αλγόριθμο που δίνει μία ικανοποιητική λύση. Για το δεύτερο μέρος, διατυπώνουν

το πρόβλημα για την ιδανική ανάθεση των διαθέσιμων πόρων και τους συντελεστές, από τους οποίους απαρτίζεται, και ύστερα, επιχειρούν να το λύσουν με την γενική μέθοδο κυρτής βελτιστοποίησης (general convex optimization method).

2.2.3 Σχετικές Εργασίες για τα Ενοποιημένα Δίκτυα

Τέλος, παρόλο που τα [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59] εστιάζουν στα επίγεια και δορυφορικά δίκτυα, διαφέρουν σημαντικά από την παρούσα εργασία. Στο [53] οι συγγραφείς μελετούν ένα υβριδικό δίκτυο άνω ζεύξης (UL) που αποτελείται από έναν δορυφόρο και έναν επίγειο σταθμό βάσης. Το πρόβλημα της σύνδεσης των χρηστών με το δίκτυο μελετάται σε δύο κατηγορίες, πρώτον, όταν όλα τα κανάλια έχουν ιδανικό CSI (Channel State Information) και, δεύτερον, όταν τα κανάλια έχουν CDI (Channel Distribution Information). Και στις δύο περιπτώσεις προτείνεται ένας αλγόριθμος, διαφορετικός για κάθε περίπτωση, που επιλύει το πρόβλημα. Σχετικά με το [54], περιγράφεται το πρόβλημα της βέλτιστης ενεργειακής απόδοσης στα συστήματα με Outdated CSI. Οι συγγραφείς εδώ προτείνουν μία τεχνική ελέγχου ισχύος για την βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, πραγματοποιώντας θεωρητικές αναλύσεις για τη μέση ισχύ εκπομπής έχοντας τη βέλτιστη ισχύ μετάδοσης. Στο [55] αναλύεται το πρόβλημα της ανάθεσης της διαθέσιμης ισχύος για τα ενοποιημένα δίκτυα σε σενάρια αραιοκατοικημένων περιοχών, στο οποίο πρόβλημα λαμβάνονται υπόψη η διακαναλική παρεμβολή, η μεγιστοποίηση της αποδοχής των χρηστών από το δίκτυο και η σωστή σύνδεσή τους στους σταθμούς. Έπειτα, το πρόβλημα χωρίζεται στην ανάθεση των πόρων στο επίγειο και στο δορυφορικό κομμάτι, που για το καθένα αναπτύσσεται αλγόριθμος για να επιλύσει το πρόβλημα.

Η εργασία [56] εστιάζει στο πρόβλημα της ανάθεσης πόρων στα ενοποιημένα δίκτυα και χρησιμοποιεί μηχανική μάθηση για την επίτευξη των παρακάτω δύο στόχων: i) τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου χρησιμοποιώντας διαθέσιμες τεχνικές για διαμόρφωση και κωδικοποίηση και, ii) τη μείωση της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ίδιες συχνότητες για τις επίγειες κυψέλες και τις δορυφορικές δέσμες για τη λειτουργία του αλγορίθμου. Για το [57], προτείνεται ένας αλγόριθμος που αφορά, κυρίως, την μετάδοση και τον υπολογισμό για διεργασίες που είναι χρονικά ευαίσθητες, αξιοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερο το ενοποιημένο δίκτυο και δίνοντας βάση στην σωστή ανάθεση της επεξεργαστικής ισχύος μεταξύ των κόμβων. Στο [58] παρουσιάζεται ένα αναλυτικό σύστημα που χρησιμοποιεί επίγειους και δορυφορικούς σταθμούς, δίνοντας στους χρήστες την δυνατότητα να συνδεθούν και στα δύο είδη σταθμών. Ο αλγόριθμος που προτείνεται στην εργασία έχει σκοπό να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των χρηστών για τις διεργασίες που ζητούν αλλά και να επιτρέψει στο σύστημα να έχει υψηλή απόδοση στο σύνολό του. Τέλος, για το [59] αναλύεται το πρόβλημα για το UL με μη ορθογώνια πολλαπλή σύνδεση (NOMA) σε ένα ενοποιημένο δορυφορικό και επίγειο δίκτυο, ως προς την σύνδεση των χρηστών με το δίκτυο πρόσβασης, την δρομολόγηση της κίνησης των χρηστών στο δίκτυο και, τρίτο και βασικότερο, την βέλτιστη ανάθεση των διαθέσιμων πόρων. Για την καλύτερη διαχείριση του προβλήματος, αυτό διασπάται σε τρία επιμέρους προβλήματα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο να επιλύει το καθένα ξεχωριστά.

2.3 Επίλογος

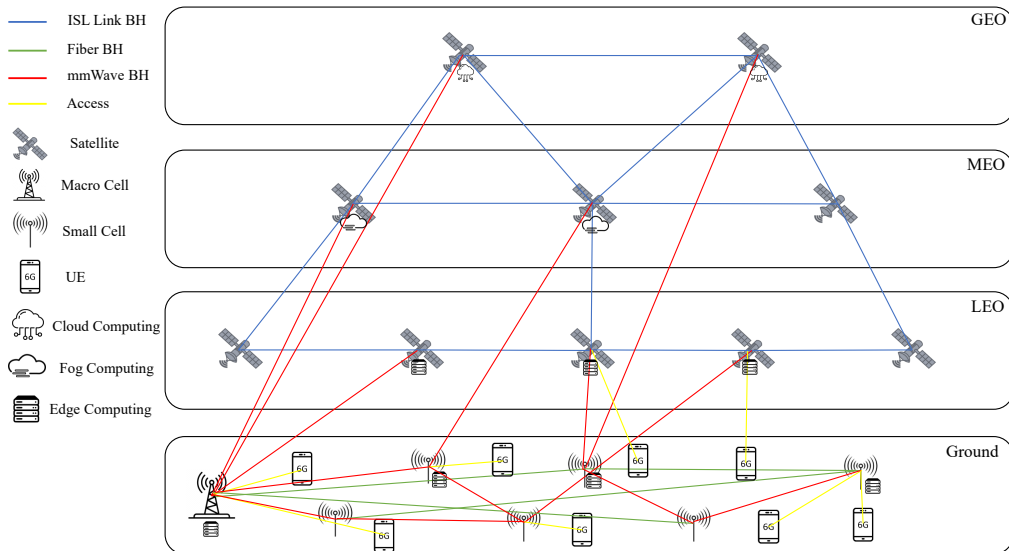
Από την παραπάνω ανάλυση της βιβλιογραφίας είναι εμφανές το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας για τις δορυφορικές επικοινωνίες. Προς το παρόν, μία εκτεταμένη και συμπεριληπτική έρευνα για την ενοποίηση και την ομαλή λειτουργία των δορυφορικών και των επίγειων δικτύων δεν είναι διαθέσιμη, πράγμα το οποίο οδήγησε στην ανάπτυξη της παρούσας εργασίας. Το πλεονέκτημά της, σε σχέση με τις υπόλοιπες αξιολογικές βιβλιογραφικές έρευνες, είναι πως στην προκειμένη περίπτωση έχει διερευνηθεί αυτή η πιθανή ενοποίηση και με την ένταξη δύο επιπλέον ειδών δορυφόρων, αυτών της μέσης γήινης τροχιάς και των γεωστατικών, αλλά και με την ανάλυση του όλου συστήματος από περισσότερες σκοπιές. Επίσης, στην παρούσα εργασία μελετάται από κοινού η ανάθεση των επικοινωνιακών, υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων για τη βέλτιστη λειτουργία του δικτύου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η παρούσα εργασία να εμβαθύνει περισσότερο στο πρόβλημα και στις πιθανές λύσεις του.

Κεφάλαιο 3ο: Μοντέλο Συστήματος και Πρόβλημα προς Επίλυση

3.1 Εισαγωγή

Για την ανάπτυξη του παρακάτω μοντέλου, υπήρξε μία εκτενής ανάλυση του προβλήματος και μελέτη για τους παράγοντες που επηρεάζουν τις επιδόσεις του. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, μπορούν να βρεθούν αναλυτικά τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τα μεγέθη που επηρεάζουν τις δορυφορικές επικοινωνίες, τα μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας των επίγειων και των δορυφορικών συστημάτων και τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των δορυφόρων που χρησιμοποιεί η εργασία πάνω στις τροχιακές τους θέσεις.

3.2 Μοντέλο Συστήματος (System Model)



Σχήμα 3.1: Αναλυτική παρουσίαση του σχεδιαγράμματος του ενοποιημένου δορυφορικού και επίγειου δικτύου στην παρούσα εργασία.

3.2.1 Σηματοθορυβική Σχέση

Η σηματοθορυβική σχέση υπολογίζεται χωριστά για κάθε μέρος της επικοινωνίας, δηλαδή για το δορυφορικό και για το επίγειο. Ενώ στο δορυφορικό μέρος ο υπολογισμός της είναι απλούστερος, θεωρώντας τις παρεμβολές από γειτονικούς δορυφόρους αμελητέες λόγω των πολύ μεγάλων αποστάσεων και της χρήσης υψηλών συχνοτήτων που αποσβένουν πολύ γρήγορα στο χώρο, στο επίγειο κομμάτι είναι ένα πιο σύνθετο πρόβλημα. Οι επίγειοι σταθμοί βάσης μπορούν να λειτουργούν είτε με ενσύρματο ή με ασύρματο τρόπο για το backhaul δίκτυο τους, ενώ για το δίκτυο πρόσβασης έχουμε αποκλειστικά ασύρματο τρόπο επικοινωνίας.

3.2.1.1 Σηματοθορυβική Σχέση στο Δορυφορικό Μέρος

Για να βρούμε τη σηματοθορυβική σχέση στο δορυφορικό μέρος, σε dB, κάνουμε:

$$SINR = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N \cdot I} \right) \quad (3.1)$$

όπου S η μέση ισχύ του επιθυμητού σήματος, N η μέση ισχύς του θορύβου και I είναι η ολική παρεμβολή, η οποία στις δορυφορικές ζεύξεις θεωρείται αμελητέα.

3.2.1.2 Σηματοθορυβική Σχέση στο Επίγειο Μέρος

Το επίγειο μέρος έχει δύο διαφορετικές μετρήσεις για το SINR, ένα για το δίκτυο πρόσβασης (Access Network-AN) ανάμεσα στους χρήστες και τους σταθμούς βάσης και ένα για το backhaul δίκτυο που κινείται η συνολική πληροφορία των σταθμών βάσης.

Για να υπολογίσουμε το απαιτούμενο SINR στο δίκτυο πρόσβασης, σε dB, κάνουμε:

$$SINR_{ij} = SNR_{ij} - 10 \log_{10} \left(\frac{I}{N} + 1 \right) \quad (3.2)$$

όπου I είναι η ολική παρεμβολή, σε Watts, στο χρήστη i από τους γειτονικούς σταθμούς βάσης j και N είναι η συνολική δύναμη του θορύβου, σε Watts, που λαμβάνεται στο χρήστη. Για το SNR_{ij} , που είναι το λαμβανόμενο SNR από το χρήστη μέσω του σταθμού βάσης και υπολογίζεται σε dB, ισχύει:

$$SNR_{ij} = P_{jsub} + G_{T_x i} - L_{cbj} - L_{p_{ij}} - L_{f_{ij}} - N_{th} - NF \quad (3.3)$$

όπου $G_{T_x i}$ είναι το κέρδος της κεραίας σε dBi, L_{cbj} είναι οι απώλειες των καλωδίων ανάμεσα στον RF connector και την κεραία σε dB, $L_{p_{ij}}$ είναι απώλειες διαδρομής ανάμεσα στον χρήστη i και τον σταθμό βάσης j σε dB, $L_{f_{ij}}$ είναι οι απώλειες εξαιτίας του slow-fading σε dB, N_{th} είναι ο θερμικός θόρυβος σε dBm, NF είναι το noise figure σε dB και P_{jsub} είναι η κατανεμημένη δύναμη ανά subcarrier από τον σταθμό βάσης j σε dBm και υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{jsub} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{jmax}}{12 N_j N_{PRB_{jmax}}} \right) \quad (3.4)$$

όπου P_{jmax} είναι μέγιστη δύναμη εκπομπής σε mW, N_j είναι ο αριθμός των κεραιών του σταθμού βάσης j και $N_{PRB_{jmax}}$ ο μέγιστος αριθμός των PRBs του σταθμού βάσης j .

Για να βρεθεί το απαιτούμενο SINR στο backhaul, σε dB, κάνουμε:

$$SINR_l^{trg} = 10 \log_{10} \left(2 \frac{\sum_{u \in U} r_u x_l^u}{BW_l} - 1 \right) \quad (3.5)$$

όπου BW_l είναι το εύρος ζώνης του backhaul link, r_u είναι ο απαιτούμενος ρυθμός των συσκευών χρήστη (UEs) και x_l^u είναι ο συνολικός αριθμός των backhaul links που μεταφέρουν πληροφορία.

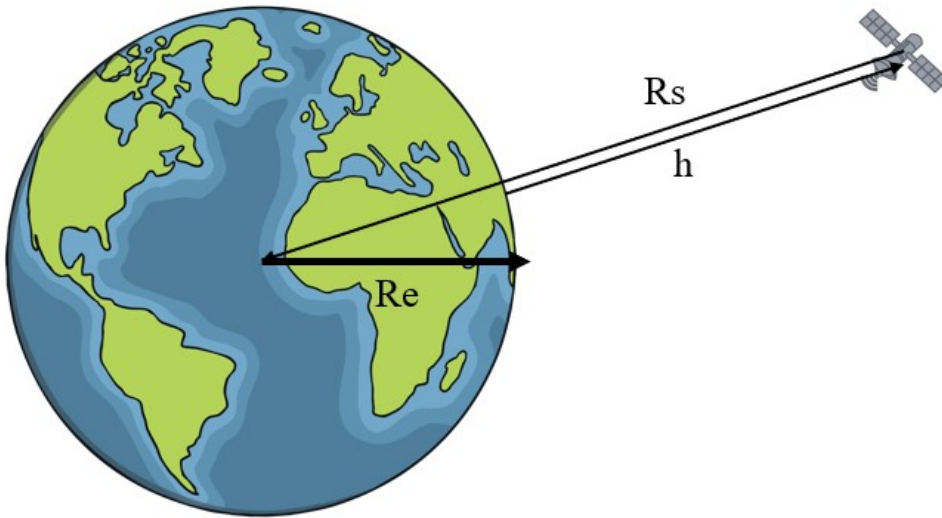
3.2.2 Δορυφορικό τμήμα

Για τον υπολογισμό της απόστασης του δορυφόρου από την Γη, R :

$$R = \sqrt{R_E^2 + R_S^2 - 2R_ER_S \cos(\gamma)} \quad (3.6)$$

όπου R_E είναι η ακτίνα της Γης με μήκος 6371 χλμ και R_S είναι η απόσταση του δορυφόρου από τον πυρήνα της Γης, η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_S = h + R_E \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.2: Αναλυτικό σχεδιάγραμμα υπολογισμού απόστασης ενός δορυφόρου από τη Γη.

Για τον υπολογισμό της γωνίας γ :

$$\cos(\gamma) = \cos(l_e)\cos(l_s)\cos(L) + \sin(l_e)\sin(l_s) \quad (3.8)$$

$$\gamma = \cos^{-1}(\cos(\gamma)) \quad (3.9)$$

όπου l_e το γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού, l_s το γεωγραφικό πλάτος του δορυφόρου και L η διαφορά ανάμεσα στο γεωγραφικό μήκος του επίγειου σταθμού με αυτό του δορυφόρου.

Για τον υπολογισμό της γωνίας ανύψωσης, El :

$$\cos(El) = \frac{R_S \sin(\gamma)}{R} \quad (3.10)$$

$$El = \cos^{-1}(\cos(El)) \quad (3.11)$$

Για την ενεργό ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ, EIRP, σε dBW, έχουμε:

$$EIRP = P_{T_x} + G_{T_x} - L_{T_x} \quad (3.12)$$

Κεφάλαιο 3

όπου P_{T_x} είναι η ισχύς του πομπού, G_{T_x} είναι το κέρδος της κεραίας του πομπού και L_{T_x} είναι οι απώλειες του πομπού.

Για τις απώλειες λόγω ασυμφωνίας των πολώσεων, L_{POL} , έχουμε:

$$L_{POL} = -20 \log_{10}(\cos(\phi)) \quad (3.13)$$

όπου ϕ είναι η γωνία μεταξύ της πόλωσης της κεραίας και αυτής του κύματος που λαμβάνεται.

Για τις απώλειες ελεύθερου χώρου, L_{FS} , έχουμε:

$$L_{FS} = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \quad (3.14)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου ραδιοκύματος. Εναλλακτικά για το λ ισχύει ότι:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.15)$$

οπότε με τον συνδυασμό των (3.14) και (3.15) προκύπτει:

$$L_{FS} = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi Rf}{c}\right) \quad (3.16)$$

Για να υπολογίσουμε τις συνολικές απώλειες μετάδοσης προσθέτουμε τις απώλειες ελευθέρου χώρου και τις συνολικές απώλειες από την ατμόσφαιρα, όπως υπολογίζονται στο (3.65):

$$L_{TOT} = L_{FS} + A_t \quad (3.17)$$

Για να βρούμε την τελική λαμβανόμενη ιστροπική ισχύ κάνουμε:

$$EIRP_R = EIRP - L_{POL} - L_{PROP} - L_T - L_I \quad (3.18)$$

όπου L_T είναι οι απώλειες σκόπευσης της κεραίας και L_I είναι οι απώλειες εξαιτίας της παρεμβολής.

Στην συνέχεια, για να βρεθεί ο λόγος της ισχύος του φέροντος, C , προς την πυκνότητα φασματικής ισχύος του θορύβου, N_0 , σε dBHz:

$$\frac{C}{N_0} = EIRP - L_{PROP} - k + \frac{G}{T} \quad (3.19)$$

όπου k είναι η σταθερά Boltzmann και είναι ίση με $-228.6 \text{dBW} \cdot K_{-1} \cdot Hz^{-1}$.

Για τον υπολογισμό της σηματοθορυβικής σχέσης στις δορυφορικές ζεύξεις, σε dB, κάνουμε:

$$SNR = \frac{C}{N_0} - 10 \log_{10}(BW) \quad (3.20)$$

όπου $\frac{C}{N_0}$ είναι ο λόγος της ισχύος του φέροντος, C , προς την πυκνότητα φασματικής ισχύος του θορύβου από το (3.19) και BW είναι το εύρος ζώνης του φέροντος σε Hz.

Για να υπολογίσουμε την λαμβανόμενη ενέργεια bit, E_b , σε συνάρτηση με την πυκνότητα φασματικής ισχύος του θορύβου, N_0 , σε dB, κάνουμε:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N_0} \cdot \frac{1}{R_b} \quad (3.21)$$

όπου R_b είναι ο ρυθμός των bit.

3.2.2.1 Ατμοσφαιρικές απώλειες

Για τους παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες της ατμόσφαιρας έχουμε στο σύνολο 4 παράγοντες: α) απώλειες από την βροχή, β) απώλειες από τα σύννεφα και την ομίχλη, γ) απώλειες από τους υδρατμούς και τον αέρα και δ) απώλειες εξαιτίας των τροποσφαιρικών σπινθηρισμών.

- **Απώλειες βροχής**

Αρχικά για τον υπολογισμό των απωλειών από την βροχή έχουμε:

Βρίσκουμε το ύψος της βροχής. h_R ,

$$h_R = h_0 + 0.36 \quad (3.22)$$

όπου h_0 είναι το μέσο ισοθερμικό ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας.

Στην συνέχεια υπολογίζουμε το γεωμετρικό μήκος διαδρομής, L_S , σε km, για γωνία ανύψωσης $El \geq 5^\circ$, έχουμε:

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\sin(El)} \quad (3.23)$$

όπου h_S είναι το ύψος του επίγειου σταθμού. Διαφορετικά για γωνία ανύψωσης $El < 5^\circ$, έχουμε:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{(\sin(El)^2 + \frac{2(h_R - h_S)}{R_E})^{1/2} + \sin(El)} \quad (3.24)$$

Μετάπειτα βρίσκουμε το γεωμετρικό μήκος, L_G , σε km:

$$L_G = L_S \cdot \cos(El) \quad (3.25)$$

Σειρά έχει να βρεθεί ο ρυθμός βροχόπτωσης, $R_{0.01}$, που υπολογίζεται μέσα από πίνακες σύμφωνα με το [60].

Έπειτα υπολογίζουμε την ειδική εξασθένηση, γ_R (dB/km):

$$\gamma_R = kR_{0.01}^a \quad (3.26)$$

Για τα k και a υπολογίζονται ως εξής:

$$k = \frac{1}{2}(k_H + k_\nu(k_H k_\nu)\cos(El)^2\cos(2\phi)) \quad (3.27)$$

$$a = \frac{1}{2}(k_H a_H + k_\nu a_\nu + (k_H a_H - \nu a_\nu) \cos(El)^2 \cos(2\phi)) \quad (3.28)$$

όπου k_H, k_ν, a_H, a_ν τα βρίσκουμε σε πίνακες στο [61] και είναι εξαρτώμενα από την συχνότητα.

Ακολουθεί ο υπολογισμός του παράγοντα οριζόντιας εξασθένησης, $r_{0.01}$:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (3.29)$$

Στην συνέχεια, βρίσκουμε το ζ (degrees):

$$\zeta = \tan\left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}}\right)^{-1} \quad (3.30)$$

Ανάλογα με το αποτέλεσμα, αν $\zeta > El$ τότε:

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos(El)} \quad (3.31)$$

ενώ αν ισχύει $\zeta \leq El$ τότε:

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\sin(El)} \quad (3.32)$$

όπου L_R σε km.

Έπειτα βρίσκουμε το x , σε μοίρες, για το οποίο ισχύει ότι αν το γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού είναι $|\phi| < 36^\circ$ τότε:

$$x = 36 - |\phi| \quad (3.33)$$

ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση ισχύει $x = 0$.

Επόμενος υπολογισμός είναι του παράγοντα κατακόρυφης προσαρμογής, $v_{0.01}$:

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin(El)}(31(1 - e^{-(El/(1+x))}) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0.45)} \quad (3.34)$$

Για το ενεργό μήκος διαδρομής, L_E (dB), ισχύει:

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad (3.35)$$

Τέλος, για τον τελικό υπολογισμό της ολικής εξασθένησης λόγω της βροχόπτωσης, A_r , σε dB κάνουμε:

$$A_r = \gamma_R L_E \quad (3.36)$$

• Απώλειες αερίων

Η ειδική εξασθένηση των αερίων (specific gaseous attenuation), σε dB/km, υπολογίζεται ως εξής:

$$\gamma = \gamma_O + \gamma_W = 0.1820f(N''_{Oxygen}(f) + N''_{WaterVapour}(f)) \quad (3.37)$$

όπου γ_O είναι η ειδική εξασθένηση λόγω του ξηρού αέρα, γ_W είναι η ειδική εξασθένηση λόγω των

υδρατμών και τα $N''_{Oxygen}(f)$ και $N''_{WaterVapour}(f)$ είναι τα φανταστικά μέρη, τα οποία εξαρτώνται από την συχνότητα (imaginary parts of the frequency dependent complex refractivities).

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τα φανταστικά μέρη με τους εξής τύπους:

$$N''_{Oxygen}(f) = \sum i_{Oxygen} S_i F_i + N''_D(f) \quad (3.38)$$

$$N''_{WaterVapour} = \sum i_{WaterVapour} S_i F_i \quad (3.39)$$

όπου S_i είναι η φασματική δύναμη της γραμμής (the strength of the i th oxygen or water vapour line), F_i είναι η λειτουργία τοπικού εύρους ζώνης συχνότητας (the oxygen or water vapour line shape factor) και το $N''_D(f)$ είναι η σειρά ξηρότητας λόγω της απορρόφησης αζώτου που προκαλείται από την πίεση (the dry continuum due to pressure-induced nitrogen absorption and the Debye spectrum).

Για τον υπολογισμό του S_i για το οξυγόνο και τους υδρατμούς, αντίστοιχα, έχουμε:

$$S_i = a_1 \cdot 10^{-7} \cdot p \cdot \theta^3 \exp(a_2(1 - \theta)) \quad (3.40)$$

$$S_i = b_1 \cdot 10^{-1} \cdot e \cdot \theta^{3.5} \exp(b_2(1 - \theta)) \quad (3.41)$$

όπου p είναι η ατμοσφαιρική πίεση, e είναι η πίεση των υδρατμών και θ είναι η θερμοκρασία $\frac{300}{T}$, όπου T σε Κέλβιν, τα οποία όλα μπορούμε να τα βρούμε στο [62]. Για τα a_1, a_2, b_1, b_2 είναι σταθερές που τα παίρνουμε από πίνακες σύμφωνα με το [63].

Για τον υπολογισμό του F_i έχουμε:

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left(\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + (\Delta f)^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + (\Delta f)^2} \right) \quad (3.42)$$

όπου f_i είναι η συχνότητα γραμμής του οξυγόνου ή των υδρατμών (the oxygen or water vapour line frequency) και Δf είναι το πλάτος της εκάστοτε γραμμής (the width of the line).

Για τον υπολογισμό του κάθε Δf για το οξυγόνο και τους υδρατμούς, αντίστοιχα, έχουμε:

$$\Delta f = a_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{0.8-a_4} + 1.1 \cdot e \cdot \theta) \quad (3.43)$$

$$\Delta f = b_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{b_4} + b_5 \cdot e \cdot \theta^{b_6}) \quad (3.44)$$

όπου τα $a_3, a_4, b_3, b_4, b_5, b_6$ τα παίρνουμε πάλι από τους πίνακες στο [63].

Το τελικό Δf μετά τον διαχωρισμό Zeeman για το οξυγόνο και διεύρυνση Doppler για τους υδρατμούς ορίζονται (modified to account for Zeeman splitting of oxygen lines and Doppler broadening of water vapour lines), αντίστοιχα, ως εξής:

$$\Delta f = \sqrt{(\Delta f)^2 + 2.25 \cdot 10^{-6}} \quad (3.45)$$

$$\Delta f = 0.535 \Delta f + \sqrt{0.217 (\Delta f)^2 + \frac{2.1316 \cdot 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \quad (3.46)$$

Για τον συντελεστή διόρθωσης οξυγόνου (is a correction factor that arises due to interference

effects in oxygen lines), δ , ισχύει:

$$\delta = (a_5 + a_6 \cdot \theta) \cdot 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \quad (3.47)$$

όπου a_5, a_6 τα παίρνουμε από τους ίδιους πίνακες. Αυτό ισχύει για το οξυγόνο αποκλειστικά, ενώ για τους υδρατμούς ισχύει $\delta = 0$.

Για την σειρά ξηρότητας λόγω της απορρόφησης αζώτου, N''_D ισχύει:

$$N''_D(f) = f \cdot p \cdot \theta^2 \left(\frac{6.14 \cdot 10^{-5}}{d(1 + (\frac{f}{d})^2)} + \frac{1.4 \cdot 10^{-12} \cdot p \cdot \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \cdot 10^{-5} \cdot f^{1.5}} \right) \quad (3.48)$$

όπου d είναι το μήκος στο φάσμα του Debye (the width parameter for the Debye spectrum) και είναι ίσο με $5.6 \cdot 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8}$

Τέλος, για τις συνολικές απώλειες διαδρομής, A_g , σε dB έχουμε:

$$A_g = \gamma \cdot R = (\gamma_o + \gamma_w) R \quad (3.49)$$

όπου R είναι το μήκος της διαδρομής σε χιλιόμετρα.

• Απώλειες ομίχλης

Για να βρεθεί η ειδική εξασθένιση στα σύννεφα, γ_c , (dB/km), έχουμε:

$$\gamma_c(f, T) = K_l(f, T) \cdot M \quad (3.50)$$

όπου f η συχνότητα του συστήματος σε GHz, K_l ο συντελεστής απόσβεσης της υγρασίας σε (dB/km)/(g/m³), T η θερμοκρασία της υγρασίας σε Κέλβιν και M η πυκνότητα του υγρού. Η πυκνότητα συνήθως κυμαίνεται σε τιμές μεταξύ 0.05 και 0.5 g/m³, με 0.05 να είναι μέτρια η ένταση της (ορατότητα στα 300 μέτρα), ενώ 0.5 να είναι πυκνή (ορατότητα στα 50 μέτρα).

Στην συνέχεια, για να βρεθεί η ειδική εξασθένιση της υγρασίας έχουμε:

$$K_l(f, T) = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \quad (3.51)$$

το οποίο έχει μονάδα μέτρησης (dB/Km)/(g/m³).

Για να βρεθεί το η κάνουμε:

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (3.52)$$

Για τα ε' και ε'' (complex dielectric permittivity of water) έχουμε:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p(1 + (\frac{f}{f_p})^2)} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s(1 + (\frac{f}{f_s})^2)} \quad (3.53)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1 + (\frac{f}{f_p})^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + (\frac{f}{f_s})^2} + \varepsilon_2 \quad (3.54)$$

όπου $\varepsilon_0 = 77.66 + 103.3(\theta - 1)^2$,

$\varepsilon_1 = 0.0671 \cdot \varepsilon_0$,

$$\varepsilon_2 = 3.52,$$

$$\theta = \frac{300}{T}$$

Για τα f_p, f_s (principal relaxation frequency)(secondary relaxation frequency) έχουμε:

$$f_p = 20.20 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \quad (3.55)$$

$$f_s = 39.8 \cdot f_p \quad (3.56)$$

τα οποία έχουν μονάδα μέτρησης τα GHz.

Τέλος, για να υπολογίσουμε τη ολική εξασθένηση εξαιτίας των σύννεφων και της ομίχλης, σε dB, έχουμε:

$$A_c = \gamma_c \cdot R \quad (3.57)$$

• Απώλειες σπινθηρισμών

Για τον υπολογισμό της απώλειας εξαιτίας των σπινθηρισμών αρχικά, βρίσκουμε μέσα από τους πίνακες του [64] το N_{wet} (median value of the wet term of the surface refractivity exceeded for the average year).

Έπειτα υπολογίζουμε το εύρος του σήματος αναφοράς (the standard deviation of the reference signal amplitude), σ_{ref} , σε dB:

$$\sigma_{ref} = 3.6 \cdot 10^{-3} + 10^{-4} \cdot N_{wet} \quad (3.58)$$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε το effective path length, L, (m):

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin(El)^2 + 2.35 \cdot 10^{-4} + \sin(El)}} \quad (3.59)$$

όπου h_L είναι το turbulent layer height και είναι ίσο με 1 χιλιόμετρο.

Σειρά έχει ο υπολογισμός του effective antenna diameter, D_{eff} , (m):

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} \cdot D \quad (3.60)$$

όπου η είναι η αποδοτικότητα της κεραίας (antenna efficiency) και D η γεωμετρική διάμετρος της (geometrical diameter).

Έπειτα, βρίσκουμε το antenna averaging factor, $g(x)$:

$$g(x) = \sqrt{3.86(x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin\left(\frac{11}{6} \tan^{-1}\left(\frac{1}{x}\right)\right) - 7.08x^{5/6}} \quad (3.61)$$

όπου $x = 1.22 \cdot D_{eff}^2 \cdot \frac{f}{L}$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε το standard deviation of the signal, σ :

$$\sigma = \sigma_{ref} \cdot f^{7/12} \cdot \frac{g(x)}{\sin(El)^{1.2}} \quad (3.62)$$

Μετέπειτα, υπολογίζουμε το time percentage factor, $a(p)$:

$$a(p) = -0.061(\log_{10}(p))^3 + 0.072(\log_{10}(p))^2 - 1.71 \log_{10}(p) + 3 \quad (3.63)$$

με το p να κυμαίνεται μεταξύ 0.01% μέχρι και 50%.

Τέλος υπολογίζουμε το fade depth, A_s , το οποίο μετριέται σε dB:

$$A_s = a(p) \cdot \sigma \quad (3.64)$$

- **Συνολικές απώλειες ατμόσφαιρας**

Για να υπολογίσουμε τις συνολικές ατμοσφαιρικές απώλειες κάνουμε:

$$A_t = A_g + \sqrt{(A_r + A_c)^2 + A_s^2} \quad (3.65)$$

3.2.3 Power Model Συστήματος

Σχετικά με τα μοντέλα ενέργειας, για τους επίγειους και τους δορυφορικούς σταθμούς βάσης έχουμε δύο κατηγορίες: α) αυτούς που συνδέονται ενσύρματα με το backhaul δίκτυο και ασύρματα με το δίκτυο πρόσβασης, οι οποίοι αφορούν αποκλειστικά επίγειους σταθμούς και β) αυτούς που συνδέονται ασύρματα, στο backhaul και στο δίκτυο πρόσβασης, στους οποίους συγκαταλέγονται και επίγειοι και δορυφορικοί σταθμοί.

3.2.3.1 Power Model για τους υπολογιστικούς κόμβους

Υπολογίζουμε την συνολική ενέργεια που καταναλώνεται στο σύνολο σε έναν υπολογιστικό κόμβο (physical machine), που πιθανόν να υπάρχει σε ένα σταθμό βάσης:

$$P_{pm} = p_{idle_{pm}} + (p_{max_{pm}} - p_{idle_{pm}})\theta_{pm}^{CPU} \quad (3.66)$$

όπου P_{pm} είναι η κατανάλωση του κόμβου, $p_{idle_{pm}}$ είναι η βασική κατανάλωση του σε αδράνεια, δηλαδή όταν το φόρτος εργασίας της CPU είναι στο 0%, ενώ το $p_{max_{pm}}$ είναι όταν ο φόρτος εργασίας είναι στο 100%. Το θ_{pm}^{CPU} είναι το ποσοστό του φόρτου εργασίας της CPU. Και πάλι εδώ ισχύει πως, σε περίπτωση που ο υπολογιστικός κόμβος είναι απενεργοποιημένος, ο παραπάνω τύπος μετατρέπεται σε:

$$P_{pm} = 0 \quad (3.67)$$

δηλαδή έχει μηδενική κατανάλωση ενέργειας.

3.2.3.2 Power Model για Ενσύρματο Backhaul Δίκτυο

Για την πρώτη κατηγορία ο υπολογισμός για την κατανάλωση ενέργειας στο backhaul δίκτυο, σε Watt, γίνεται ως εξής:

$$P_{switch} = p_{idle_{switch}} + \sum_{i \in ports} P_i \quad (3.68)$$

σε περίπτωση που ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται σε λειτουργία, ακόμα και σε αδράνεια, ή

$$P_{switch} = 0 \quad (3.69)$$

σε περίπτωση που είναι πλήρως απενεργοποιημένος. Το P_{switch} είναι η κατανάλωση ενέργειας στο switch του επίγειου σταθμού, $p_{idle_{switch}}$ είναι η βασική κατανάλωση ενέργειας στο switch όταν βρίσκεται σε αδράνεια και P_i είναι η κατανάλωση ενέργειας κάθε διασύνδεσης (port) που έχει το switch και βρίσκεται σε λειτουργία.

3.2.3.3 Power Model για Ασύρματο Backhaul και Access Δίκτυο

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης στο δίκτυο πρόσβασης, σε Watt, έχουμε:

$$P_{AN} = \sum_{i \in B} N_{TRX_i} (P_{0_i} + \Delta_{p_i} \cdot P_{out_i}) \quad (3.70)$$

όπου N_{TRX_i} είναι ο αριθμός των πομποδεκτών στον σταθμό βάσης i , το P_{0_i} είναι η στατική κατανάλωση ενέργειας όταν ο σταθμός βάσης i βρίσκεται σε αδράνεια, Δ_{p_i} είναι ο δείκτης της κλίσης της εκπομπόμενης ενέργειας του σταθμού βάσης για να ισοσταθμίσει την κίνηση των δεδομένων και P_{out_i} είναι η κατανάλωση ενέργειας που εξαρτάται από το φορτίο.

Αναλυτικά για το P_{out_i} έχουμε:

$$P_{out_i} = \sum_{u \in U} P_{i_{PRB}} \cdot c_{i,u} \cdot x_{i,u}^u \quad (3.71)$$

όπου $x_{i,u}^u$ είναι κάθε σύνδεσμος μεταξύ δύο κόμβων (nodes) που μεταφέρει πληροφορία, $c_{i,u}$ είναι ο αριθμός των συνολικών resource blocks που απαιτούνται για να γίνει η σύνδεση μεταξύ του χρήστη u και του σταθμού βάσης i , για το οποίο ισχύει:

$$c_{i,u} = \frac{r_u}{BW_{PRB} SE_{i,u}} \quad (3.72)$$

όπου r_u είναι ο απαιτούμενος ρυθμός των συσκευών των χρηστών, BW_{PRB} είναι το εύρος ζώνης ανά resource block και $SE_{i,u}$ είναι η μέγιστη αποδοτικότητα του φάσματος, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$SE_{i,u} = \min(N_{TX_i}, N_{RX_u}) \log_2 \left(1 + \frac{N_{RX_u} \cdot SINR_{i,u}}{\min(N_{TX_i}, N_{RX_u})} \right) \quad (3.73)$$

όπου N_{TX_i}, N_{RX_u} είναι οι κεραίες του πομπού και του δέκτη, αντίστοιχα, και $SINR_{i,u}$ είναι η αναλογία του σήματος προς τον θόρυβο και την παρεμβολή από τον σταθμό βάσης i προς τον δέκτη u . Στην προκειμένη περίπτωση, για το SINR ισχύει ο τύπος (3.2) όταν γίνεται λόγος για επίγειο σταθμό βάσης,

ενώ για δορυφορικό σταθμό βάσης ισχύει ο τύπος (3.20).

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό της κατανάλωσης στο backhaul δίκτυο, σε Watt, έχουμε:

$$P_{BH} = \sum_{l \in L} N_{TRX_l} (P_{0_l} + \Delta_{p_l} P_{out_l}) \quad (3.74)$$

όπου N_{TRX_l} είναι ο αριθμός των πομποδεκτών στο backhaul link, P_{0_l} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για το backhaul link σε κατάσταση αδράνειας, Δ_{p_l} είναι ο δείκτης κλίσης του backhaul link για να ισοσταθμίσει την εκπεμπόμενη ενέργεια και P_{out_l} είναι η κατανάλωση εξαιτίας του φορτίου.

Για τον υπολογισμό του P_{out_l} , σε Watt, έχουμε:

$$P_{out_l} = SINR_l^{trg} + \beta_l \quad (3.75)$$

όπου $SINR_l^{trg}$ είναι το απαιτούμενο SINR για την πετυχημένη μεταφορά του φορτίου μέσω του backhaul link, το οποίο δίνεται από τον τύπο (3.5) για επίγειο σταθμό βάσης ή από τον τύπο (3.1) για δορυφορικό σταθμό βάσης χωρίς όμως να έχουμε παρεμβολές στο backhaul δίκτυο για το δορυφορικό μέρος, β_l είναι το σύνολο των απωλειών του συστήματος χωρίς τα κέρδη του, το οποίο υπολογίζεται, σε dBm, με τον εξής τρόπο:

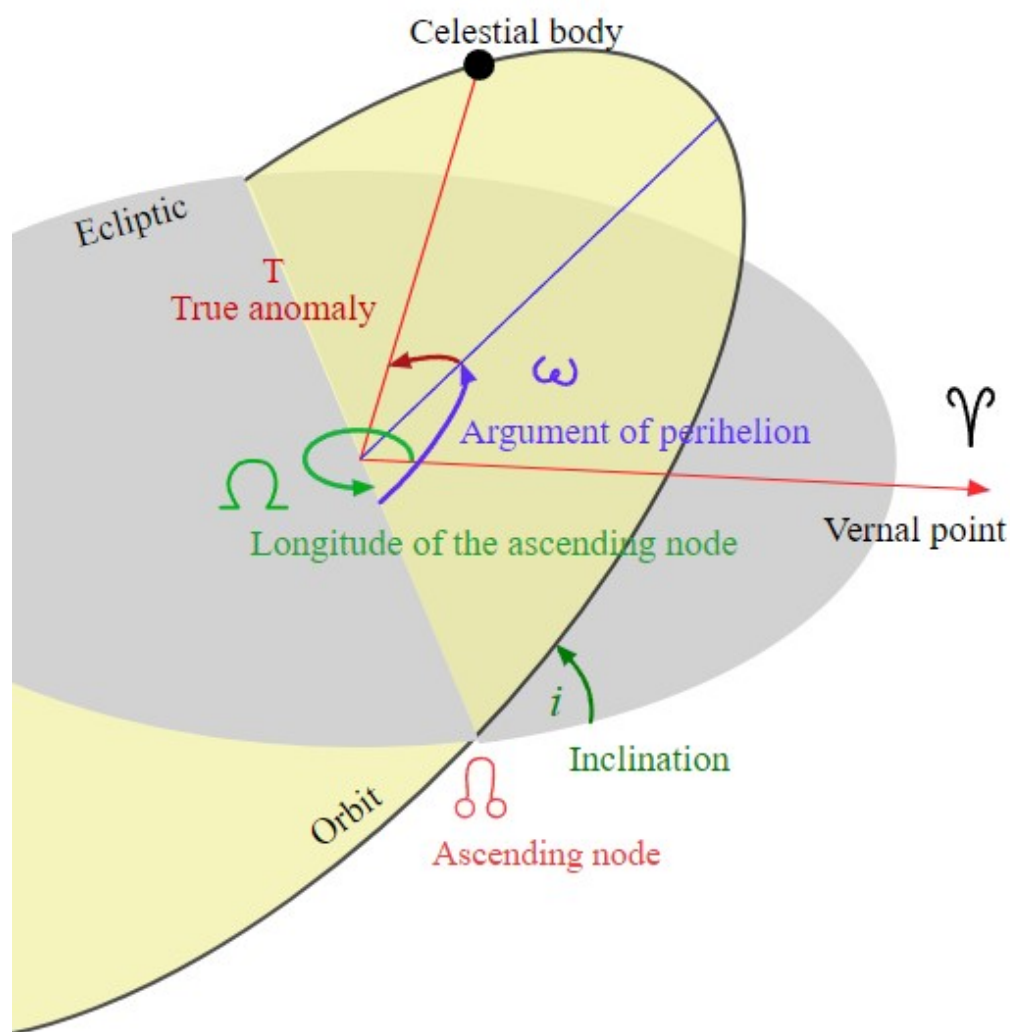
$$\beta_l = L_{TX_l} + L_{RX_l} + PL_l + LM + N_{TH} + NF_{BH} - G_{TX_l} - G_{RX_l} \quad (3.76)$$

όπου L_{TX_l} και L_{RX_l} είναι οι απώλειες των κεραιών στον πομπό και τον δέκτη, αντίστοιχα, PL_l είναι οι απώλειες διάδοσης (συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες κενού χώρου και οι συνολικές ατμοσφαιρικές απώλειες, LM είναι το κενό ασφαλείας του backhaul link (link margin), N_{TH} είναι ο θερμικός θόρυβος του συστήματος, NF_{BH} είναι ο συντελεστής θορύβου (noise figure) του δέκτη. Ο ίδιος τύπος ισχύει για τα επίγεια και τα δορυφορικά συστήματα με τις αντίστοιχες τιμές να αλλάζουν από σύστημα σε σύστημα ανάλογα με τα δεδομένα.

3.2.4 Εύρεση Δορυφόρου στην Τροχιά

Για την εύρεση του δορυφόρου στην τροχιά, χρησιμοποιούμε δύο συστήματα, τα οποία είναι ανεπτυγμένα για να λειτουργούν σύμφωνα με κάποια αρχεία που εξάγονται από την NORAD, και τα οποία χρησιμοποιεί και το πρόγραμμα που γίνεται η προσομοίωση. Τα μοντέλα αυτά είναι τα SGP4 (Simplified General Perturbations-4) και SDP4 (Simplified Deep-Space Perturbations-4) [65]. Τα δύο αυτά μοντέλα αναπτύχθηκαν και λειτουργούν σύμφωνα με τα orbital elements ή keplerian elements. Βασίζονται πάνω στην Two-Body-Keplerian μέθοδο, η οποία βρίσκει τα σημεία των σωμάτων στις τροχιές σύμφωνα με τους νόμους του Κέπλερ για την κίνηση των πλανητών, αλλά δεν υπολογίζει το βαρυτικό πεδίο των υπόλοιπων στοιχείων έξω από την Γη, όπως τους άλλους πλανήτες, και δεν παίρνει υπ' όψιν και τη μη απόλυτη σφαιρικότητα της Γης. Αυτούς τους παράγοντες διορθώνουν τα πρώτα δύο μοντέλα, συγκεκριμένα το SGP4 υπολογίζει επιπλέον την ατμοσφαιρική αντίσταση και τη μη σφαιρικότητα της Γης και το χρησιμοποιούμε για δορυφόρους με περίοδο μικρότερη των 225 λεπτών, ενώ το SDP4 υπολογίζει επιπλέον σε αυτά του SGP4 και την ηλιακή και σεληνιακή βαρύτητα και το χρησιμοποιούμε για δορυφόρους με περίοδο ίση ή μεγαλύτερη των 225 λεπτών. Τα orbital elements αναφέρονται στα στοιχεία τα οποία απαρτίζουν μία τροχιά και είναι τα εξής: α) ο μεγάλος ημι-άξονας, β) η εκκεντρότητα, γ) η έγκλιση, δ) η ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου, ε) το όρισμα ή γωνία του περιγείου και στ) η αληθής ανωμαλία [66].

Ο μεγάλος ημι-άξονας συμβολίζεται με το γράμμα a και είναι η απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους δύο σωμάτων στις κυκλικές τροχιές, είναι αυτός που χαρακτηρίζει το μέγεθος μίας τροχιάς. Η εκκεντρότητα συμβολίζεται με το γράμμα e και είναι αυτή που μας δίνει το σχήμα μίας τροχιάς, δηλαδή κατά πόσο είναι ελλειπτική η κυκλική. Η έγκλιση συμβολίζεται με το γράμμα i και μας δίνει την κλίση ενός σώματος στην τροχιά σε σχέση με τον ισημερινό. Η ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου συμβολίζεται με το γράμμα Ω και είναι στην ουσία η γωνία που δίνει την περιστροφή του σώματος στην τροχιά σε σχέση με τον μεσημβρινό, δηλαδή είναι η γωνία κάθετη στην έγκλιση. Το όρισμα ή γωνία του περιγείου συμβολίζεται με το γράμμα ω και είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του περιγείου και την ανοδικού κόμβου. Η αληθής ανωμαλία είναι η γωνία μεταξύ του σώματος στην τροχιά και της διεύθυνσης του περιγείου, συμβολίζεται με το γράμμα ϕ_0 και αναφέρεται στην πραγματική τοποθεσία του σώματος στην τροχιά.



Σχήμα 3.3: Τα στοιχεία που απαρτίζουν μία τροχιά και χρησιμοποιούνται για την εύρεση των δορυφόρων σε αυτήν. [67]

Στην περίπτωση των δορυφόρων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα της παρούσας εργασίας, για να πάρουμε τα παραπάνω στοιχεία χρησιμοποιούμε τα TLEs (Two-Line Element) αρχεία. Κάθε δορυφόρος έχει τα στοιχεία του συγκεντρωμένα σε ένα τέτοιο αρχείο, το οποίο είναι διαθέσιμο ανοιχτά σε όλους

μέσω του διαδικτύου. Αυτά τα αρχεία έχουν επισημοποιηθεί από την NASA (National Aeronautics and Space Administration) και την NORAD (North American Aerospace Defense Command) και εποπτεύονται από ένα τμήμα της δεύτερης για την σωστή παροχή πληροφοριών. Τα TLEs είναι τα αρχεία, τα οποία αξιοποιούν τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα για την εύρεση των δορυφόρων πάνω στα τροχιακά συστήματα, τα οποία για την συγκεκριμένη εργασία αντλήθηκαν από το [68].

```
HELLASSAT4
1 44034U 19007A 23098.55604815 .00000161 00000-0 00000-0 0 9996
2 44034 0.0666 125.2365 0003471 11.0030 299.4825 1.00271010 15668
```

Σχήμα 3.4: Τα στοιχεία του δορυφόρου HellasSat4 στην μορφή TLE.

3.3 Πρόβλημα προς Επίλυση και Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Σχετικά με το πρόβλημα, ο πρωτεύον σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μεγιστοποιήσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος των ενοποιημένων δικτύων και την αποδεκτικότητα των χρηστών από το σύστημα. Για την επίτευξη αυτού, αρχικά λαμβάνονται υπόψιν οι πρωταρχικές συνδέσεις κάθε χρήστη (user association). Ξεκινώντας από τους χρήστες, ο αλγόριθμος μετράει το SINR, που υπολογίζεται σύμφωνα με το 3.1 όταν πρόκειται για σύνδεση με κάποιο δορυφόρο και το 3.2 για σύνδεση με κάποιον από τους επίγειους σταθμούς. Στον κάθε χρήστη δίνεται η δυνατότητα να συνδεθεί σε μόνο έναν από τους διαθέσιμους σταθμούς βάσης, είτε είναι επίγειος είτε είναι δορυφορικός, ενώ όταν επιχειρήσει να συνδεθεί σε κάποιον δορυφόρο, το σύστημα επιτρέπει την σύνδεση μόνο σε αυτούς που είναι χαμηλής ή μέσης γήινης τροχιάς, αποκλείοντας τους γεωστατικούς δορυφόρους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται μόνο στο traffic routing του συστήματος, λόγω της πολύ μεγάλης απόστασής τους από τη Γη. Η προτεραιότητα για την σύνδεση των χρηστών παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στον αλγόριθμο, μιας και οι χρήστες που έχουν πιο απαιτητικές διεργασίες για εκτέλεση, έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σύγκριση με αυτούς που οι διεργασίες τους δεν επείγουν ως προς τις χρονικές καθυστερήσεις. Για την τελική επιλογή ενός σταθμού βάσης, ο αλγόριθμος βλέπει την κατανάλωση ενέργειας στο σύνολο της κάθε διαδρομής και επιλέγει να συνδεθεί με τον σταθμό βάσης που αρχίζει η διαδρομή με την μικρότερη κατανάλωση, στην οποία λαμβάνεται υπόψιν αν εκτελούνται ήδη επιπλέον διεργασίες από διαφορετικούς χρήστες, ενώ για τον υπολογισμό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιείται ο τύπος 3.70. Αν, επιπλέον, η επιλογή της βέλτιστης προτεινόμενης διαδρομής, δηλαδή αυτής με την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη σε καθυστέρηση και χωρητικότητα, τότε αυτό σημαίνει πως είναι πλέον δυνατή η σύνδεση και πραγματοποιείται, διαφορετικά προχωράει στην επόμενη βέλτιστη διαδρομή και κάνει τις ίδιες μετρήσεις.

Για το backhaul δίκτυο, στο οποίο γίνεται το traffic routing, το SINR μεταξύ των επίγειων σταθμών μετριέται με τον τύπο 3.5, ενώ για τους δορυφόρους μετριέται πάλι με το 3.1, όπως και στο δίκτυο πρόσβασης, μόνο που αντί για τους χρήστες, χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχοι επίγειοι σταθμοί. Το backhaul μέρος της συγκεκριμένης εργασίας χωρίζεται σε δύο μέρη, το ενσύρματο, δηλαδή όταν οι επίγειοι, αποκλειστικά, σταθμοί συνδέονται μεταξύ τους με καλώδιο οπτικής ίνας, και το ασύρματο, όταν οι σταθμοί, δορυφορικοί και επίγειοι συνδέονται με mmWave ραδιοκύματα. Όσον αφορά το ενσύρματο μέρος, σε κάθε σενάριο η μαροκυψέλη και δύο από τις μικροκυψέλες, που επιλέγονται με τυχαίο τρόπο, αποκτούν δυνατότητες MEC και σύνδεση μέσω οπτικών ινών με κάποια φυσικά μηχανήματα (physical machines),

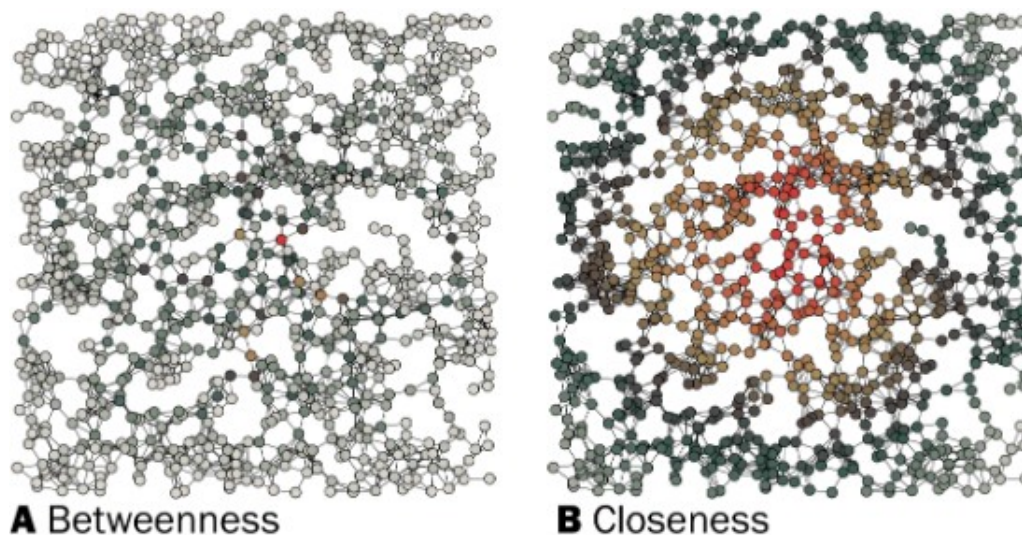
τα οποία ονομάζονται υπολογιστικοί κόμβοι (Computational Nodes) και εξυπηρετούν μόνο σαν εξωτερικοί σέρβερ (για Computing Storage) στην παρούσα εργασία. Συνεπώς, δεν προσφέρεται η δυνατότητα σε κάποιον χρήστη να συνδεθεί με τα μηχανήματα αυτά καθαυτά, παρά μόνο να εκτελεστούν σε αυτά κάποιες από τις διεργασίες που χρειάζονται. Σε αυτά τα φυσικά μηχανήματα υπάρχει ένας διαχωρισμός, ο οποίος σχετίζεται με την απόστασή τους από το δίκτυο πρόσβασης. Με αυτό σαν μέτρο σύγκρισης, αυτά που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση ανήκουν στο πρώτο Aggregation Layer και έχουν δυνατότητες fog computing, ενώ αυτά που βρίσκονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις ανήκουν στο δεύτερο Aggregation Layer και έχουν μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, παρέχοντας cloud computing υπηρεσίες. Ο υπολογισμός ενέργειας αυτών των υπολογιστών υπολογίζεται με τον τύπο 3.66, στον οποίο προστίθεται και ο τύπος 3.68, εφόσον αποτελούν μηχανήματα του δικτύου και συνδέονται μέσω δικτυακών συσκευών με το υπόλοιπο δίκτυο.

Αντίθετα με το ενσύρματο δίκτυο backhaul, το ασύρματο παρουσιάζει αρκετές διαφορές ως προς τις συνδέσεις του. Βασικότερη διαφορά είναι ότι πλέον, οι μικροκυψέλες συνδέονται μεταξύ τους με mmWave links, καθώς και οι δορυφόροι με τους επίγειους σταθμούς, ενώ οι δορυφόροι αναμεταξύ τους με οπτικά links, με τον υπολογισμό της ενέργειας, πλέον, να υπολογίζεται μέσω του τύπου 3.74. Οι δορυφόροι χαμηλής γήινης τροχιάς (Low Earth Orbit-LEO) έχουν εξοπλιστεί με συστήματα MEC, όπως και οι επίγειοι σταθμοί, οι δορυφόροι μέσης γήινης τροχιάς (Medium Earth Orbit-MEO) είναι εξοπλισμένοι με υπολογιστικές μηχανές τύπου fog computing, ενώ για τους γεωστατικούς δορυφόρους (Geostationary Earth Orbit-GEO) ισχύει πως έχουν δυνατότητες cloud computing, το οποίο σημαίνει πως έχουν αρκετή περισσότερη υπολογιστική ισχύ σε σχέση με τους προηγούμενους. Για την παρούσα εργασία και για λόγους απλούστευσης του προγράμματος και του προβλήματος, οι δορυφόροι μέσης τροχιάς, ενώ έχουν προσαρμοστεί στο πρόγραμμα για κανονική λειτουργία και ενσωμάτωση, δεν έχουν συμπεριληφθεί στις μετρήσεις και στα αποτελέσματα, καθώς αποφασίστηκε να μην μπουν ενεργά στο σύστημα.

Τέλος, έχουμε την τοποθέτηση των VNFs σύμφωνα με την απαιτούμενη σειρά που έχει κάθε SFC (service function chain). Για την τοποθέτηση του κάθε VNF ελέγχονται από τον αλγόριθμο τρεις διαφορετικές παράμετροι για κάθε κόμβο στην επιλεγμένη διαδρομή, το μέγεθος του δείκτη κεντρικότητας (centrality), η μέγιστη χωρητικότητα σε υπολογιστική ισχύ (computational storage) και το υπάρχων φορτίο της μονάδας κεντρικής επεξεργασίας (CPU). Έπειτα, αφού έχουν ελεγχθεί οι παραπάνω παράμετροι, τοποθετούνται τα VNFs με την σωστή σειρά, σύμφωνα με το SFC που ζητάει να πραγματοποιήσει ο χρήστης, ενώ σε περίπτωση που δεν ικανοποιούνται οι συνθήκες ο αλγόριθμος ξαναπηγαίνει στο σημείο επιλογής βέλτιστης διαδρομής και επιλέγει την επόμενη. Αναλύοντας περαιτέρω τις παραμέτρους, στη θεωρία γραφημάτων και στην ανάλυση των δικτύων, οι δείκτες κεντρικότητας εκχωρούν αριθμούς ή ταξινομήσεις σε κόμβους μέσα σε ένα γράφημα που αντιστοιχεί στη θέση του δικτύου τους. Το closeness centrality ενός κόμβου είναι ένα μέτρο της κεντρικότητας σε ένα δίκτυο, που υπολογίζεται ως το αντίστροφο του αθροίσματος των συντομότερων διαδρομών μεταξύ του κόμβου και όλων των άλλων κόμβων στο γράφημα. Έτσι, όσο πιο κεντρικός είναι ένας κόμβος, τόσο πιο κοντά είναι σε όλους τους άλλους κόμβους.

3.4 Επίλογος

Ανακεφαλαιώνοντας, στο κεφάλαιο αυτό αναπτύχθηκε το μοντέλο συστήματος που ακολουθήθηκε από τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Δόθηκε μία εκτενής ανάλυση για τους παράγοντες που επηρεάζουν τη σηματοθορυβική σχέση και για τη σημασία της στο συγκεκριμένο αλγόριθμο, όπως επίσης, μελετήθη-



Σχήμα 3.5: Σύγκριση μεταξύ των δύο ειδών κεντρικότητας που υπάρχουν χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, όπου κόκκινο σημαίνει την αύξηση της κεντρικότητας. [69]

καν οι παράγοντες που επηρεάζουν τις δορυφορικές επικοινωνίες, θετικά και αρνητικά, με έμφαση στο μοντέλο των ατμοσφαιρικών απωλειών. Σχετικά με το σημαντικότερο κομμάτι της παρούσας εργασίας, την κατανάλωση της ενέργειας στο σύστημα, έχει περιγραφεί με κάθε λεπτομέρεια και έχει διαχωριστεί σύμφωνα με τον τρόπο που το χρησιμοποιεί ο ίδιος ο αλγόριθμος, δηλαδή το ενσύρματο και το ασύρματο κομμάτι. Επιπλέον, περιγράφεται ο τρόπος που βρέθηκαν οι κατάλληλοι δορυφόροι για το σύστημα της παρούσας εργασίας, και αναλύονται περαιτέρω οι δορυφορικές τροχιές και τα βασικότερα στοιχεία των δορυφόρων για την εργασία, τα οποία είναι αυτά που επέτρεψαν την όλη διαδικασία. Τέλος, αναλύεται το πρόβλημα που επιχειρεί να λύσει ο προτεινόμενος αλγόριθμος και επεξηγείται ο τρόπος λειτουργίας του και η συνολική ροή του μέχρι να φέρει εις πέρας την ικανοποίηση όλων των χρηστών.

Κεφάλαιο 4ο: Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

4.1 Εισαγωγή

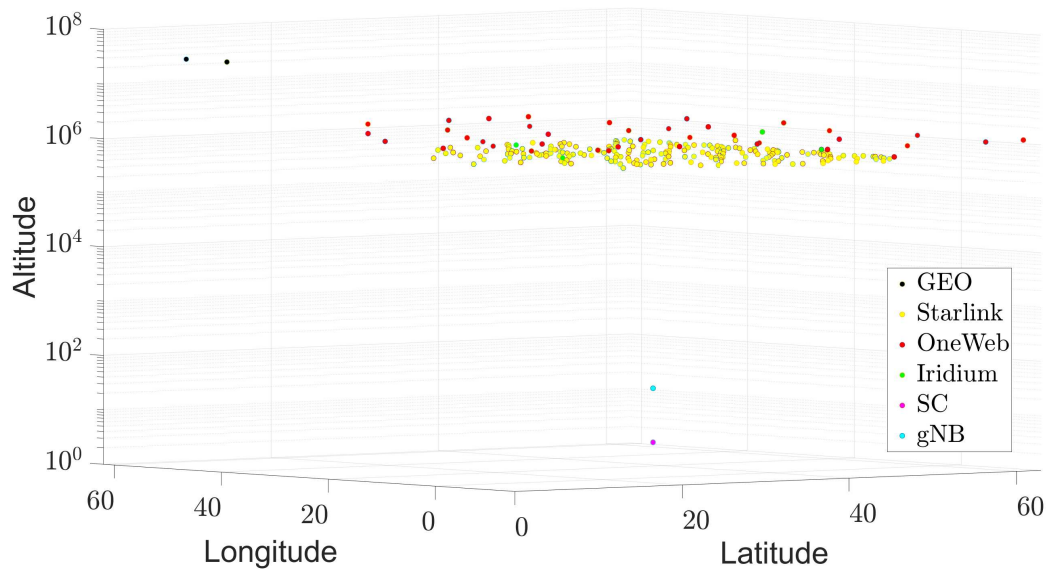
Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα των δύο αλγορίθμων και παρουσιάζονται τα σχεδιαγράμματα που εξήχθησαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Τα βασικά στοιχεία που μελετώνται στην παρούσα εργασία είναι η σύνδεση των χρηστών στους σταθμούς βάσης, η τοποθέτηση των VNF στο σύστημα, η δρομολόγηση των δεδομένων στο backhaul και η κατανάλωση ενέργειας του κάθε φυσικού μηχανήματος (physical machine). Επιπλέον, θα αναλυθούν πλήρως οι τιμές που έλαβαν οι αλγόριθμοι στο πλαίσιο της προσομοίωσης και θα παρουσιαστούν τα σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν και οι παραλλαγές τους.

4.2 Περιβάλλον Προσομοίωσης

Για την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοιώσεων MATLAB και συγκεκριμένα η έκδοση R2022b με δικαιώματα ακαδημαϊκής χρήσης. Ο υπολογιστής στον οποίο έτρεξε η προσομοίωση, και η δημιουργία των σεναρίων για αυτήν αλλά και η ίδια η προσομοίωση, έχει έναν επεξεργαστή Intel Core 7ης γενιάς, τον i5 7400, ο οποίος είναι τεχνολογίας 14 nm και έχει 4 πυρήνες με 4 λογικούς επεξεργαστές με βασική συχνότητα πυρήνων τα 3 GHz και 6 MB μνήμη Cache. Σχετικά με την μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM), είναι μεγέθους 16 GB τύπου DDR4 και συχνότητας 2133 MHz.

Στο σύστημα της παρούσας εργασίας, για το επίγειο μέρος έχουν προστεθεί ένας σταθμός βάσης τύπου μακροκυψέλης (Macro Cell-gNB) και 2 ομάδες κυψελών, οι οποίες δεν απέχουν περισσότερο από 500 μέτρα από την μακροκυψέλη και εμπεριέχουν από 4 σταθμούς βάσης τύπου μικροκυψέλης (Small Cell-SC) τοποθετημένοι έως και 100 μέτρα από το κέντρο της εκάστοτε κυψέλης. Για το δορυφορικό μέρος έχουμε 2 δορυφόρους από την εταιρεία Iridium Communications Inc., 28 από την εταιρεία OneWeb Network Access Associates Limited και 104 από την εταιρεία Space Exploration Technologies Corp. (SpaceX), οι οποίοι είναι όλοι δορυφόροι χαμηλής γήινης τροχιάς (LEO) και στο σύνολό τους αριθμούν 134, και 2 δορυφόρους γεωστατικής τροχιάς (GEO) από την εταιρεία Hellas Sat. Για τους δορυφόρους χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι αναφέρονται περιεκτικά νωρίτερα, για την εύρεση της τροχιάς τους και σε ποιο σημείο βρίσκονται για να υπάρξει ρεαλιστική αντιστοίχιση με το σημείο που λαμβάνει μέρος η προσομοίωση (Θεσσαλονίκη). Υπολογίστηκε, επιπλέον, και ο χρόνος που υπολείπεται ώστε να χάσει ο κάθε δορυφόρος οπτική επαφή με εκείνο το σημείο και αφαιρέθηκαν, στην συνέχεια, εκείνοι που δεν ικανοποιούσαν τις ελάχιστες απαιτήσεις, τόσο στον υπολειπόμενο χρόνο όσο και στην τοποθεσία.

Σχετικά με τους χρήστες, έχουμε την δημιουργία 5 διαφορετικών SFC, τα οποία περιέχουν έως και 6 διαφορετικές διεργασίες (VNFs). Αυτές οι διεργασίες είναι το NAT (Network Address Translation), το FW (Firewall), το TM (Traffic Monitor), το WOC (WAN Optimization Controller), το IDPS (Intrusion Detection/Prevention System) και το VOC (Video Optimization Controller). Περισσότερες λεπτομέρειες για το κάθε SFC ως προς τις απαιτήσεις του και την σειρά των VNF που το αποτελούν εμφανίζονται στον Πίνακα 4.1, ενώ για τις απαιτήσεις κάθε VNF στον Πίνακα 4.2.



Σχήμα 4.1: Αναλυτική παρουσίαση της τοποθεσίας των επίγειων και των δορυφορικών σταθμών, όπως αυτά λαμβάνονται στον αλγόριθμο της παρούσας εργασίας.

Τύπος (Σειρά VNF)	Ρυθμαπόδοση (Mbps)	Καθυστέρηση (ms)	Ποσοστό χρηστών (%)	Διάρκεια (sec)
Web (NAT-FW-TM- WOC-IDPS)	0.6-1	500	20	20
VoIP (NAT-FW-TM- FW-NAT)	0.384-0.64	100	20	100
Streaming (NAT-FW-TM- VOC-IDPS)	5-24	100	39	360
Gaming (NAT-FW-VOC- WOC-IDPS)	0.24-0.5	60	6	300
RT AI/ML (NAT-NAT)	15-25	1	15	40

Πίνακας 4.1: Τα 5 διαφορετικά είδη των SFCs και οι απαιτήσεις του καθενός.

Χαρακτηριστικά VNF						
Τύπος	NAT	FW	TM	VOC	WOC	IDPS
Χωρητικότητα (Mbps)	500	400	200	580	300	600
Ισχύς (GFLOPS)	110	440	55	110	110	440

Πίνακας 4.2: Τα 6 διαφορετικά είδη των VNFs και οι απαιτήσεις του καθενός.

Για τους υπολογιστικούς κόμβους που αναφέρθηκαν πριν, στην παρούσα εργασία έχουν ενσωματωθεί 4 σε κάθε ένα από τα aggregation layers, οπότε στο σύνολο υπάρχουν 8 υπολογιστικοί κόμβοι. Αναλύοντας

την υπολογιστική ισχύ του κάθε κόμβου, για τους κόμβους που έχουν δυνατότητα MEC, αυτοί έχουν 8 πυρήνες στην CPU και το μοντέλο της κατανάλωσης ενέργειας δέχεται τιμές από 55 μέχρι 70 στο $p_{max_{pm}}$ του τύπου 3.66, οι κόμβοι που είναι εξοπλισμένοι με ικανότητες fog computing έχουν 24 πυρήνες στην CPU και παίρνουν τιμές από 150 έως 220 για το $p_{max_{pm}}$, ενώ για τους κόμβους με cloud computing δυνατότητες έχουν 48 πυρήνες και για το $p_{max_{pm}}$ έχουν τιμές από 200 έως 278. Για το $p_{idle_{pm}}$ του καθενός έχει οριστεί να είναι στο 10% της μέγιστης δυνατής ισχύος.

Όσον αφορά το backhaul, σχετικά με τις ενσύρματες συνδέσεις μεταξύ των επίγειων σταθμών βάσης και των υπολογιστικών κόμβων, το εύρος ζώνης της χωρητικότητας της σύνδεσης είναι 10 Gbps. Για τις συνδέσεις mmWave μεταξύ επίγειων σταθμών το εύρος ζώνης είναι 200 MHz με συχνότητα 60 GHz, οι συνδέσεις επίγειων και δορυφορικών σταθμών έχουν εύρος ζώνης 600 MHz και συχνότητα 28 GHz, ενώ τα ISL έχουν 1 GHz εύρος ζώνης και συχνότητα 1 THz. Η κατανάλωση στα switch του ενσύρματου backhaul είναι όπου $p_{idle_{switch}}$ ίση με 315 W στο τύπο 3.68, ενώ για P_i για τα port τους έχουμε 7 W κατανάλωση για το καθένα που βρίσκεται σε λειτουργία. Για το ασύρματο backhaul στο τύπο 3.74 έχουμε όπου P_{0_i} την τιμή 3,9 W και Δ_{p_i} την τιμή 100, ενώ για το N_{TRX_i} έχουμε την τιμή 64.

Αντίστοιχα, στο κομμάτι του δικτύου πρόσβασης, για τους επίγειους σταθμούς έχουμε συχνότητα 2 GHz και το εύρος ζώνης στο κανάλι είναι 20 MHz, ενώ για τους δορυφορικούς σταθμούς έχουμε 28 GHz συχνότητα και εύρος ζώνης καναλιού 400 MHz. Για τον τύπο 3.70 έχουμε για Δ_{p_i} τιμές ίσες με 4,7 όταν είναι μακροκυπέλη, 4 όταν είναι μικροκυπέλη και, επίσης, 4 όταν είναι κάποιος δορυφόρος. Το P_{0_i} δέχεται τιμές ίσες με 130 W όταν είναι μακροκυπέλη, 6,8 W όταν είναι μικροκυπέλη ή δορυφόρος. Για το N_{TRX_i} έχουμε τις τιμές 8 για μακροκυπέλη και 4 για κάθε άλλη περίπτωση. Τέλος, έχει οριστεί όλοι οι σταθμοί βάσης να έχουν χωρητικότητα 100 resource blocks και το μέγεθος κάθε πακέτου να είναι 1,5 KB.

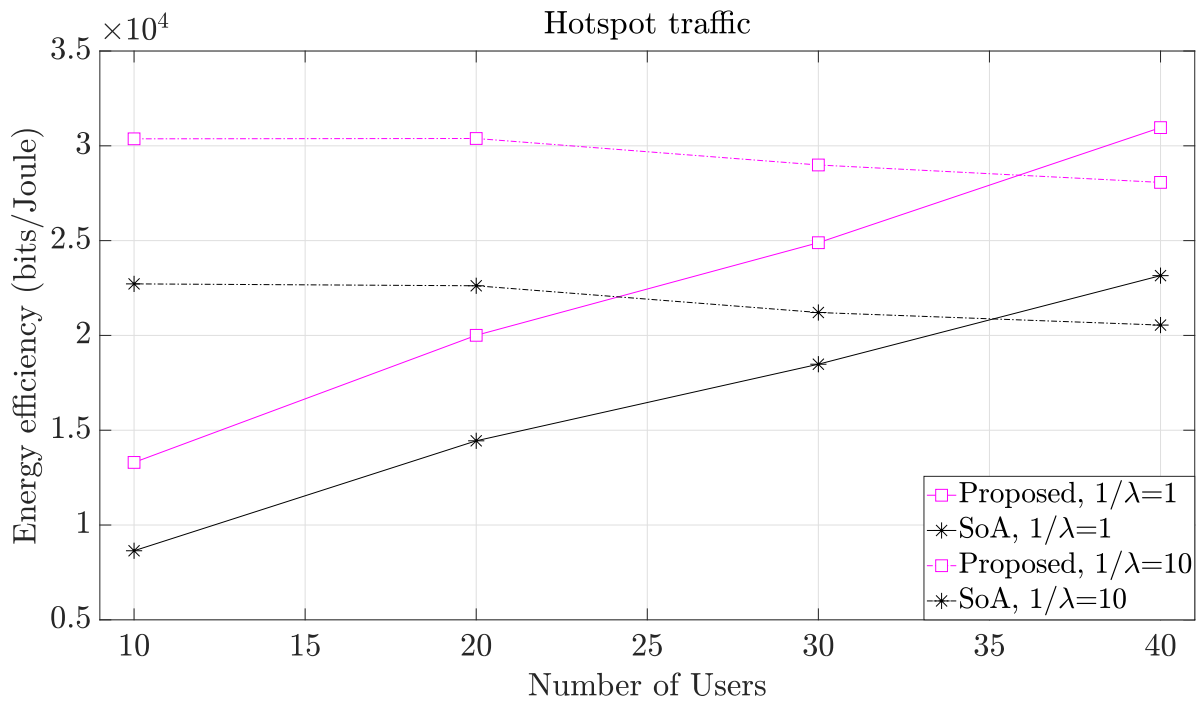
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
$P_{idle}^{(sw)}$	315 W	P_{port}	7 W	Packet length	1.5 KB
$N_{TRX_i}^{(gNB)}$	8	$N_{TRX_i}^{(SC,Sat)}$	4	$N_{TRX_i}^{(mmW)}$	64
$\Delta_{p_i}^{(gNB)}$	4.7	$\Delta_{p_i}^{(SC,Sat)}$	4	$\Delta_{p_i}^{(mmW)}$	100
$P_{0_i}^{(gNB,i)}$	130 W	$P_{0_i}^{(SC,i)}$	6.8 W	$P_{0_i}^{(mmW,i)}$	3.9 W
f_{AN-TN}	2 GHz	f_{TN}	60 GHz	$N_a^{(RB)}$	100 RBs
f_{AN-NTN}	28 GHz	f_{TN-NTN}	28 GHz	f_{ISL}	1000 GHz

Πίνακας 4.3: Οι τιμές των δεδομένων της προσομοίωσης.

Ο αλγόριθμος της βιβλιογραφίας, συγκριτικά με αυτόν της προτεινόμενης λύσης, παρουσιάζει αρκετές διαφορές ως προς τον τρόπο λειτουργίας του για την επίλυση του προβλήματος [70]. Αρχικά, η πρώτη απόφαση που λαμβάνει ο αλγόριθμος είναι για την τοποθέτηση των VNF, τα οποία τοποθετεί στον κόμβο με το μεγαλύτερο betweenness centrality και, στην συνέχεια, επιλέγει την διαδρομή με την μικρότερη καθυστέρηση, η οποία είναι το μοναδικό του κριτήριο, ενώ για το user association συνδέει τον χρήστη με το σταθμό που έχει το μεγαλύτερο SINR. Από την άλλη ο προτεινόμενος αλγόριθμος ξεκινάει κάνοντας πρώτα το user association δίνοντας βάση στην διαδρομή με την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και, έπειτα, συνεχίζει με την τοποθέτηση των VNF, δίνοντας βάση και στο φόρτο που έχει η CPU του κάθε κόμβου αλλά και στο closeness centrality.

4.3 Αποτελέσματα

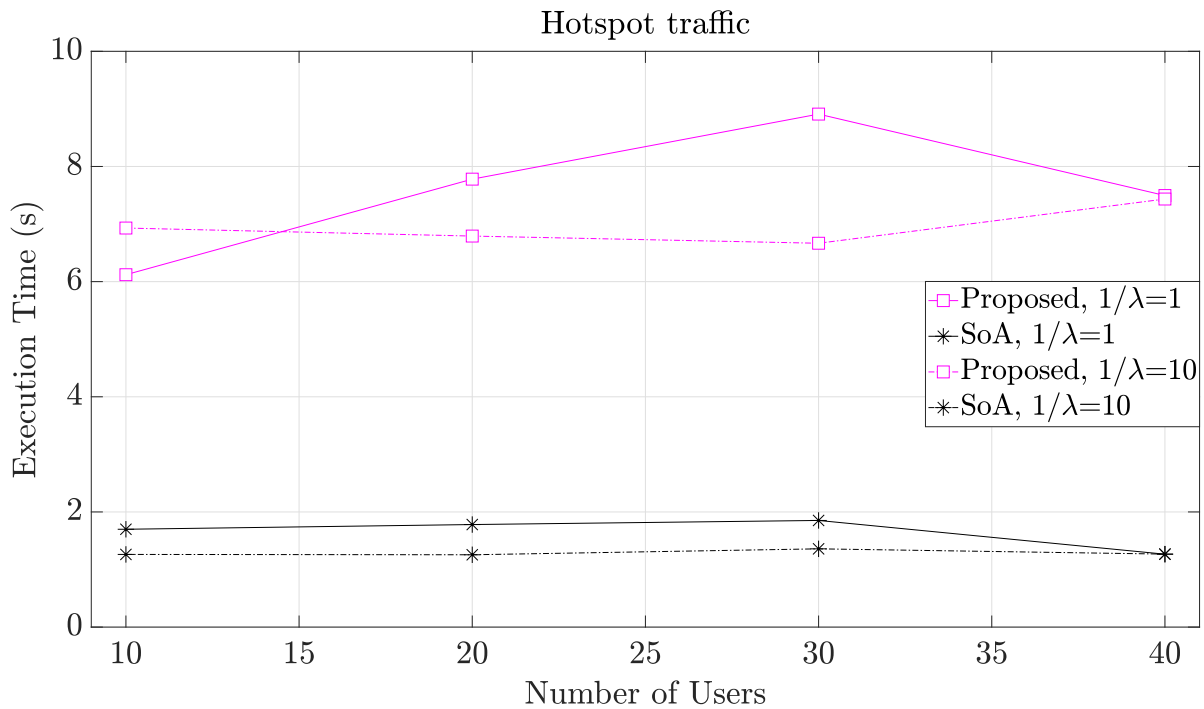
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα από την σύγκριση της προτεινόμενης λύσης σε σχέση με την βιβλιογραφία. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν 10, 20, 30 και 40 χρήστες σε 10 διαφορετικά σενάρια, στα οποία οι σταθμοί βάσης ανά σενάριο μένουν στάσιμοι, ενώ οι χρήστες αλλάζουν την τοποθεσία τους 10 φορές ανά σενάριο, για να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η κινητικότητα τους. Επίσης, ο ρυθμός με τον οποίο εμφανίζονται οι χρήστες στο σύστημα έχει δύο στάδια, στο πρώτο οι χρήστες εισάγονται ανά 1 δευτερόλεπτο κατά μέσο όρο, ενώ στο δεύτερο εισάγονται ανά 10 δευτερόλεπτα κατά μέσο όρο.



Σχήμα 4.2: Ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$ και $1/\lambda=10$.

Παρατηρώντας την εικόνα 4.2, βλέπουμε την διαφορά στην μέση ενεργειακή αποδοτικότητα του συνολικού συστήματος σε διάφορες στιγμές. Για $1/\lambda=10$, που σημαίνει ότι οι χρήστες εισέρχονται στο σύστημα κάθε 10 δευτερόλεπτα κατά μέσο όρο, παρατηρείται πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε σχέση με την βιβλιογραφία κάθε στιγμή της προσομοίωσης. Επιπλέον, μετά τους 20 χρήστες, φαίνεται να υπάρχει μία φθίνουσα κλίση στην απόδοση της ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι, στους 30 και στους 40 χρήστες, οι αλγόριθμοι έχουν ήδη εξυπηρετήσει κάποιους από τους χρήστες, οι οποίοι στην συνέχεια αποχωρούν από το σύστημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος που είναι εκθέτης στον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης. Αντίθετα, για $1/\lambda=1$, δεν παρατηρείται φθίνουσα πορεία στους περισσότερους χρήστες, επειδή η χρονική απόσταση που εμφανίζονται είναι κάθε 1 δευτερόλεπτο κατά μέσο όρο. Αυτό σημαίνει πως, οι χρήστες συσσωρεύονται στο σύστημα και το συνολικό πλήθος τους απαιτεί μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση για την ικανοποίηση όλων. Έτσι, με την αύξηση της ροής των χρηστών το σύστημα οδηγείται στην όλο και μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Στο σύνολό του ο προτεινόμενος αλγόριθμος φτάνει μέχρι και 54% καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο της βιβλιογραφίας, ενώ η μέση απόδοση στην διαφορά

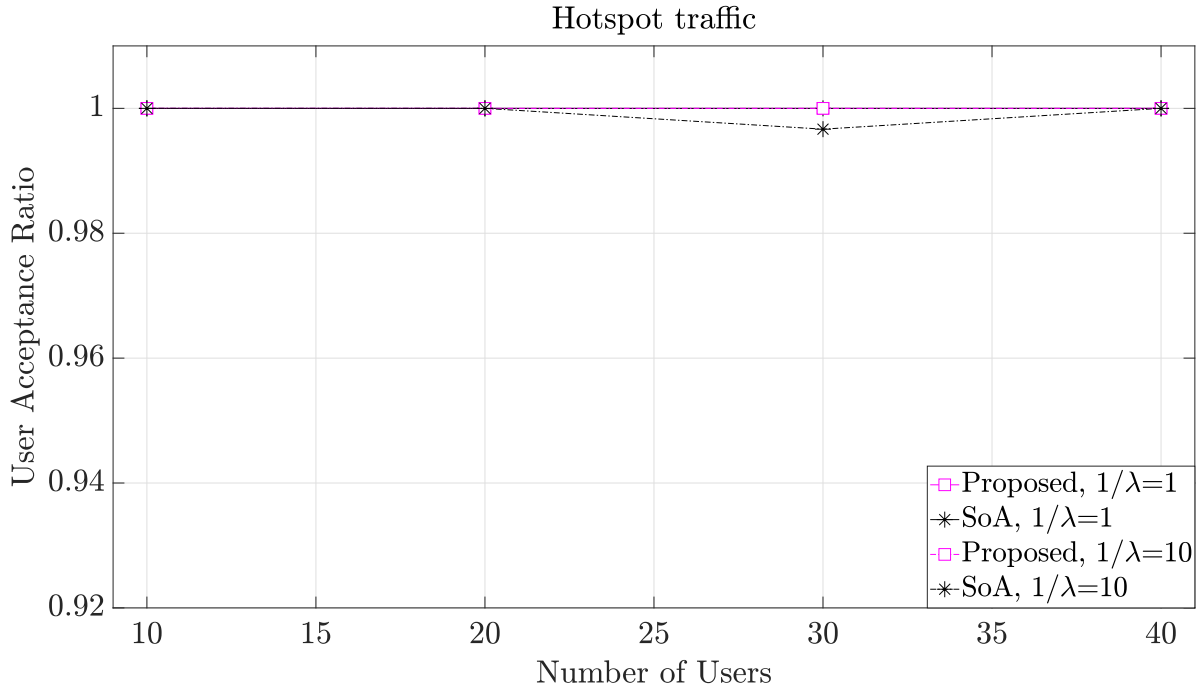
τους είναι 35%.



Σχήμα 4.3: Ο χρόνος εκτέλεσης του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$ και $1/\lambda=10$.

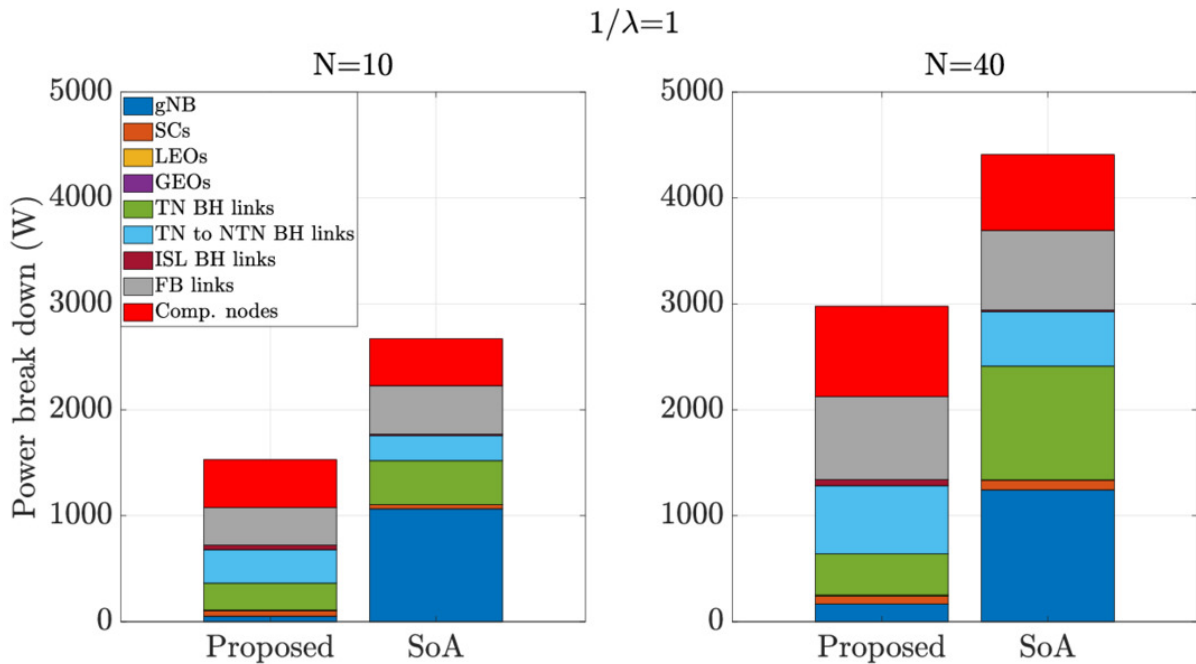
Στην εικόνα 4.3 αναλύεται ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του κάθε αλγορίθμου. Σε αυτήν φαίνεται πως η προτεινόμενη λύση έχει μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης σε κάθε κατάσταση του συστήματος σε σχέση με την βιβλιογραφία, πράγμα το οποίο οφείλεται, κυρίως, στην μεγαλύτερη πολυπλοκότητα του αλγορίθμου. Σε αυτό προστίθεται και το γεγονός πως η προσομοίωση έτρεξε σε προσωπικό υπολογιστή, ο οποίος δεν προορίζεται για έντονη υπολογιστική χρήση και αποτελείται από ξεπερασμένο hardware. Από αυτό καταλαβαίνουμε πως σε κάποιο ισχυρότερο μηχάνημα, όπως έναν σέρβερ, πάλι η προτεινόμενη λύση θα ήταν πιο απαιτητική σε χρόνο αλλά ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης θα ήταν σε πιο φυσιολογικά επίπεδα. Σχετικά με την προτεινόμενη λύση στο γράφημα, η ανωμαλία που παρουσιάζει στο σύνολο της, οφείλεται στο μικρό πλήθος δειγμάτων που πάρθηκε (10 σενάρια με 10 επαναλήψεις το καθένα) για λόγους απλοποίησης του όλου συστήματος, ώστε να μπορεί να τρέξει στο παραπάνω μηχάνημα χωρίς προβλήματα. Στην περίπτωση που είχε ληφθεί ένα μεγαλύτερο σύνολο από πιθανά σενάρια, η χρονικές παραστάσεις αναμένεται να μην παρουσίαζαν τέτοια καμπυλότητα και να ήταν περισσότερο γραμμικές.

Στην εικόνα 4.4 φαίνεται η μέση αποδεκτικότητα των χρηστών στο σύστημα. Και οι δύο αλγόριθμοι τα πηγαίνουν εξαιρετικά καλά, με ένα μικρό ποσοστό των χρηστών να μην μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον αλγόριθμο της βιβλιογραφίας στα σενάρια που αφορούν 30 χρήστες και για $1/\lambda=10$. Αυτό οφείλεται αποκλειστικά στις απαιτήσεις των σεναρίων, στα οποία σενάρια για 30 χρήστες εμφανίζεται πολλοί από αυτούς να έχουν τις πιο απαιτητικές διεργασίες σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια. Σε αυτό προστίθεται και το γεγονός ότι, το πρόβλημα δημιουργείται για $1/\lambda=10$, όταν δηλαδή οι χρήστες καταφθάνουν πιο αραιά στο σύστημα, το οποίο επιβεβαιώνει πως το πρόβλημα βρίσκεται στην δημιουργία πιο περίπλοκων σεναρίων στα αυτά με τους 30 χρήστες. Εδώ, όμως, φαίνεται και η καλύτερη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων του προτεινόμενου αλγορίθμου, μιας και σε αυτό το σενάριο δεν έχει απορρίψει κανένα χρήστη,



Σχήμα 4.4: Η αποδεκτικότητα των χρηστών του συστήματος ως προς τον αριθμό τους για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$ και $1/\lambda=10$.

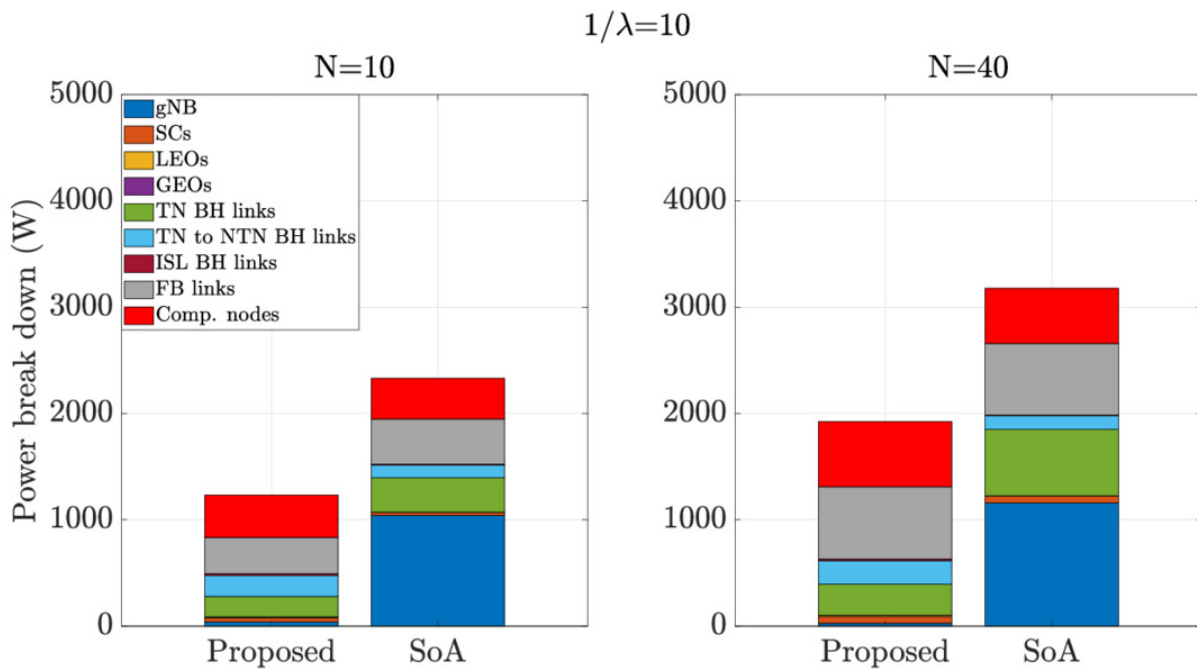
καταφέρνοντας στο σύνολό του να διατηρήσει μέγιστη την αποδεκτικότητα του στους χρήστες.



Σχήμα 4.5: Η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$.

Όσον αφορά στην μέση κατανάλωση ενέργειας στα δύο συστήματα, στην εικόνα 4.5 βλέπουμε το πόση ενέργεια καταναλώνει κάθε κατηγορία από φυσικά μηχανήματα για τα σενάρια που αφορούν $1/\lambda=1$. Εδώ, είναι εμφανές η διαφορά, ανάμεσα στον προτεινόμενο αλγόριθμο και στην βιβλιογραφία. Και στα σενάρια που αφορούν 10 χρήστες και για 40 χρήστες, βλέπουμε πως ο αλγόριθμος της βιβλιογραφίας

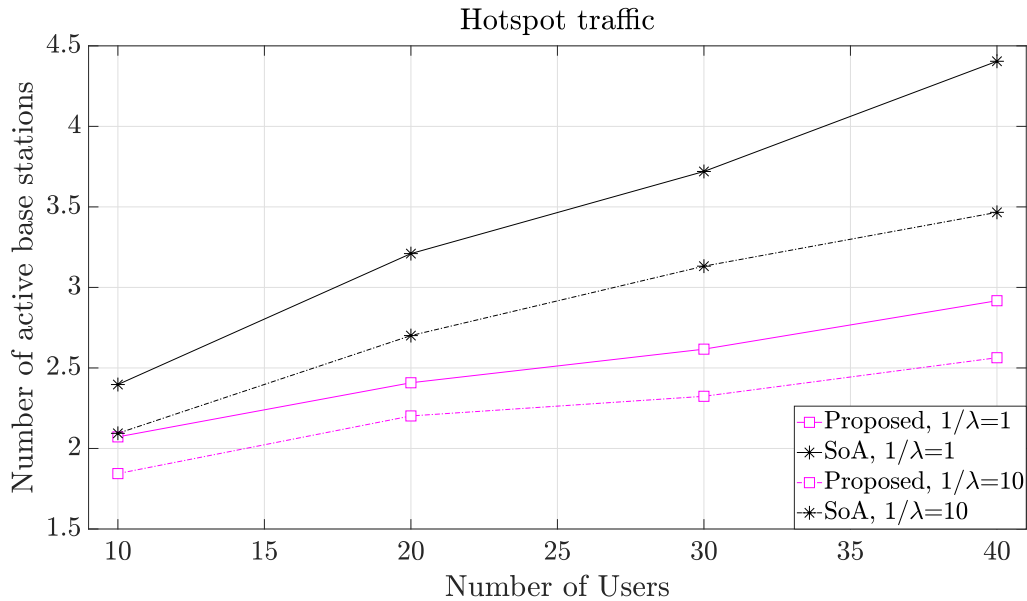
ας προτιμάει να αξιοποιεί περισσότερο την μακροκυνέλη (gNB) που έχει περισσότερη υπολογιστική ισχύ, όμως καταναλώνει πολύ περισσότερη ενέργεια. Επιπλέον, η προτεινόμενη λύση φαίνεται να χρησιμοποιεί περισσότερο το ενοποιημένο σύστημα μιας και η κατανάλωση ενέργειας στο backhaul μεταξύ επίγειων και δορυφορικών σταθμών (TN to NTN BH) και αναμεταξύ των δορυφόρων (ISL) είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την βιβλιογραφία. Τέλος, βλέπουμε ότι και στους δύο αλγόριθμους η κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους επεξεργασίας (Computational nodes) και στο ενσύρματο backhaul (FB links) με οπτικές ίνες είναι σχεδόν ίδια, οπότε καταλαβαίνουμε ότι η αξιοποίησή τους είναι παρόμοια. Στα σενάρια με τους 10 ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει 42% μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, ενώ στα σενάρια με τους 40 χρήστες η διαφορά τους είναι στο 32%.



Σχήμα 4.6: Η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$.

Αντίστοιχα, στην εικόνα 4.6 βλέπουμε το πόση ενέργεια καταναλώνει κάθε κατηγορία φυσικών μηχανημάτων για τα σενάρια που αφορούν $1/\lambda=10$. Ομοίως και εδώ παρατηρείται πως η βιβλιογραφία χρησιμοποιεί κατά πολύ περισσότερο την μακροκυνέλη, ενώ ο προτεινόμενος αλγόριθμος την χρησιμοποιεί ελάχιστα. Επίσης, συγκρίνοντας την και με την εικόνα 4.5, βλέπουμε πως η διαφορά στο λ κάνει σημαντικά διαφορετική την κατανάλωση ενέργειας του κάθε αλγόριθμου. Στην περίπτωση που το $1/\lambda=1$, λόγω της πιο σύντομης εισαγωγής των χρηστών στο σύστημα, έχουμε μεγαλύτερη επιβάρυνση και στους δύο αλγόριθμους, που έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη κατανάλωση, ενώ για $1/\lambda=10$, που σημαίνει ότι οι χρήστες μπαίνουν στο σύστημα με 10 φορές πιο αργό ρυθμό κατά μέσο όρο, η κατανάλωση δεν είναι τόσο αυξημένη. Ειδικά για τα σενάρια που αφορούν 40 χρήστες, παρατηρείται η διαφορά στην συνολική κατανάλωση να παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερη αύξηση στην πρώτη περίπτωση σε σχέση με την δεύτερη. Αυτό συμβαίνει διότι, στους περισσότερους χρήστες έχουμε και μεγαλύτερη στο σύνολο διάρκεια του συστήματος (μέχρι να ολοκληρώσουν όλοι τις διεργασίες τους) αλλά και ότι στην δεύτερη περίπτωση πολλοί από τους χρήστες προλαβαίνουν να ολοκληρώσουν τις διεργασίες τους νωρίτερα από ότι εμφανίζονται οι επόμενοι χρήστες, και λόγω του συνολικού πλήθους η διαφορά στην κατανάλωση γίνεται εντονότερη σε σύγκριση με τα σενάρια που αφορούν 10 χρήστες. Συγκεκριμένα, η κατανάλωση

ενέργειας για τα σενάρια με τους 10 χρήστες για τον προτεινόμενο αλγόριθμο είναι 47% μικρότερη από αυτήν της βιβλιογραφίας και στα σενάρια με τους 40 χρήστες το ποσοστό αυτό είναι 39%.

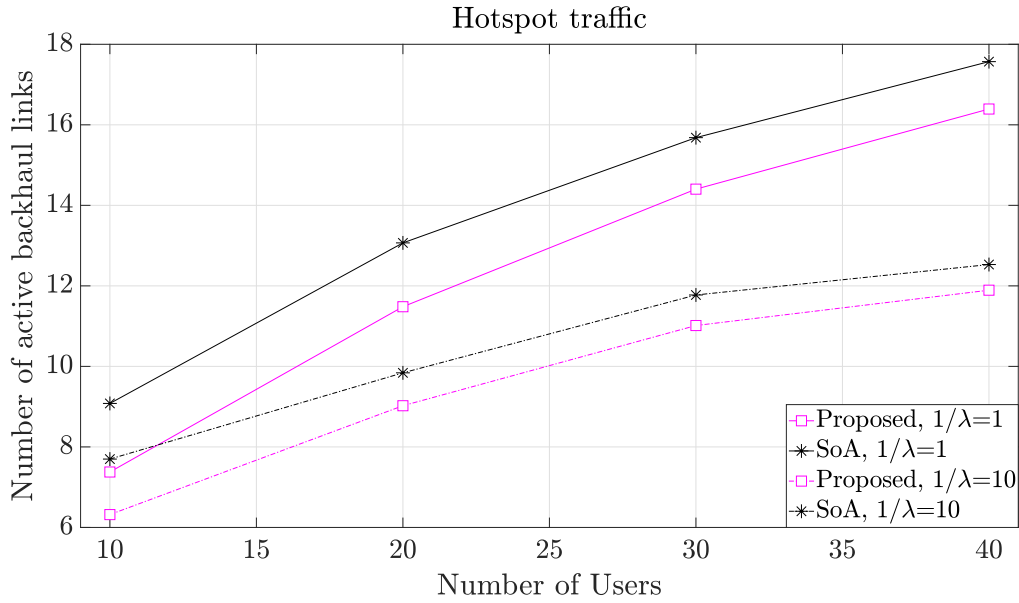


Σχήμα 4.7: Η μέση ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$ και $1/\lambda=10$.

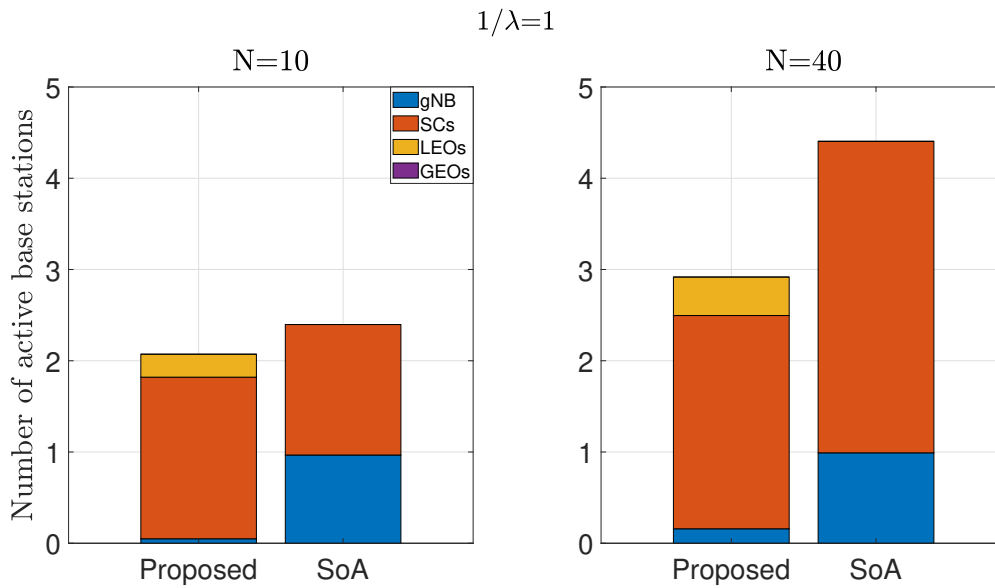
Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζεται ο μέσος αριθμός των ενεργών σταθμών βάσης για κάθε σενάριο και για κάθε λ . Με μία πρώτη ματιά, παρατηρείται πως η προτεινόμενη λύση για κάθε σενάριο και εκδοχή έχει πάντα λιγότερους ενεργούς σταθμούς σε σχέση με την βιβλιογραφία, πράγμα το οποίο σημαίνει πως η κατανάλωση του συστήματος είναι μικρότερη και η ενεργειακή απόδοση καλύτερη. Ένα ακόμα συμπέρασμα που βγαίνει από το γράφημα είναι ότι και στους δύο αλγορίθμους όταν αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται και ο αριθμός των ενεργών σταθμών, μιας και ο φόρτος εργασίας είναι πλέον μεγαλύτερος και για να διεκπεραιωθεί χρειάζεται περισσότερη υπολογιστική δύναμη. Επιπλέον, αν συγκρίνουμε τους αλγορίθμους σε σχέση με το λ , είναι εμφανές πως όταν μιλάμε για $1/\lambda=1$ η ανάγκη για περισσότερη υπολογιστική ισχύ είναι εντονότερη λόγω της αυξημένης έλευσης των χρηστών, ενώ για $1/\lambda=10$ η ανάγκη αυτή είναι μικρότερη και για αυτό παρατηρούμε να υπάρχουν λιγότεροι ενεργοί σταθμοί σε αυτήν την περίπτωση.

Στην εικόνα 4.8 παρουσιάζεται ο μέσος αριθμός του συνολικού ενεργού backhaul για κάθε σενάριο και για κάθε λ . Αρχικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως και σε αυτή την κατηγορία ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει καλύτερη επίδοση σε σχέση με αυτόν της βιβλιογραφίας. Με την ίδια λογική και από νωρίτερα, βλέπουμε και τους δύο αλγορίθμους να ζορίζονται περισσότερο για $1/\lambda=1$, με αποτέλεσμα να υπάρχουν περισσότερα ενεργά links για τα σενάρια που αφορούν τη συγκεκριμένη περίπτωση, ενώ αντίστοιχα για $1/\lambda=10$ υπάρχουν λιγότερα ενεργά links στο backhaul.

Όσον αφορά στην εικόνα 4.9, αυτή δείχνει αναλυτικά την μέση χρήση των σταθμών βάσης για τα σενάρια που έχουν 10 και 40 χρήστες και για την περίπτωση που $1/\lambda=1$. Σε αυτή την εικόνα φαίνεται ακόμα πιο καθαρά η διαφορά στους δύο αλγορίθμους, ως προς την αξιοποίηση του ενοποιημένου συνολικού δικτύου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η χρήση των γεωστατικών δορυφόρων δεν χρειάζεται στα συγκεκριμένα σενάρια, λόγω της, σχετικά μικρής, δειγματοληψίας χρηστών. Σε περιπτώσεις που οι



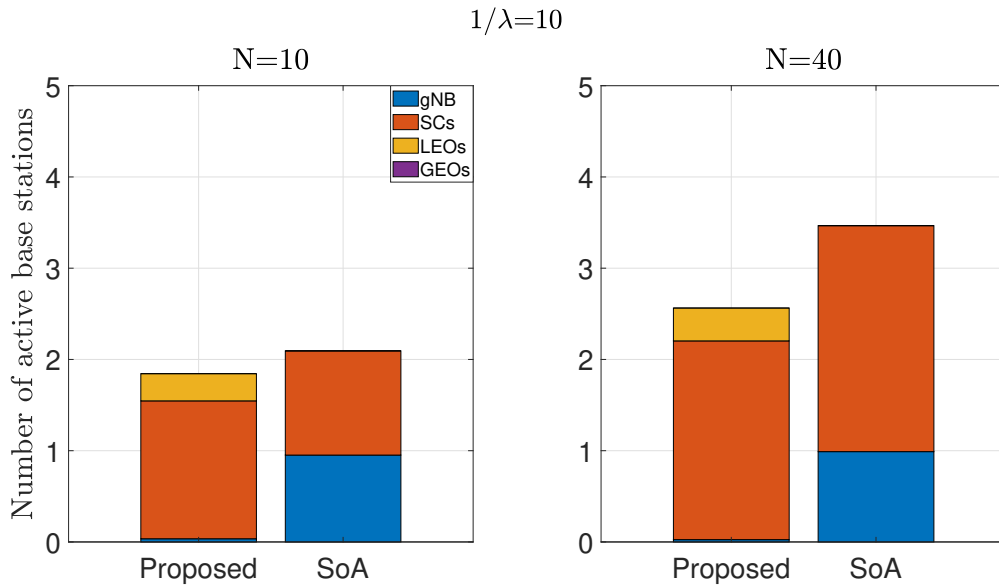
Σχήμα 4.8: Η μέση ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$ και $1/\lambda=10$.



Σχήμα 4.9: Αναλυτική μέση ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$.

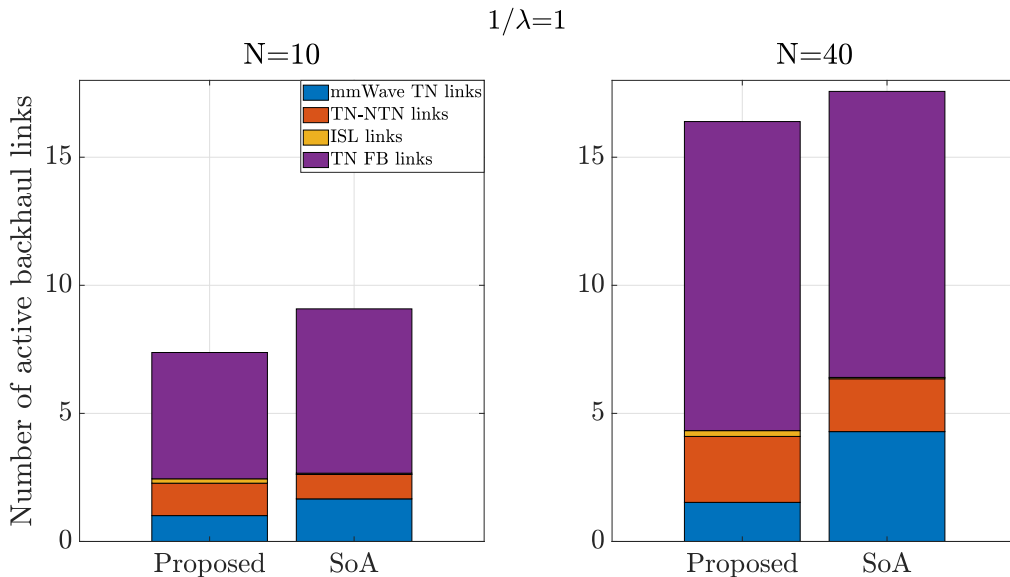
χρήστες ήταν περισσότεροι και οι διεργασίες που εκτελούσαν ήταν αρκετά πιο απαιτητικές είναι πολύ πιθανό να βλέπαμε και τους γεωστατικούς δορυφόρους να ήταν ενεργοποιημένοι. Παρόλα αυτά, βλέπουμε πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος δεν χρησιμοποιεί σχεδόν καθόλου την μακροκυνέλη, και προτιμάει να διαμοιράζει τον υπολογιστικό φόρτο στις μικροκυνέλες και στα δορυφόρους χαμηλής γεωστατικής τροχιάς, οι οποίοι έχουν αρκετά μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Αντίστοιχα με την εικόνα 4.9, και στην εικόνα 4.10 μπορούμε να κάνουμε τις ίδιες παρατηρήσεις. Βλέπουμε, λοιπόν, τον προτεινόμενο αλγόριθμο να παρουσιάζει καλύτερη επίδοση, έχοντας λιγότερους ενεργούς σταθμούς σε σύγκριση με την αλγόριθμο της βιβλιογραφίας. Επίσης, παρατηρούμε πως ακόμα



Σχήμα 4.10: Αναλυτική μέση ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$.

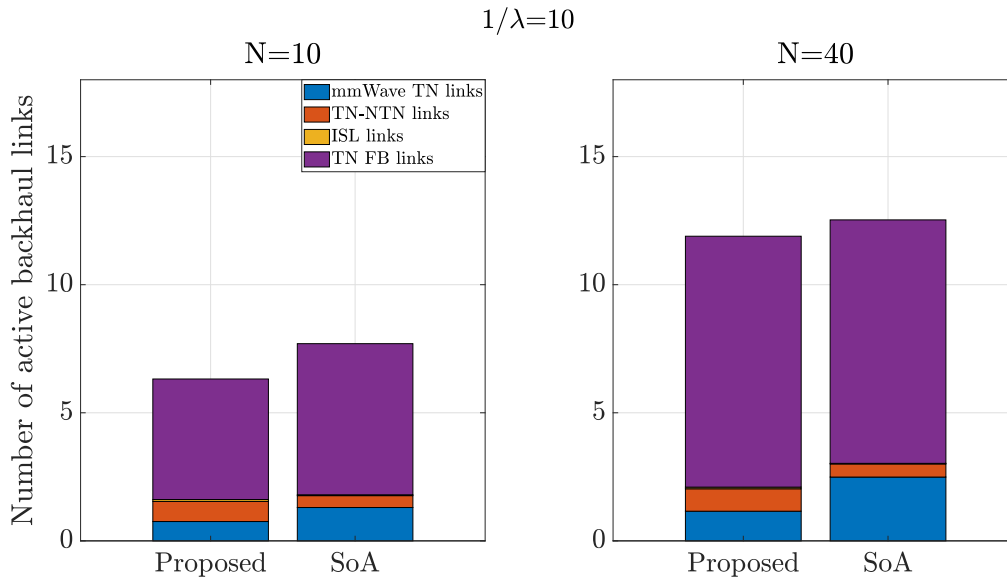
και με $1/\lambda=10$, που σημαίνει ότι οι αλγόριθμοι μπορούν να μοιράσουν καλύτερα το φόρτο εργασίας, και πάλι η βιβλιογραφία χρησιμοποιεί τη μακροκυψέλη σε μεγάλο βαθμό και δεν εκμεταλλεύεται τα δορυφορικά δίκτυα, ενώ ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί την μακροκυψέλη ελάχιστα και στις δύο περιπτώσεις με τους 10 και τους 40 χρήστες και, επιπλέον, εκμεταλλεύεται την ύπαρξη των δορυφορικών δικτύων, που οδηγεί στην μειωμένη κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα.



Σχήμα 4.11: Αναλυτική μέση ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$.

Στην συνέχεια, και στην εικόνα 4.11, φαίνεται αναλυτικά ο μέσος αριθμός των ενεργών links στο backhaul για $1/\lambda=1$. Και στις δύο περιπτώσεις για 10 και 40 χρήστες, βλέπουμε και τους δύο αλγορίθμους να στη-

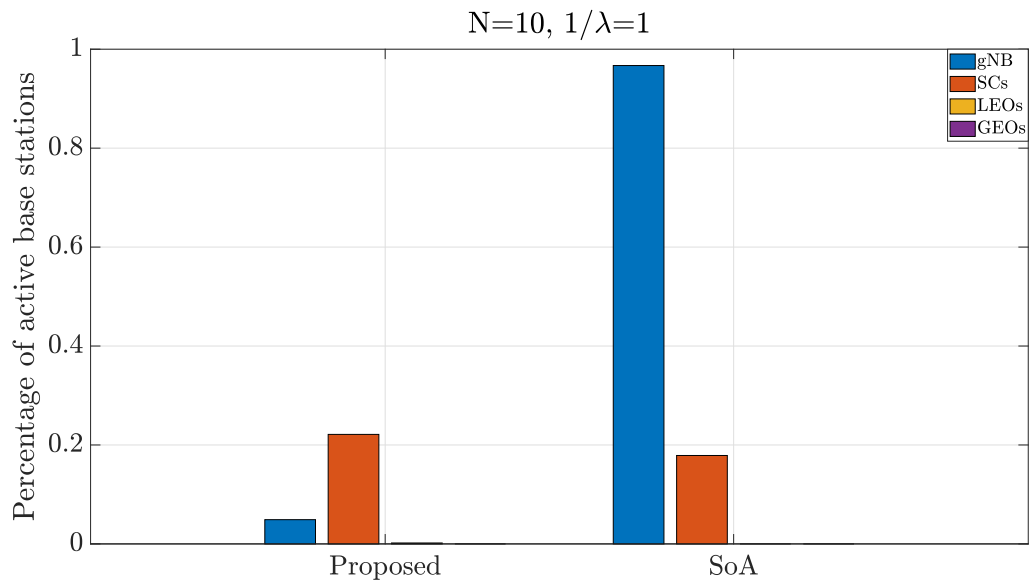
ρίζονται στο μεγαλύτερο μέρος στις οπτικές ίνες για το backhaul, οι οποίες έχουν μικρή κατανάλωση και ικανοποιητικό εύρος ζώνης. Συγκρίνοντας τους δύο αλγόριθμους μεταξύ τους όμως, βλέπουμε τον προτεινόμενο αλγόριθμο να χρησιμοποιεί λιγότερο τα mmWave links ανάμεσα στους επίγειους σταθμούς, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη κατανάλωση και να αξιοποιεί λίγο περισσότερο τις συνδέσεις μεταξύ επίγειων και δορυφορικών σταθμών αλλά και τα Inter Satellite Links (ISL), που ενώνουν δορυφόρο με δορυφόρο, σε σύγκριση με τον αλγόριθμο της βιβλιογραφίας. Παρόλα αυτά αξίζει να αναφερθεί πως ο αλγόριθμος της βιβλιογραφίας χρησιμοποιεί το ενοποιημένο σύστημα στο backhaul, σε σύγκριση με το δίκτυο πρόσβασης (Access Network) που δεν το χρησιμοποιεί καθόλου.



Σχήμα 4.12: Αναλυτική μέση ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος ως προς τον αριθμό των χρηστών για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$.

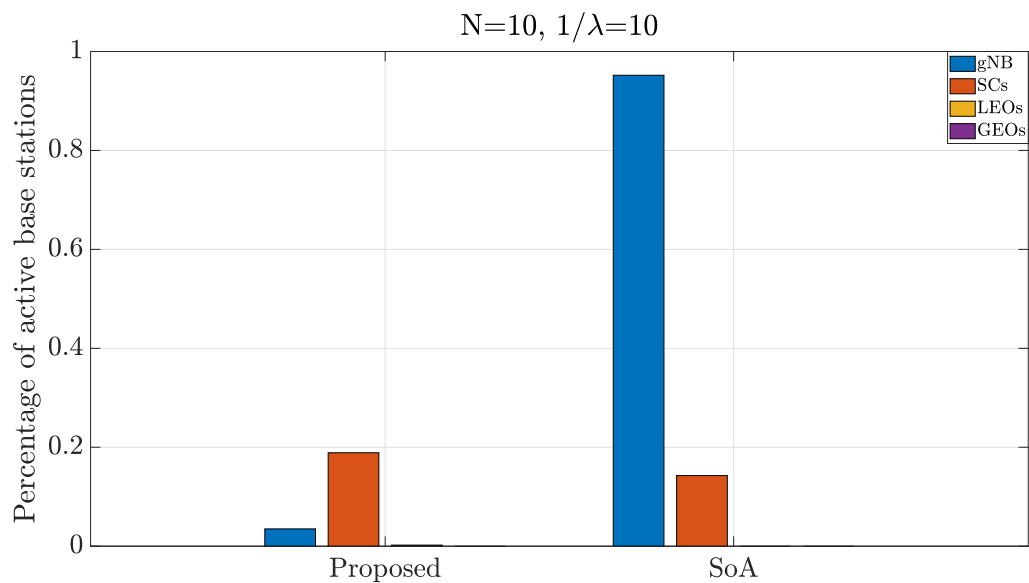
Στην εικόνα 4.12 παρουσιάζεται ο μέσος αριθμός των ενεργών links στο backhaul για $1/\lambda=10$. Στο σύνολό τους ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις με την εικόνα 4.11. Η βασική διαφορά είναι ότι στην παρούσα εικόνα, επειδή αναφερόμαστε στον μειωμένο ρυθμό έλευσης των χρηστών παρατηρείται και στους δύο αλγόριθμους πως το backhaul στηρίζεται σε συντριπτικό βαθμό στα links που αφορούν οπτικές ίνες. Το συμπέρασμα εδώ είναι πως η κατανάλωση είναι αρκετά μειωμένη συγκριτικά με τα σενάρια με $1/\lambda=1$, αφού οι υπόλοιπες συνδέσεις είναι ελάχιστες, ειδικά στον προτεινόμενο αλγόριθμο. Επίσης, και σε αυτή την εικόνα αν συγκρίνουμε τους δύο αλγόριθμους, βλέπουμε αυτόν της προτεινόμενης λύσης να είναι καλύτερος σε σχέση με αυτόν της βιβλιογραφίας, όχι όμως σε κάποιο συντριπτικό ποσοστό, πράγμα το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι είναι για $1/\lambda=10$, οπότε δεν φορτώνονται πολύ οι συνδέσεις στο backhaul.

Στην εικόνα 4.13 απεικονίζεται η μέση ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών βάσης ως προς το σύνολό τους για τα σενάρια που έχουν 10 χρήστες και $1/\lambda=1$. Εδώ διακρίνεται πως, ο αλγόριθμος της βιβλιογραφίας χρησιμοποιεί στο μέγιστο την μακροκυψέλη και δίνει την ευκαιρία στις μικροκυψέλες για να εξυπηρετήσουν τους χρήστες σε δεύτερο χρόνο. Αντίθετα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος αξιοποιεί αρκετά περισσότερο τις μικροκυψέλες και αποφεύγει την χρήση της μακροκυψέλης, ενώ αξιοποιεί και το ενσωματωμένο, πλέον, δορυφορικό σύστημα, έχοντας ενεργούς κάποιους από τους δορυφόρους χαμηλής γήινης τροχιάς. Στο διάγραμμα είναι δύσκολο να διακριθούν οι τιμές των LEOs, λόγω του ότι



Σχήμα 4.13: Ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος για 10 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$.

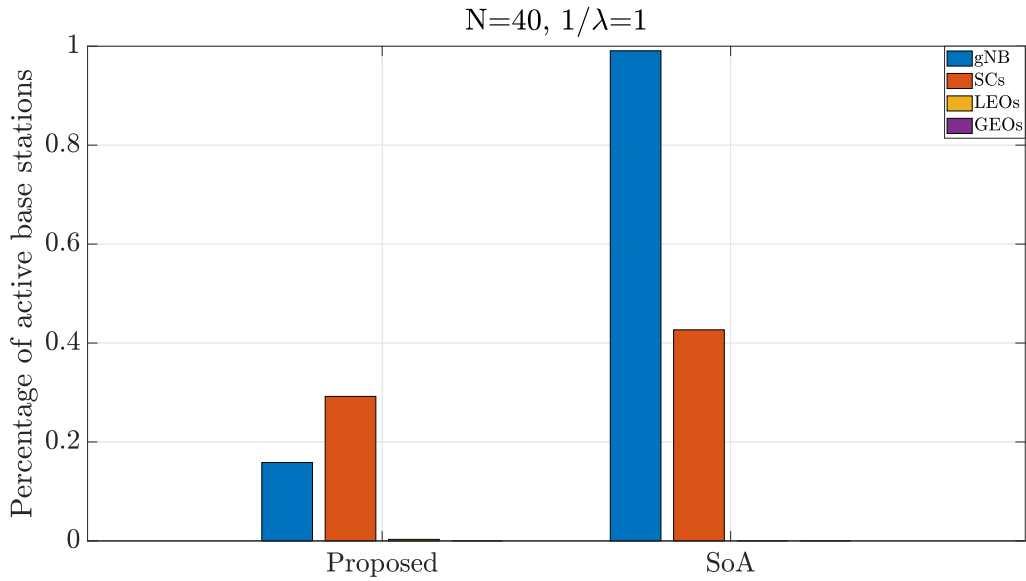
είναι πολύ μεγάλο το σύνολό τους σε σχέση με τους ενεργούς (0,18%).



Σχήμα 4.14: Ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος για 10 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$.

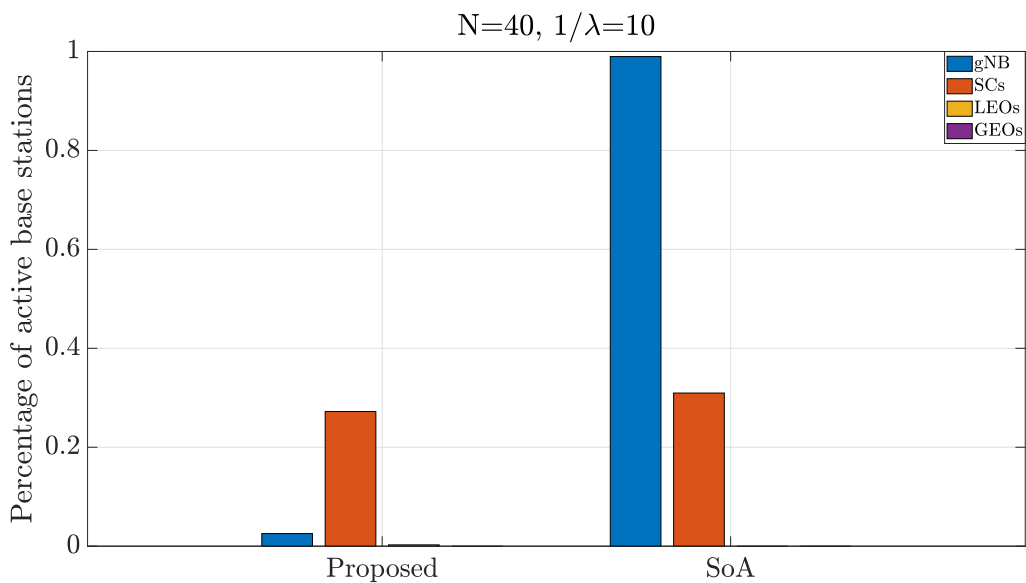
Στην περίπτωση της εικόνας 4.14, έχουμε την μέση ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών βάσης για τα σενάρια που αριθμούν 10 χρήστες, αλλά με $1/\lambda=10$. Οι παρατηρήσεις που εξάγονται από την συγκεκριμένη εικόνα είναι οι ίδιες και με την περίπτωση των 10 χρηστών με $1/\lambda=1$, ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει βέλτιστη απόδοση σε σύγκριση με την βιβλιογραφία κάνοντας καλύτερη ανάθεση του φόρτου. Σε αυτή την περίπτωση το ποσοστό των μέσων ενεργών δορυφόρων χαμηλής τροχιάς είναι 0,22%.

Στην εικόνα 4.15 διακρίνεται η μέση ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών για τα πιο απαιτητικά σε-



Σχήμα 4.15: Ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος για 40 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$.

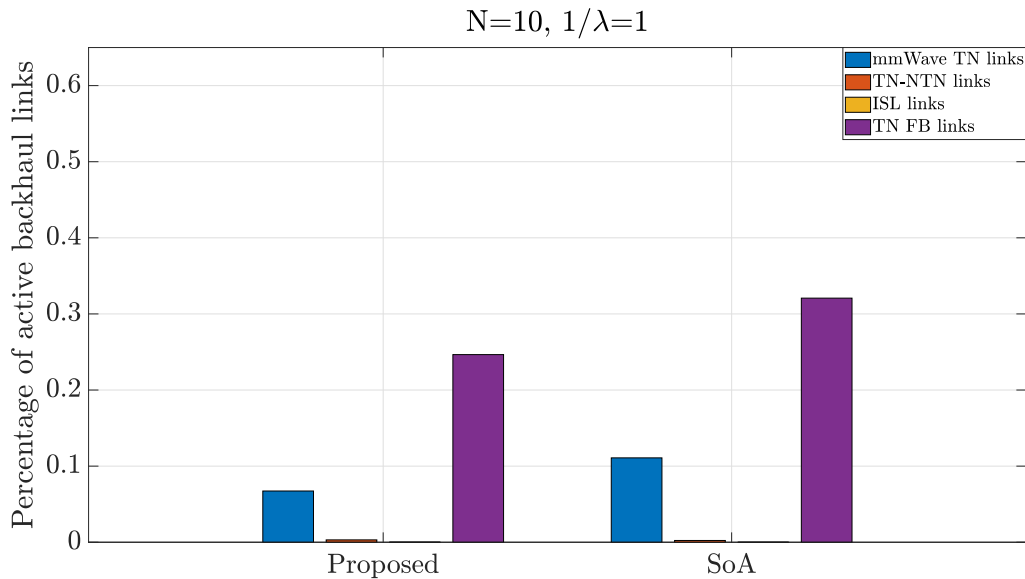
νάρια, αυτά με τους 40 χρήστες και $1/\lambda=1$. Ακόμα και σε αυτά τα σενάρια, παρατηρείται πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποδίδει πολύ καλύτερα από αυτόν της βιβλιογραφίας, επιμένοντας να κρατάει σε χαμηλή χρήση την μακροκυψέλη και κάνοντας καλύτερη διαχείριση στο φόρτο. Επιπλέον, η βιβλιογραφία πάλι δεν αξιοποιεί την ύπαρξη των δορυφόρων, ενώ για τον προτεινόμενο αλγόριθμο το μέσο ποσοστό των ενεργών LEOs είναι στα 0,31%.



Σχήμα 4.16: Ποσοστιαία ενεργοποίηση των σταθμών βάσης του συστήματος για 40 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$.

Για την εικόνα 4.16, η οποία αναφέρεται στα αντίστοιχα σενάρια 40 χρηστών με $1/\lambda=10$, τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν κατά πολύ. Κάτι που αξίζει να αναφερθεί εδώ, είναι η διαφορά που παρατηρείται στην ενεργοποίηση της μακροκυψέλης, ενώ το ποσοστό των μικροκυψελών απέχει ελάχιστα (3%), κά-

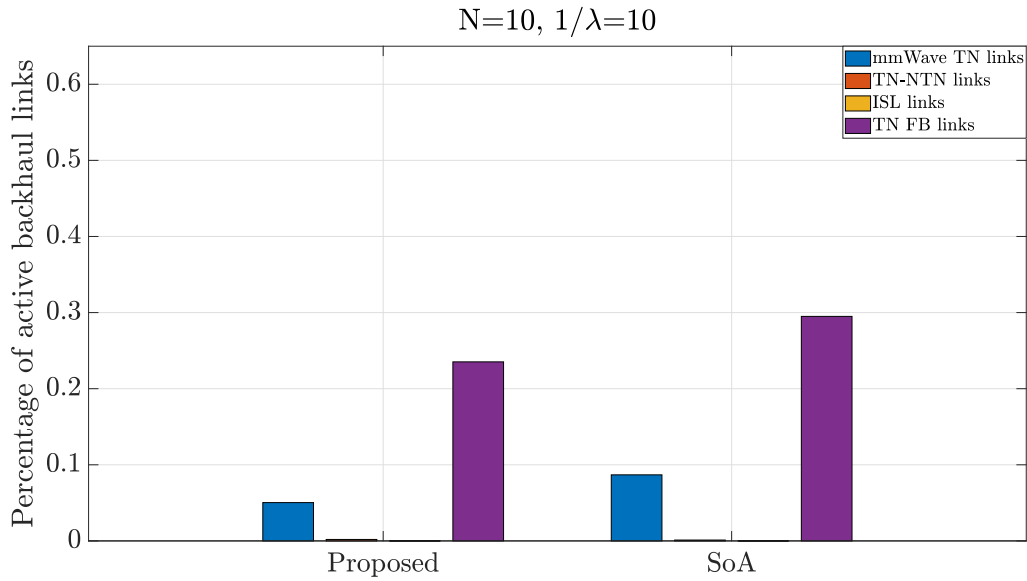
νοντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο να ξεχωρίζει κατά πολύ με το αντίστοιχο ποσοστό για τους LEOs εδώ να βρίσκεται στο 0,26%.



Σχήμα 4.17: Ποσοστιαία ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος για 10 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$.

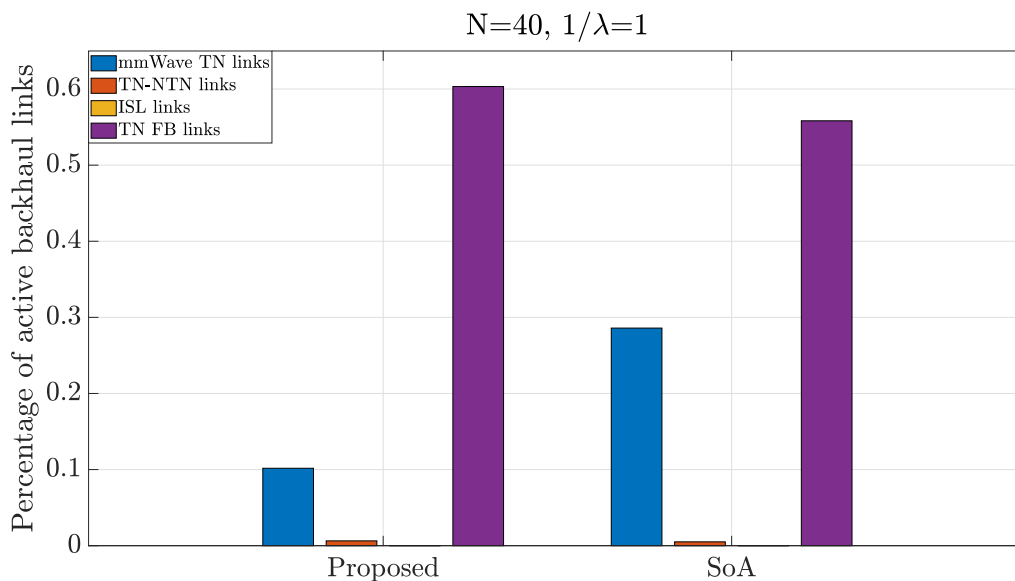
Συνεχίζοντας με το backhaul μέρος του συστήματος, στην εικόνα 4.17 διακρίνεται το μέσο ποσοστό χρήσης της κάθε κατηγορίας για το backhaul όταν έχουμε 10 χρήστες και $1/\lambda=1$. Παρατηρώντας την εικόνα, διακρίνεται πως και οι δύο αλγόριθμοι προτιμούν την χρήση του ενσύρματου δικτύου περισσότερο από τις υπόλοιπες επιλογές. Αυτό είναι μία επιθυμητή επιλογή, μιας και το ενσύρματο μέρος του backhaul έχει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τα υπόλοιπα. Έπειτα, είναι εμφανές πως ανάμεσα στους δύο αλγορίθμους, ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει μικρότερα ποσοστά χρήσης έναντι της βιβλιογραφίας, που προτρέπει στο συμπέρασμα ότι η διαχείριση του στις απαιτήσεις των χρηστών είναι καλύτερη, κάνοντας το σύστημα πιο εργονομικό. Σημαντική παρατήρηση είναι επίσης, πως και οι δύο αλγόριθμοι απέφυγαν την χρήση των ISL, πράγμα το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι τα σενάρια δεν ήταν αρκετά απαιτητικά για τους αλγορίθμους, ώστε να χρησιμοποιήσουν και τα συγκεκριμένο είδος backhaul. Τέλος, η χρήση των δορυφόρων δεν είναι μηδενική για το backhaul μέρος του συστήματος, αφού οι συνδέσεις μεταξύ επίγειων και δορυφορικών παρουσιάζουν ένα μικρό ποσοστό ενεργοποίησης, το οποίο κυμαίνεται στα 0,31% για τον προτεινόμενο αλγόριθμο και 0,23% για την βιβλιογραφία. Φυσικά, αυτό το ποσοστό παρουσιάζεται αρκετά μικρό και λόγω του πολύ μεγαλύτερου αριθμού των υπόλοιπων συνδέσεων έναντι των επίγειων, οι οποίοι αριθμούν 15 πιθανές backhaul συνδέσεις για το mmWave, 408 για τα επίγεια με δορυφορικά, 3326 για τα ISL και 20 για τις ενσύρματες συνδέσεις με fiber.

Για την εικόνα 4.18, ισχύουν στο σύνολό τους οι ίδιες παρατηρήσεις με πριν. Στην συγκεκριμένη εικόνα παρουσιάζεται η μέση ενεργοποίηση του backhaul για το πιο ήπιο σενάριο της παρούσας εργασίας, για 10 χρήστες και $1/\lambda=10$. Στους δύο αλγόριθμους παρατηρούνται μικρές μειώσεις, ως προς την χρήση του backhaul και κυρίως στον αλγόριθμο της βιβλιογραφίας, ενώ ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει μειωμένο ποσοστό ενεργοποίησης για τους επίγειους συνδέσμους mmWave, που είναι το βασικότερο, διότι όπως αναφέρθηκενωρίτερα είναι αυτοί με την μεγαλύτερη κατανάλωση. Τα ISL πάλι δεν συμμετέχουν στην συγκεκριμένη περίπτωση, ενώ οι σύνδεσμοι μεταξύ επίγειων και δορυφορικών σταθμών είναι 0,19% για



Σχήμα 4.18: Ποσοστιαία ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος για 10 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$.

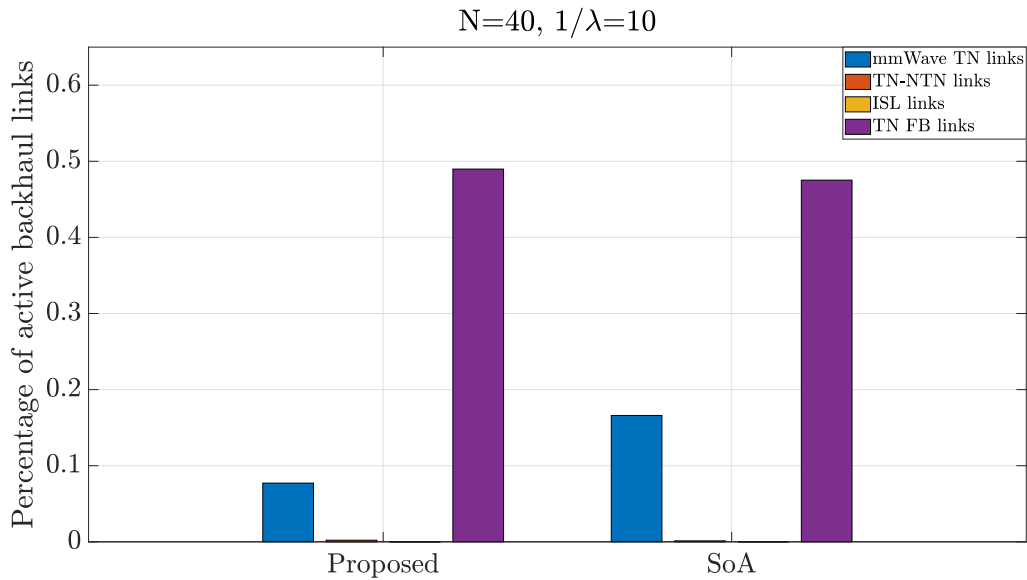
την προτεινόμενη λύση και 0,11% για την βιβλιογραφία.



Σχήμα 4.19: Ποσοστιαία ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος για 40 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=1$.

Στο άλλο άκρο των σεναρίων τώρα, η εικόνα 4.19 αναφέρεται στα πιο απαιτητικά σενάρια της παρούσας εργασίας, αυτά με τους 40 χρήστες και $1/\lambda=1$, το οποίο λ υπενθυμίζεται πως είναι για το ρυθμό άφιξης των χρηστών στο σύστημα, που στην προκειμένη περίπτωση είναι κάθε 1 δευτερόλεπτο κατά μέσο όρο. Εδώ παρατηρείται πως και οι δύο αλγόριθμοι δίνουν μεγάλη έμφαση στους ενσύρματος συνδέσμους του backhaul, ενώ είναι μεγαλύτερη και η ενεργοποίηση των επίγειων mmWave. Συγκρίνοντας τους δύο αλγόριθμους, φαίνεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί περισσότερα fiber links για το backhaul από ότι η βιβλιογραφία, αλλά στον αντίποδα, η βιβλιογραφία εδώ έχει σχεδόν τριπλάσια τη

μέση χρήση των mmWave επίγειων link, τα οποία είναι και αυτά που έχουν την μεγαλύτερη κατανάλωση στο σύστημα και, βάση αυτού, γίνεται κατανοητό πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει και σε αυτά τα σενάρια μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Σχετικά με το ενοποιημένο σύστημα, τα ISL και εδώ δεν έχουν κάποια εφαρμογή από τους δύο αλγόριθμους, ενώ η μέση χρήση των link μεταξύ επίγειων και δορυφορικών σταθμών είναι 0,63% για τον προτεινόμενο αλγόριθμο και 0,5% για την βιβλιογραφία.



Σχήμα 4.20: Ποσοστιαία ενεργοποίηση του backhaul του συστήματος για 40 χρήστες για την προτεινόμενη λύση σε σχέση με τη βιβλιογραφία με μέσο ρυθμό άφιξης ίσο με $1/\lambda=10$.

Τέλος, στην εικόνα 4.20 παρουσιάζεται η μέση ποσοστιαία ενεργοποίηση για το backhaul όταν έχουμε 40 χρήστες και $1/\lambda=10$. Σε αυτή την περίπτωση, οι δύο αλγόριθμοι φαίνονται αρκετά πιο αποφορτισμένοι από την προηγούμενη, με την χρήση των fiber link να είναι και πάλι η προτιμώμενη από τους αλγόριθμους. Η χρήση των επίγειων mmWave link είναι υπερδιπλάσια στον αλγόριθμο της βιβλιογραφίας και τα ISL πάλι δεν παρουσιάζουν κάποια χρήση. Για τα mmWave link που αφορούν το ενοποιημένο δίκτυο είναι 0,21% και 0,12% για την προτεινόμενη λύση και την βιβλιογραφία, αντίστοιχα.

4.4 Επίλογος

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα για τους δύο αλγόριθμους και το τελικό αποτέλεσμα από την σύγκρισή τους. Από την σύγκρισή τους, παρατηρήθηκε πως ο αλγόριθμος της προτεινόμενης λύσης αποδίδει στο σύνολό του καλύτερα από αυτόν της βιβλιογραφίας, με την μόνη εξαίρεση να βρίσκεται στο χρόνο εκτέλεσης του κάθε αλγόριθμου, στον οποίο η βιβλιογραφία έδειξε καλύτερα αποτελέσματα λόγω της μικρότερης πολυπλοκότητας του αλγόριθμου. Στις υπόλοιπες μετρήσεις και, κυρίως, στην ενεργειακή απόδοση των δύο συστημάτων, διακρίθηκε βέλτιστος ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζοντας μέχρι και 54% καλύτερα αποτελέσματα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, πως σε ακόμα πιο απαιτητικά σενάρια, σε πλήθος χρηστών και ανάγκη για υπολογιστική ισχύ, η διαφορά ανάμεσα στους δύο αλγόριθμους αναμένεται να είναι περισσότερο εμφανής, με εντυπωσιακά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα ή/και Προτάσεις Βελτίωσης

5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκε και αναπτύχθηκε μία από τις τεχνολογίες κλειδιά της επόμενης γενιάς κινητών δικτύων 6G, η ενσωμάτωση των δορυφορικών επικοινωνιών στα επίγεια δίκτυα, η οποία αναμένεται να φέρει επαναστατικές εξελίξεις στις ταχύτητες των δικτύων και στην παγκόσμια κάλυψη. Αυτά με την σειρά τους θα αποτελέσουν τους πυρήνες για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, άγνωστων ακόμα στους ανθρώπους, αλλά και στην βελτίωση των ήδη υπάρχων, βελτιώνοντας αισθητά την ποιότητα ζωής και την καθημερινότητα του καθενός.

5.2 Συμπεράσματα

Το βασικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας είναι ότι επιτεύχθηκε ο βασικός σκοπός της, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος μελετάει ένα δίκτυο που αποτελείται από ένα μεγάλο πλήθος παραγόντων, ο οποίος κατάφερε να ξεπεράσει σε απόδοση έναν αλγόριθμο που στηρίζεται σε μία SoA αρχιτεκτονική. Επιπλέον, τα αποτελέσματα από τα πολυποίκιλα σενάρια που δημιουργήθηκαν αποκλειστικά για την παρούσα εργασία αλλά και η προσπάθεια να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά, τόσο σε απαιτήσεις αλλά και στα μεγέθη των τιμών που λαμβάνονται υπόψιν, αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου, ο οποίος με ενδεχόμενες βελτιώσεις στην δομή του διατηρώντας ακέραιη την λογική του, ίσως αποτελέσει ένα μελλοντικό SoA, το οποίο με την σειρά του θα δώσει τις βάσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη των κινητών δικτύων.

Το σημαντικότερο, όμως, συμπέρασμα που λήφθηκε από την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας είναι, ότι πλέον δύναται να επιτευχθεί ένα από τα μεγαλύτερα βήματα στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών, το οποίο συζητιέται και αναλύεται πολλά χρόνια από τους ερευνητές και τους επιστήμονες, η ενσωμάτωση των δορυφορικών επικοινωνιών στα επίγεια δίκτυα και η δημιουργία ενός νέου, ενιαίου δικτύου. Χρησιμοποιώντας τις πιο πρόσφατες προδιαγραφές για τα μελλοντικά δίκτυα, αποδείχθηκε πως η χρήση των δορυφόρων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θα αποτελέσει ένα ενεργό μέλος και θα συμμετέχει στην λύση του προβλήματος της παγκόσμιας κάλυψης και στον όγκο που τείνουν να αποκτήσουν στο μέλλον τα δεδομένα από τις καθημερινές συναλλαγές κάθε φύσεως. Έτσι, έχει ύψιστη σημασία η κατανόηση των προβλημάτων που ενδέχεται να προκύψουν από την πιθανή αυτή ενοποίηση και να εμπεριστατωθούν οι έρευνες για την επίλυσή τους, όπως επίσης, και να εναρμονιστούν οι σχετικοί φορείς με τις νέες αυτές εξελίξεις.

5.3 Κατευθύνσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Στο μέλλον, το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, ενδέχεται να αποτελέσει βασικό θεμέλιο για μία κοινωνία, στην οποία όλοι θα έχουν το δικαίωμα να αποκτήσουν πρόσβαση στο μεγαλύτερο δίκτυο του πλανήτη, το διαδίκτυο. Πιστεύοντας σε αυτό, η μετεξέλιξη της παρούσας εργασίας και του αλγορίθμου που την απαρτίζει είναι ένα από τα βασικά βήματα που σκοπεύουν να πραγματοποιηθούν, οδηγώντας την σε όλο και καλύτερα αποτελέσματα με ακόμα πιο απαιτητικά σενάρια.

Λέγοντας αυτό, τα πρώτα βήματα που πρόκειται να πραγματοποιηθούν στο μέλλον είναι η δημιουργία

νέων σεναρίων που θα προσομοιάζουν καλύτερα τις μελλοντικές και αντίξοες συνθήκες που αναμένεται να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα. Φάνηκε μέσα από τα αποτελέσματα πως στο τωρινό του σημείο ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι παραπάνω από ικανός να ανταπεξέλθει με αρκετή ευκολία, αλλά η έλλειψη σε ικανή υπολογιστική ισχύ να φέρει εις πέρας πιο απαιτητικά σενάρια απέδειξε τις πραγματικές ικανότητες του αλγορίθμου, μιας και στα περισσότερα αποτελέσματα η μέση ποσοστιαία χρήση των φυσικών μηχανημάτων που την απαρτίζουν ήταν σε πολύ χαμηλά ποσοστά. Έτσι, στο μέλλον βασικός σκοπός είναι να αυξηθούν οι αριθμοί αυτών των συσκευών, όπως επίσης και των χρηστών και να εμπλουτιστεί ο τωρινός αλγόριθμος με την ένταξη των HAPS (High-Altitude Platform Stations) και των UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), τα οποία θα προσφέρουν στο σύστημα ακόμα περισσότερες υπηρεσίες και εφαρμογές. Συνολικά, τα HAPS και τα UAV μπορούν να συμβάλουν στη δημιουργία ενός πιο ευέλικτου και αποτελεσματικού δικτύου επικοινωνιών στο πλαίσιο του 6G, επιτρέποντας την παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών σε διάφορες εφαρμογές και περιβάλλοντα, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να αποτελέσουν το συνδετικό κρίκο του επίγειου και του δορυφορικού δικτύου.

Μία ακόμα από τις τεχνολογίες κλειδιά που αποτελούν την νέα γενιά δικτύων στις κινητές τηλεφωνίες είναι τα Self Evolving Networks (SEN) ([71]), τα οποία με την χρήση της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial intelligence) και συγκεκριμένα της μηχανικής μάθησης (Machine learning) ενδέχεται να βελτιώσουν σε σημαντικό βαθμό την οργάνωση και την διαχείριση του πολύπλοκου ενοποιημένου δικτύου. Έτσι, μετά τα γυμνάσια του προτεινόμενου αλγορίθμου με την χρήση πιο απαιτητικών σεναρίων, το επόμενο βήμα είναι η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης σε αυτόν, στην προσπάθεια να αποφέρει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα, μιας και, πλέον, θα έχει την δυνατότητα να επεξεργάζεται το traffic με πιο αποδοτικούς τρόπους και τη ζήτηση από τους χρήστες με περισσότερα κριτήρια. Αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την χρήση της Ενισχυτικής μάθησης (Reinforcement learning), που είναι μια κατηγορία της μηχανικής μάθησης και μπορεί να οριστεί ως μια ομάδα διαφορετικών τεχνικών στις οποίες το σύστημα μάθησης προσπαθεί να μάθει μέσα από την άμεση αλληλεπίδραση με το περιβάλλον που εφαρμόζεται. Μέσω του RL λοιπόν, ο αλγόριθμος θα αποκτήσει την ικανότητα να αντιλαμβάνεται κάποιες πιο έντονες ή απρόβλεπτες αλλαγές στο σύστημα των χρηστών και να προσαρμόζεται ανάλογα σε κάθε περίπτωση χωρίς την ανθρώπινη επέμβαση.

Φυσικά, με τις παραπάνω προσθήκες, οδηγούμαστε σε έναν αλγόριθμο, ο οποίος θα είναι αρκετά απαιτητικός στην υπολογιστική ισχύ που θα χρειάζεται ώστε να καταφέρει να εξάγει κάποια ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για να αντισταθμιστούν οι προσθήκες αυτές σε σχέση με τις επιδόσεις του κώδικα, το τελευταίο στάδιο είναι η προσθήκη τεχνικών παράλληλων υπολογισμών (Parallel computing), η διχοτόμηση, δηλαδή, του αλγορίθμου σε επιμέρους κομμάτια. Με αυτόν τον τρόπο, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου μειώνεται σημαντικά, ενώ το κάθε σκέλος που ερευνά η παρούσα εργασία μπορεί να υπολογιστεί ξεχωριστά, όπως είναι η σύνδεση των χρηστών στο δίκτυο πρόσβασης, η κίνηση του traffic στο backhaul και η τοποθέτηση των VNF στους κατάλληλους κόμβους. Διαφορετικά, είναι εφικτό να διαχωριστούν οι υπολογισμοί σε κάθε επίπεδο της συνολικής ενοποίησης του δικτύου, υπολογίζοντας χωριστά το επίγειο, το εναέριο και το δορυφορικό κομμάτι, το οποίο σαν λύση δεν φαίνεται να είναι προτιμότερη της προηγούμενης. Σε κάθε περίπτωση η εισαγωγή του παράλληλου υπολογισμού θα αλλάξει δραματικά τα αποτελέσματα και θα βελτιώσει σε κάθε σημείο τον προτεινόμενο αλγόριθμο.

5.4 Επίλογος

Κλείνοντας, είναι κατανοητό πως η προσπάθεια για συνεχή βελτίωση και περαιτέρω ανάπτυξη στον προτεινόμενο αλγόριθμο θα συνεχίσει να εφαρμόζεται, ακολουθώντας τις τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας. Με τα αποτελέσματα που παρατέθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αποδείχθηκε η αξία του αλγόριθμου της παρούσας εργασίας και φάνηκαν, όμως, και οι αδυναμίες του που στο μέλλον θα αποτελέσουν τον πυρήνα για την μετεξέλιξη του. Η σημαντικότητα αυτής της νέας τεχνολογίας αξίζει να ερευνηθεί εις πέρας και να υπάρξει, με την έναρξη της νέας γενιάς δικτύων κινητής τηλεφωνίας, ένα νέο ενοποιημένο δίκτυο που θα λειτουργεί με τον βέλτιστο τρόπο. Το 6G αναμένεται να αλλάξει τον κόσμο όπως ήταν γνωστός και να δώσει την δυνατότητα σε ακόμα περισσότερους ανθρώπους να αποκτήσουν σύνδεση στο διαδίκτυο, εισάγοντας τους στην ψηφιακή εποχή.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] The Nobel Prize, “Guglielmo Marconi.” <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1909/marconi/biographical/>.
- [2] History, “Morse Code & the Telegraph.” <https://www.history.com/topics/inventions/telegraph>.
- [3] E. Andrews, “Who Invented the Internet?.” <https://www.history.com/news/who-invented-the-internet>.
- [4] R. Eveleth, “The surgeon who operates from 400km away.” <https://www.bbc.com/future/article/20140516-i-operate-on-people-400km-away>.
- [5] G. Navarria, “How the Internet was born: from the ARPANET to the Internet.” <https://www.history.com/news/who-invented-the-internet>.
- [6] GSMA, “The Mobile Economy 2023.” <https://data.gsmainelligence.com/research/research/research-2023/the-mobile-economy-2023>.
- [7] Martyn Williams, “Panasonic Japan cell phone shipments hit 100 million units.” <https://www.networkworld.com/article/2277681/panasonic-japan-cell-phone-shipments-hit-100-million-units.html>.
- [8] K. Lyytinen and V. V. Fomin, “Achieving high momentum in the evolution of wireless infrastructures: the battle over the 1G solutions,” *Telecommunications Policy*, vol. 26, no. 3, pp. 149–170, 2002. Making the mobile revolution: standards and other legacies.
- [9] G. Gu and G. Peng, “The survey of GSM wireless communication system,” in *2010 International Conference on Computer and Information Application*, pp. 121–124, 2010.
- [10] S. G. Sapna Shukla, Varsha Khare and P. Sharma, “Comparative Study of 1G, 2G, 3G and 4G,” *Journal of Engineering, Computers & Applied Sciences (JEC&AS)*, vol. 2, no. 4, April 2013.
- [11] S. Mondal, A. Sinha, and J. Routh, “A survey on evolution of wireless generations 0G to 7G,” *International Journal of Advance Research in Science and Engineering (IJARSE)*, vol. 1, no. 2, pp. 5–10, 2015.
- [12] C. K. Pratima Manhas, Shaveta Thakral, “Performance Analysis of GPRS/EDGE,” *International Journal of Electronic Engineering Research*, vol. 2, no. 5, pp. 655–658, 2010.
- [13] L. Roberts, “The evolution of packet switching,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no. 11, pp. 1307–1313, 1978.
- [14] “Packet switching vs Circuit switching.” https://www.bzfar.org/publ/computer_networks/types_of_networks/packet_switching_vs_circuit_switching/29-1-0-129.

- [15] ETSI TR 101 458, “Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Future direction of standards work on UMTS/IMT-2000,” Tech. Rep. v. 3.0.0, ETSI, 2000.
- [16] M. K. Sagarkumar Patel, Vatsal Shah, “Comparative Study of 2G, 3G and 4G,” *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, vol. 3, no. 3, 2018.
- [17] M. A. Albreem, A. H. A. Habbash, A. M. Abu-Hudrouss, and S. S. Ikki, “Overview of Precoding Techniques for Massive MIMO,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 60764–60801, 2021.
- [18] Everything RF, “What is MIMO Technology?.” <https://www.everythingrf.com/community/what-is-mimo-technology>.
- [19] R. Chataut and R. Akl, “Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction,” *Sensors*, vol. 20, no. 10, 2020.
- [20] T. Kebede, Y. Wondie, J. Steinbrunn, H. B. Kassa, and K. T. Kornegay, “Multi-Carrier Waveforms and Multiple Access Strategies in Wireless Networks: Performance, Applications, and Challenges,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 21120–21140, 2022.
- [21] ETSI TR 136 913, “LTE; Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (3GPP TR 36.913 version 10.0.0 Release 10),” Tech. Rep. v. 10.0.0, ETSI, Apr. 2011.
- [22] J. Lee, J.-K. Han, and J. Zhang, “MIMO technologies in 3GPP LTE and LTE-advanced,” *EURASIP Journal on wireless communications and networking*, vol. 2009, pp. 1–10, 2009.
- [23] ETSI TR 137 910, “5G; Study on self evaluation towards IMT-2020 submission (3GPP TR 37.910 version 16.1.0 Release 16),” Tech. Rep. v. 16.1.0, ETSI, Nov. 2020.
- [24] Η Καθημερινή, “Τρίκαλα: Η πρώτη πόλη της Ελλάδας με τεχνολογία 5G.” <https://www.kathimerini.gr/life/technology/954024/trikala-i-proti-poli-tis-elladas-me-technologia-5g/>.
- [25] ITU-R M.2083-0, “IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” tech. rep., ITU-R, Sep. 2015.
- [26] S. Y. A. Dakhaz Mustafa Abdullah, “ENHANCED MOBILE BROADBAND (EMBB): A REVIEW,” *Journal of Information Technology and Informatics (JITI)*, vol. 1, no. 1, pp. 13–19, 2021.
- [27] Z. Li, M. A. Uusitalo, H. Shariatmadari, and B. Singh, “5g urllc: Design challenges and system concepts,” in *2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp. 1–6, 2018.
- [28] C. Bockelmann, N. K. Pratas, G. Wunder, S. Saur, M. Navarro, D. Gregoratti, G. Vivier, E. De Carvalho, Y. Ji, C. Stefanović, P. Popovski, Q. Wang, M. Schellmann, E. Kosmatos, P. Demestichas, M. Raceala-Motoc, P. Jung, S. Stanczak, and A. Dekorsy, “Towards Massive Connectivity Support for Scalable mMTC Communications in 5G Networks,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28969–28992, 2018.

- [29] IBM, “What is predictive maintenance?.” <https://www.ibm.com/topics/predictive-maintenance>.
- [30] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, and G. Wunder, “5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, 2017.
- [31] Z. Chen, X. Ma, B. Zhang, Y. Zhang, Z. Niu, N. Kuang, W. Chen, L. Li, and S. Li, “A survey on terahertz communications,” *China Communications*, vol. 16, no. 2, pp. 1–35, 2019.
- [32] Jon Mundy, Sacha Kavanagh, “What Is Massive MIMO Technology?.” <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>.
- [33] A. F. M. Shahen Shah, “A Survey From 1G to 5G Including the Advent of 6G: Architectures, Multiple Access Techniques, and Emerging Technologies,” in *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, pp. 1117–1123, 2022.
- [34] J. Wallace and A. Valdivia, “A High-Performance 5G/6G Infrastructure for Augmented, Virtual, and Extended Reality,” in *2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, pp. 1291–1296, 2021.
- [35] V. C. Farias da Costa, L. Oliveira, and J. de Souza, “Internet of Everything (IoE) Taxonomies: A Survey and a Novel Knowledge-Based Taxonomy,” *Sensors*, vol. 21, no. 2, 2021.
- [36] O. Kodheli, E. Lagunas, N. Maturo, S. K. Sharma, B. Shankar, J. F. M. Montoya, J. C. M. Duncan, D. Spano, S. Chatzinotas, S. Kisseleff, J. Querol, L. Lei, T. X. Vu, and G. Goussetis, “Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 1, pp. 70–109, 2021.
- [37] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.
- [38] V. Petrov, J. Kokkonen, D. Moltchanov, J. Lehtomaki, Y. Koucheryavy, and M. Juntti, “Last Meter Indoor Terahertz Wireless Access: Performance Insights and Implementation Roadmap,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 6, pp. 158–165, 2018.
- [39] Top Gear, “What are the six SAE levels of self-driving cars?.” <https://www.topgear.com/car%20news/what-are-sae-levels-autonomous-driving-uk>.
- [40] Ericsson, “Ericsson Mobility Report June 2023.” .
- [41] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, and F. Tufvesson, “6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1166–1199, 2021.
- [42] “The Internet of Everything and the Internet of Things: What’s What?.” <https://emerline.com/blog/iot-vs-ioe>.

- [43] M. A. ElMossallamy, H. Zhang, L. Song, K. G. Seddik, Z. Han, and G. Y. Li, “Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities,” *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 6, no. 3, pp. 990–1002, 2020.
- [44] G. C. Trichopoulos, P. Theofanopoulos, B. Kashyap, A. Shekhawat, A. Modi, T. Osman, S. Kumar, A. Sengar, A. Chang, and A. Alkhateeb, “Design and Evaluation of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Real-World Environment,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 462–474, 2022.
- [45] ETSI GR RIS 001, “Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Use Cases, Deployment Scenarios and Requirements,” Tech. Rep. v. 1.1.1, ETSI, Apr. 2023.
- [46] J. Sun, F. Liu, H. Wang, and D. O. Wu, “Joint VNF Placement, CPU Allocation, and Flow Routing for Traffic Changes,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 1208–1222, 2023.
- [47] A. Mesodiakaki, M. Gatzianas, G. Kalfas, C. Vagionas, R. Maximidis, and N. Pleros, “ONE: Online Energy-efficient User Association, VNF Placement and Traffic Routing in 6G HetNets,” in *2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 304–309, 2022.
- [48] H. Jiang, H. Wang, Y. Hu, and J. Wu, “Dynamic User Association in Scalable Ultra-Dense LEO Satellite Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 8, pp. 8891–8905, 2022.
- [49] C. Qi, Y. Yang, R. Ding, S. Jin, and D. Liu, “Multibeam Satellite Communications With Energy Efficiency Optimization,” *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 4, pp. 887–891, 2022.
- [50] M. Jia, L. Zhang, J. Wu, Q. Guo, and X. Gu, “Joint computing and communication resource allocation for edge computing towards Huge LEO networks,” *China Communications*, vol. 19, no. 8, pp. 73–84, 2022.
- [51] J. Shuai, Y. Liu, and Y. Wang, “Energy Efficient Maximal Throughput Resource Scheduling Strategy in Satellite Networks,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 12, no. 2, pp. 312–316, 2023.
- [52] B. Zhao, X. Dong, G. Ren, and J. Liu, “Optimal User Pairing and Power Allocation in 5G Satellite Random Access Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 4085–4097, 2022.
- [53] L. Zhu, L. Bai, L. Zhou, and J. Choi, “Efficient User Scheduling for Uplink Hybrid Satellite-Terrestrial Communication,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 3, pp. 1885–1899, 2023.
- [54] Y. Ruan, L. Jiang, Y. Li, and R. Zhang, “Energy-Efficient Power Control for Cognitive Satellite-Terrestrial Networks With Outdated CSI,” *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 1329–1332, 2021.
- [55] W. Qiu, A. Liu, and C. Han, “Joint Downlink Spectrum Allocation and User Association for Satellite-Terrestrial Integrated Networks,” in *2022 IEEE 14th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*, pp. 19–24, 2022.

- [56] S. Chan, H. Lee, S. Kim, and D. Oh, “Intelligent Low Complexity Resource Allocation Method for Integrated Satellite-Terrestrial Systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 5, pp. 1087–1091, 2022.
- [57] B. Ma, Z. Ren, W. Guo, W. Cheng, and H. Zhang, “Computation-Dependent Routing Based Low-Latency Decentralized Collaborative Computing Strategy for Satellite-Terrestrial Integrated Network,” in *2022 14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp. 1–5, 2022.
- [58] X. Li, Q. Cui, Q. Xue, W. Ni, J. Guo, and X. Tao, “A New Batch Access Scheme with Global QoS Optimization for Satellite-Terrestrial Networks,” in *GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*, pp. 3929–3934, 2022.
- [59] Y. Zhang, H. Zhang, H. Zhou, K. Long, and G. K. Karagiannidis, “Resource Allocation in Terrestrial-Satellite-Based Next Generation Multiple Access Networks With Interference Cooperation,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 4, pp. 1210–1221, 2022.
- [60] ITU-R P.837-7, “Characteristics of precipitation for propagation modelling,” tech. rep., ITU-R, Jul. 2017.
- [61] ITU-R P.838-3, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” tech. rep., ITU-R, 2005.
- [62] ITU-R P.835-6, “Reference standard atmospheres,” tech. rep., ITU-R, Dec. 2017.
- [63] ITU-R P.676-13, “Attenuation by atmospheric gases and related effects,” tech. rep., ITU-R, Aug. 2022.
- [64] ITU-R P.453-14, “The radio refractive index: its formula and refractivity data,” tech. rep., ITU-R, Aug. 2019.
- [65] Felix R. Hoots, Ronald L. Roehrich, “SPACETRACK REPORT NO. 3,” Dec. 1980.
- [66] Δ. Βουγιούκας, *Δορυφορικές επικοινωνίες*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015.
- [67] Space Wiki, “Orbital elements.” https://space.fandom.com/wiki/Orbital_elements.
- [68] T.S. Kelso, “CelesTrak.” <https://celestrak.org/>.
- [69] Pholme-Wikipedia, “Centrality.” <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Wp-01.png>.
- [70] A. Varasteh, B. Madiwalar, A. Van Bemten, W. Kellerer, and C. Mas-Machuca, “Holu: Power-Aware and Delay-Constrained VNF Placement and Chaining,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, no. 2, pp. 1524–1539, 2021.
- [71] T. Darwish, G. K. Kurt, H. Yanikomeroğlu, G. Senarath, and P. Zhu, “A Vision of Self-Evolving Network Management for Future Intelligent Vertical HetNet,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 4, pp. 96–105, 2021.

- [72] M. Keenan, “The evolution of cellular networks.” <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/resources/article/the-evolution-of-cellular-networks/>.
- [73] P. Sharma, “Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network,” *IJCSMC*, vol. 2, no. 8, pp. 47–53, 2013.
- [74] CCS Insight, “5G Prospects Remain Strong Despite Pandemic Drag.” <https://www.ccsinsight.com/company-news/5g-prospects-remain-strong-despite-pandemic-drag>.
- [75] A. F. M. Shahen Shah, “A Survey From 1G to 5G Including the Advent of 6G: Architectures, Multiple Access Techniques, and Emerging Technologies,” in *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, pp. 1117–1123, 2022.
- [76] J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, “Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1124–1148, 2018.
- [77] T. Mshvidobadze, “Evolution mobile wireless communication and LTE networks,” in *2012 6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, pp. 1–7, 2012.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ

Απόσπασμα κώδικα για τη δημιουργία των SFCs των χρηστών.

```
%% Users Creation
time=0;
mean_arrival_rate=[1, 10];
mean_arrival_rate_points=length(mean_arrival_rate);
for mm=1:mean_arrival_rate_points
    for NN=1:points
        N=Users(NN);
        num_arrivals=N;
        arrival_epochs= generate_epochs(mean_arrival_rate(mm),
            num_arrivals);

        for iter=1:iteration
            discard_scenario=1;
            while discard_scenario==1
                tic
                clc
                step=1;
                stop=iteration;
                sprintf('Time left %2.2f h in iteration %d of point %
                    d',((stop+step-iter)*time/step)/3600,iter,re)

                user_SFC=zeros(N,1);

                for ss=1:SFC_types
                    if ss==SFC_types
                        set_of_users_studied(ss)=N-sum(
                            set_of_users_studied(1:end-1));
                    else
                        set_of_users_studied(ss)= round (SFC_details(
                            ss,4)*N); %%studied set
                    end
                    if ss==1
                        set_of_users_remaining{ss}=1:N; %%remaining
                            set
                    else
                        set_of_users_remaining{ss}=setdiff(
                            set_of_users_remaining{ss-1},id_Du{ss-1});
                            %%remaining set
                    end
                end
            end
        end
    end
end
```

```

        id_Du{ss} = datasample(set_of_users_remaining{ss}
            },set_of_users_studied(ss),'Replace',false);
        user_SFC(id_Du{ss})=ss;
    end

    data_rate_user_DL=zeros(1,N);
    data_rate_user_DL_net=zeros(1,N);

    BLER=0;
    overhead=0;

    for i=1:N
        data_rate_user_DL_net(i)=SFC_details(user_SFC(i)
            ,1)+ ((SFC_details(user_SFC(i),2)-SFC_details(
            user_SFC(i),1))*rand(1));
        data_rate_user_DL(i)=(data_rate_user_DL_net(i))
            /((1-BLER)*(1-overhead));
    end

    source=zeros(1,N);
    VNF_order=cell(1,N);
    arrival_time=zeros(1,N);
    arrival_epochs_sorted=sort(arrival_epochs,'ascend');
    arriving_order=randperm(N);

    for i=1:N
        if user_SFC(i)==(5 || 6)
            source(i)=datasample(source_nodes(1:
                number_of_edge_sources),1);
        else
            source(i)=datasample(source_nodes(
                number_of_edge_sources+1:end),1);
        end
        VNF_order{i}=SFC{user_SFC(i)};
        arrival_time(i)=arrival_epochs_sorted(
            arriving_order==i);
    end
end

```