

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μελέτη και σύγκριση ενεργειακής απόδοσης  
διαφορετικών σταθμών βάσης στα δίκτυα επόμενης  
γενιάς (6G)»**



Του φοιτητή  
Κωνσταντίνου Παναγιώτη  
Αρ. Μητρώου: 517164

Επιβλέπουσα  
Μεσοδιακάκη Αγάπη  
Έκτακτο διδακτικό προσωπικό

Ημερομηνία 26/05/2024

Τίτλος Δ.Ε: Μελέτη και σύγκριση ενεργειακής απόδοσης διαφορετικών σταθμών βάσης στα δίκτυα επόμενης γενιάς (6G).

Κωδικός Δ.Ε. 23176

Όνοματεπώνυμο φοιτητή/τών: Κωνσταντίνου Παναγιώτης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Μεσοδιακάκη Αγάπη

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 28/03/2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 26/05/2024

*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 Κωνσταντίνου Παναγιώτης που την εκπόνησε/αν. 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.

*«στον παππού και στους γονείς μου»*

## Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του ΔΠΠΑΕ υπό την επίβλεψη της κ. Μεσοδιακάκη Αγάπη, έκτακτο διδακτικό προσωπικό. Στην εργασία αυτή, μελετάται και συγκρίνεται η ενεργειακή απόδοση διαφορετικών σταθμών βάσης στα δίκτυα επόμενης γενιάς (6G). Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος, έγινε με αφορμή το ενδιαφέρον μου στην εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών και τη χρησιμότητα του θέματος, όπου θα συμβάλει στην καθημερινή μας ζωή. Κυρίως τον τελευταίο καιρό η ενέργεια και το κόστος έχουν γίνει στοιχεία καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη καινοτόμου δικτύου. Μέσω της ενασχόλησης μου, απέκτησα νέες γνώσεις που σίγουρα θα με βοηθήσουν μελλοντικά στη ζωή μου. Ειδικότερα, τον τρόπο αναζήτησης έγκυρων και αξιόπιστων πηγών, καθώς η εξοικείωση με το προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον στην παρούσα διπλωματική εργασία.

## Περίληψη

Ο κλάδος των τηλεπικοινωνιών βιώνει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια με πολλές προκλήσεις. Μια σημαντική πρόκληση στα δίκτυα επόμενης γενιάς (6G), είναι η ανάπτυξη ενός Οικονομικά-Αποδοτικού (Cost-Efficiency) και Ενεργειακά-Αποδοτικού (Energy-Efficient) 6G δικτύου. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στο πρόβλημα αυτό, προτείνοντας βέλτιστη λύση, όπου θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των 6G δικτύων το 2030. Εξετάζονται οι τρεις τύποι δικτύων (επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων) κατά την ατομική τους λειτουργία, με το σενάριο επικοινωνίας μεταξύ σταθμού βάσης (BS) και ενός τελικού χρήστη (UE), σε δύο διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο σενάριο, απευθύνεται σε περιοχή με μικρή γεωγραφική κάλυψη, η οποία έχει εμβασμόν πενήντα χιλιάδες τετραγωνικά μέτρα, όπου απαιτείται μεγάλη τηλεπικοινωνιακή κίνηση, ώστε να καλυφθεί πλήρως η εξεταζόμενη περιοχή. Το δεύτερο σενάριο, απευθύνεται σε μεγάλη περιοχή κάλυψης με ένα ευρύ φάσμα περιοχών από δέκα τετραγωνικά χιλιόμετρα έως εκατό τετραγωνικά χιλιόμετρα, στην οποία απαιτείται μικρή τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Λόγω των συμπεριλαμβανομένων περιοχών όπως αγροτικές περιοχές. Για την προσομοίωση του προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, όπου χρησιμοποιήθηκαν έγκυρα μεγέθη τιμών, ώστε να προκύψουν ρεαλιστικά αποτελέσματα. Στο πρώτο σενάριο, αποδεικνύονται ως βέλτιστη λύση τα επίγεια μέσα. Αντίθετα, στο δεύτερο σενάριο, αποδεικνύονται ως βέλτιστη επιλογή τα εναέρια και τα διαστημικά μέσα. Συνεπώς, μπορούμε να πούμε ότι αναμένονται 6G υβριδικά δίκτυα (Hybrid), τα οποία θα συνδυάζουν τις δυνατότητες των επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων.

# «Study and Comparison of Energy Efficiency of Different Base Stations in Next-Generation Networks (6G)»

«Panagiotis Constantinou»

## **Abstract**

The telecommunications industry has experienced rapid growth in recent years with many challenges. A major challenge in next generation (6G) networks is the development of a Cost-Efficient and Energy-Efficient 6G network. This thesis focuses on this problem, proposing an optimal solution, where it will play a key role in the deployment of 6G networks in 2030. The three types of networks (terrestrial, airborne and space networks) are considered in their individual operation, with the communication scenario between a base station (BS) and an end user (UE), in two different scenarios. The first scenario, addressed to an area with a small geographical coverage, which has an area of fifty thousand square meters, where a large amount of telecommunication traffic is required to fully cover the area under consideration. The second scenario is aimed at a large coverage area with a wide range of areas from ten square kilometers to one hundred square kilometers, where little telecommunication traffic is required. Due to including areas such as rural areas. The MATLAB programming environment was used to simulate the problem, where valid value sizes were used to obtain realistic results. In the first scenario, ground-based means are shown to be the optimal solution. In contrast, in the second scenario, aerial and space-based means are shown to be the optimal choice. Therefore, it can be said that 6G hybrid solutions are expected to be the best option.

## Ευχαριστίες

Η τρέχουσα έρευνα αποτελεί διπλωματική εργασία στο πλαίσιο των προπτυχιακών μου σπουδών στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων. Κατά τη διεξαγωγή της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια Δρ. Μεσοδιακάκη Αγάπη, μεταδιδακτορική ερευνήτρια στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και δικτύων επόμενης γενιάς. Επίσης, θα ήθελα να την ευχαριστήσω τόσο για την άριστη συνεργασία, όσο και για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε για την ανάληψη της διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, αγαπημένα μου πρόσωπα και τα φιλικά μου πρόσωπα, που με στήριξαν αυτό το χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ειδικότερα, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον αγαπητό μου παππού Κωνσταντίνου Παναγιώτη, ο οποίος υπήρξε λάτρης της σοφίας των γραμμάτων και της μάθησης.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος	4
Περίληψη	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων	10
Συνομογραφίες	11
<b>Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή</b>	<b>13</b>
1.1 Εισαγωγή	13
1.2 Εξέλιξη της κινητής τηλεφωνίας	14
1.3 6 <sup>η</sup> γενιά κινητής τηλεφωνίας	13
1.3.1 Κριτήρια ποιότητας δικτύων κινητής τηλεφωνίας	14
1.3.2 Εφαρμογές στο 6G	15
• Αυτο-οδηγούμενα οχήματα	16
• Τηλεχειρουργική	16
• Ολογραφική επικοινωνία (HTC)	17
• Ψηφιακό Δίδυμο (Digital twin)	17
1.3.3 Τεχνολογίες κλειδιά και ανοικτά προβλήματα	18
• Επαναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS)	19
• Διαχείριση δικτύου με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (AI)	20
1.4 Δομή Διπλωματικής και μεθοδολογία	21
1.5 Επίλογος	21
<b>Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική έρευνα και προσεγγίσεις</b>	<b>22</b>
2.1 Εισαγωγή	22
2.2 Βιβλιογραφική έρευνα	22
2.3 Επίλογος	23
<b>Κεφάλαιο 3ο: Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης</b>	<b>24</b>
3.1 Εισαγωγή	24
3.2 Επίγεια Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης	24
3.3 Εναέρια Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης	25
3.3.1 Μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα UAVs	25
3.3.2 Πλατφόρμες Μεγάλου Ύψομέτρου (HAPS)	30
3.4 Διαστημικές Επικοινωνίες	33
3.5 Ενοποιημένο δίκτυο στην έκτη γενιά (6G)	35
3.6 Επίλογος	35
<b>Κεφάλαιο 4ο: Σύγκριση Δικτύων Ραδιοπρόσβασης</b>	<b>36</b>
4.1 Εισαγωγή	36
4.2 Σύγκριση των τριών ειδών δικτύων	36
4.3 Επίλογος	40

<b>Κεφάλαιο 5ο: Μοντέλο Συστήματος και Πρόβλημα προς Επίλυση</b>	<b>41</b>
5.1 Εισαγωγή	41
5.2 Μοντέλο Ισχύος στο δίκτυο Ραδιοπρόσβασης	41
Για την Ενεργειακή απόδοση (energy efficiency) σε (bps/m <sup>2</sup> /W), από τη σχέση:	42
$EE = \frac{\text{Data Rate}}{\text{Power Consumption}} = \text{bits/Joule}$	43
Για την Αποδοτικότητα κόστους (Cost efficiency) σε (bps/Eur/year) δίνεται από τη σχέση:	
$CE = \frac{C_i}{\text{cost}} = \text{bps/Euro/year}$	43
5.3 Μοντέλο Ισχύος για Rotary-Wing UAVs	43
5.4 Μοντέλο πλατφόρμας HAPS και δορυφόρου LEO	44
5.3.1 Απώλειες Διάδοσης	45
• Απώλειες λόγω βροχής	46
• Απώλειες από ατμοσφαιρικά αέρια	51
5.3.2 Δορυφορική τροχιά	52
5.5 Καθορισμός των χρησιμοποιούμενων σταθμών βάσης (BS)	54
5.6 Πρόβλημα προς Επίλυση	55
<b>Κεφάλαιο 6ο: Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση</b>	<b>57</b>
6.3 Αποτελέσματα	61
<b>Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης</b>	<b>70</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>72</b>
<b>ΚΩΔΙΚΑΣ</b>	<b>80</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Σύγκριση των κριτηρίων ποιότητας 5G - 6G.	16
Σχήμα 1.2: Αυτό οδηγούμενο με ικανότητα λήψεις αποφάσεων.	17
Σχήμα 1.3: Εξ αποστάσεως επέμβαση με χρήση τηλεχειρουργικής.	18
Σχήμα 1.4: Απεικόνιση ολογραφική επικοινωνίας.	18
Σχήμα 1.5: Απεικόνιση Ψηφιακού Δίδυμου.	19
Σχήμα 1.6: Προσέγγιση δικτύου με τη βοήθεια των RIS.	20
Σχήμα 1.7: Ενοποιημένο δίκτυο επίγεια, εναέρια και διαστημικά δίκτυα.	24
Σχήμα 3.1: Ετερογενής δίκτυο επίγειων σταθμών βάσης.	25
Σχήμα 3.2: Περιστρεφόμενο πτερύγιο → rotary wing.	27
Σχήμα 3.3: Σταθερό Πτερύγιο →fixed wing	27
Σχήμα 3.4: Υβριδικό Σταθερά Πτερύγια →fixed-wing hybrid	27
Σχήμα 3.5: Κατανάλωση ενέργειας σε συνάρτηση με το υψόμετρο πτήσης.	28
Σχήμα 3.6: Κατανάλωση ενέργειας σε συνάρτηση με τον διαθέσιμο χρόνο αιώρησης.	29
Σχήμα 3.7: Μη Επανδρωμένα Αερόστατα.	31
Σχήμα 3.8: Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη Σταθερών Πτερυγίων.	31
Σχήμα 3.9: Μη Επανδρωμένα Αερόπλοια.	31
Σχήμα 3.10: Επισκόπηση δορυφόρων σε τροχιά.	34
Σχήμα 3.11: Τοπολογία Ενοποιημένου δικτύου.	35
Σχήμα 4.1: Υψόμετρο διαφορετικών σταθμών βάσης σε συνάρτηση με την Γεωγραφική κάλυψη.	39
Σχήμα 5.1: Αναλυτική προσομοίωση Σεναρίου επικοινωνίας.	41
Σχήμα 5.2: Τοπολογία ρυθμού βροχόπτωσης R0.01.	46
Σχήμα 5.3: Ενεργό υψόμετρο βροχόπτωσης hR.	48
Σχήμα 5.4: Ειδική απόσβεση από ατμοσφαιρικά αέρια.	51
Σχήμα 5.5: Συνοπτικό διάγραμμα τροχιάς δορυφόρου.	53
Σχήμα 5.6: Τοπολογία εντοπισμού τελικού χρήστη και Δορυφόρου.	54
Εικόνα 5.7: Το UAV Hermes 900.	55
Σχήμα 6.1: Τοπολογία Σεναρίων Επικοινωνίας	60
Σχήμα 6.2: Τοπολογία σεναρίου Πλατφορμάς HAPS.	60
Σχήμα 6.3: Τοπολογία σεναρίου δορυφόρου LEO.	61
Σχήμα 6.4: Απαιτούμενος αριθμός σταθμών βάσης (BS) σε συνάρτηση με τον Συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης ανά Γεωγραφική περιοχή.	63
Σχήμα 6.5: Συνολικό Κόστος σταθμών βάσης σε συνάρτηση με τον Συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης της περιοχής που εξετάζεται.	64
Σχήμα 6.6: Λογαριθμικός απαιτούμενος αριθμός σταθμών βάσης (BS) σε συνάρτηση με την εξεταζόμενη Γεωγραφική περιοχή.	65
Σχήμα 6.7: Το συνολικό Κόστος των σταθμών βάσης (BS) σε συνάρτηση με την εξεταζόμενη περιοχή.	66

Σχήμα 6.8: Λογαριθμική συνολική Κατανάλωση Ισχύος του δικτύου σε συνάρτηση με τον Συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης ανά Γεωγραφική περιοχή.	67
Σχήμα 6.9: Λογαριθμική συνολική Κατανάλωση Ισχύος του δικτύου σε συνάρτηση με την εξεταζόμενη περιοχή.	68
Σχήμα 6.10: Λογαριθμική αποδοτικότητα κόστους ανά ρυθμό δεδομένων σε ετήσια βάση.	69

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1.1: Συγκριτικός πίνακας των γενιών κινητής τηλεφωνίας (1G-6G).	14
Πίνακας 2.1: Βιβλιογραφικές Έρευνες	23
Πίνακας 3.1: Συγκριτικός πίνακας τύπων UAV	29
Πίνακας 3.2: Συγκριτικός πίνακας των διαφόρων τύπων HAPS.	33
Πίνακας 4.1: Συγκριτική ανάλυση επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων.	37
Πίνακας 4.2: Αναλυτική παρουσίαση των δαπανών.	38
Πίνακας 5.1: Ενδεικτικές Τιμές Συντελεστών.	47
Πίνακας 5.2: Ειδική απόσβεση λόγω βροχόπτωσης.	48
Πίνακας 6.1: Τιμές των μεταβλητών στην προσομοίωσης.	58
Πίνακας 6.2: Τιμές συντεταγμένων των Εναέριων και των Δορυφορικών δικτύων.	59

## Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
UAV	Unmanned Aerial Vehicles Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα Χαμηλού Υψομέτρου
HAPS	High Altitude Platform/ Πλατφόρμα Μεγάλου Υψομέτρου
LEO	Low Earth Orbit Δορυφόρος Χαμηλής Γήινη Τροχιά
MEO	Medium Earth Orbit
GEO	Geostationary Earth Orbit
TWN	Terrestrial Wireless Networks
MATLAB	Matrix Laboratory
BS	Base Station
LTE	Long Term Evolution
LAP	Low Altitude Platform
RF	Radio Frequency (Ραδιοσυχνότητα)
AI	Artificial Intelligence
QoS	Quality of Service
WRC	World Radiocommunication Conference
3GPP	Third Generation Partnership Project
IOT	Internet of Things
FC	Fuel Cells
PRB	Physical Resource Blocks
SC	Small Cells
MC	Marco Cells
NBS	Number of base stations
EE	Energy Efficiency
CE	Cost-Efficiency
CAPEX	Capital Expenditure
TCO	Total Cost of Ownership
OPEX	Operating Expenses
GPS	Global Positioning System
NBS	Number of base stations

## Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή

Στη σύγχρονη κοινωνία ο τομέας των τηλεπικοινωνιών αποτελεί ζωτικό στοιχείο, εξασφαλίζει αποτελεσματική και αποδοτική επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Με τον όρο τηλεπικοινωνία, δηλώνει την επικοινωνία από μακρινή απόσταση και προέρχεται από το αρχαίο ελληνικό επίρρημα “Τηλέ”. Τα πρώτα μέσα τηλεπικοινωνίας αναπτύχθηκαν με τη χρήση της φωτιάς, ως επικοινωνιακό μέσο συνεχίστηκε μέχρι τον 19ο αιώνα. Με την πάροδο του χρόνου, οι τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες αναπτύχθηκαν σημαντικά αρχικά με τη χρήση της ενσύρματης και μεταγενέστερα ασύρματης συνδεσιμότητας. Η ενσύρματη συνδεσιμότητα πραγματοποιείται μέσω χαλκού και οπτικών ινών από τη δεκαετία του 1970. Τα Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών βιώνουν ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Οι απαιτήσεις για σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες όλο και αυξάνονται.

Επίσης τα Ασύρματα Δίκτυα διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: i) Επίγεια Ασύρματα Δίκτυα (Terrestrial Wireless Networks, TWN), που περιλαμβάνουν επίγειους σταθμούς βάσης (Base Station, BS), ii) Εναέρια Ασύρματα Δίκτυα, που αποτελούνται από ιπτάμενα εναέρια οχήματα (Unmanned Aerial Vehicles - UAV, High Altitude Platform - HAPS), και iii) Διαστημικά Ασύρματα Δίκτυα, που αποτελούνται από διάφορα είδη δορυφόρων (Satellites).

### 1.2 Εξέλιξη της κινητής τηλεφωνίας

Κατά τη δεκαετία του 1980, υπήρξε το μεγαλύτερο επίτευγμα των ασύρματων επικοινωνιών με την ανακάλυψη της πρώτης γενιάς (1G) κινητής τηλεφωνίας. Υποστήριζε αποκλειστικά μόνο φωνητικές κλήσεις μέσω αναλογικού κυμαλωτού σήματος. Η μέγιστη ταχύτητα που έφτανε 2,4 Kbps [1].

Μεταγενέστερα, ακολούθησε η 2<sup>η</sup> γενιά κατά τη δεκαετία του 1990, δίνοντας στον χρήστη τη δυνατότητα αποστολής μηνυμάτων SMS, περνώντας από τα αναλογικά σήματα στα ψηφιακά και εξασφαλίζοντας ταχύτητες που έφταναν στα 64 Kbps. Η τεχνολογία 2G κατέστησε δυνατή την αποστολή και λήψη μηνυμάτων κειμένου SMS και μηνυμάτων πολυμέσων (MMS). Κατά τη διάρκεια εξέλιξης της κινητής τηλεφωνίας μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης γενιάς στο 2.5G, υπήρξε η μετάβαση από τη μεταγωγή κυκλώματος σε μεταγωγή πακέτων. Το γεγονός αυτό, υπήρξε μεγάλο πλεονέκτημα στις κινητές επικοινωνίες για το λόγο ότι στη μεταγωγή πακέτων οι πληροφορίες τεμαχίζονται σε σταθερού μεγέθους πακέτα από bytes για τη αποστολή τους. Ωστόσο, στη μεταγωγή κυκλώματος η επικοινωνία δύο σταθμών δημιουργείται αποκλειστική σύνδεση μεταξύ τους η οποία διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας [2].

Δεν άργησε πολύ και η επόμενη γενιά (3G), όπου για πρώτη φορά η ανθρωπότητα κατάφερε να εξασφαλίσει πρόσβαση στο διαδίκτυο και τηλεδιασκέψεις. Στις αρχές του 2000 ανέπτυξε μέγιστες ταχύτητες που φτάναν τα 2 Mbps, ενώ για τη μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία μεταγωγή πακέτων (packet switching).

Η ένταξη της τέταρτης γενιάς Long Term Evolution (LTE) ολοκληρώθηκε το 2010, συνοδευόμενη από μεγάλη ανάπτυξη και μέγιστες ταχύτητες που φτάναν τα 100-1000 Mbps. Ορισμένες από τις εφαρμογές του LTE είναι η καλύτερη ποιότητα βίντεο, και η μικρότερη καθυστέρηση σήματος.







Όπως απεικονίζεται στον πιο κάτω Πίνακα 1.1, η πέμπτη γενιά των κινητών επικοινωνιών τέθηκε σε λειτουργία το 2020, η εν λόγω γενιά έφερε το Internet of Things, την έξυπνη πόλη και άλλες τεχνολογίες και υπηρεσίες, όπως π.χ. την επαυξημένη πραγματικότητα (AR) και την εικονική

πραγματικότητα (VR). Στο AR χρησιμοποιείται ένα φυσικό περιβάλλον, ενώ το VR αποτελείται από ένα εξ' ολοκλήρου εικονικό περιβάλλον. Η ταχύτητα δεδομένων ανήλθε στα 10 Gbps, με το ασύρματο δίκτυο του 5G να είναι αρκετά διαφορετικό από τις προηγούμενες γενιές. Για πρώτη φορά στην ιστορία των ασύρματων δικτύων, εντάσσονται εναέριοι σταθμοί βάσης (UAV, Satellite) [3].

### 1.3 6<sup>η</sup> γενιά κινητής τηλεφωνίας

Η ανάγκη εξέλιξης των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων προς την κατεύθυνση της ταχύτερης και της βελτιωμένης ασύρματης συνδεσιμότητας οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης της επόμενης γενιάς κινητής τηλεφωνίας (6G). Το δίκτυο 6G, θα εξακολουθήσει να στηρίζει τις τεχνολογίες και υπηρεσίες της πέμπτης γενιάς (5G), όπως το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of things, IoT). Η νέα γενιά των κινητών επικοινωνιών θα προσφέρει κάλυψη δικτύου παντού στοχεύοντας σε 99.99999% κάλυψη, αξιοποιώντας τόσο τα επίγεια όσο και τα εναέρια μέσα, καθώς και την συνεργασία επίγειων και εναέριων σταθμών. Επίσης, η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence, AI) θα διαδραματίσει σπουδαίο ρόλο στην αυτοματοποίηση των δικτύων 6G, των οποίων η ανάπτυξη αναμένεται να ολοκληρωθεί μέχρι το 2030, επιτυγχάνοντας ταχύτητες έως και 1 Tbps. Στον Πίνακα 1.1 αναφέρονται συνοπτικά οι τεχνολογίες, οι ρυθμοί δεδομένων και τις εφαρμογές υποστήριξης από 1G έως 6G. Τέλος, παρουσιάζονται υποστηριζόμενες υπηρεσίες, πρότυπα από το 1G στο 6G [4].

Πίνακας 1.1: Συγκριτικός πίνακας των γενιών κινητής τηλεφωνίας (1G-6G). [5],[6]

Γενιά	1G	2G	3G	4G	5G	6G
Εικόνα						
Χρονολογία	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s	2030s
Σημαντικά πρότυπα	AMPS	GSM, GPRS, EDGE	UMTS, HSPA, HSPA+, HSPA Advanced, LTE	LTE-Advanced, IMT-Advanced	IMT-2020	IMT-2030 (εκκρεμεί)
Μέγιστος ρυθμός δεδομένων	2.4 Kbps	64 Kbps	2 Mbps	100-1000 Mbps	1-10 Gbps	10 G - 1 Tbps
Frequency range	30 KHz	1.8 GHz	2-8GHz	3 - 30GHz	30-300 GHz	0.3-10 THz
Latency	>1000 ms	300 – 1000 ms	100 – 500 ms	20 – 100 ms	1 – 10 ms	0.1 – 1 ms

Multiple Access/ Multiplexing Schemes	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA, BDMA
<b>Βασικές Τεχνολογίες</b>	Αναλογικά σήματα, Μεταγωγή κυκλώματος	Ψηφιακό Σήμα, Μεταγωγή πακέτου (2.5G)	Mobile Internet	MIMO	Ενσωματωμένα επίγεια και δορυφορικά δίκτυα, νέες συχνότητες (mmWave), Cloud-RAN, SDN, NFV, κατάτμηση δικτύου	Νέο φάσμα (THz), Ενοποιημένα επίγεια, εναέρια και δορυφορικά δίκτυα
<b>Υποστηριζόμενες υπηρεσίες</b>	Φωνητική κλήση	SMS, MMS	Διαδικτυακές εφαρμογές	Εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας	Internet of Things, Έξυπνη πόλη, VR / AR	Τεχνητή νοημοσύνη, επικοινωνία ολογραμμάτων, Massive IoT, Blockchain

### 1.3.1 Κριτήρια ποιότητας δικτύων κινητής τηλεφωνίας

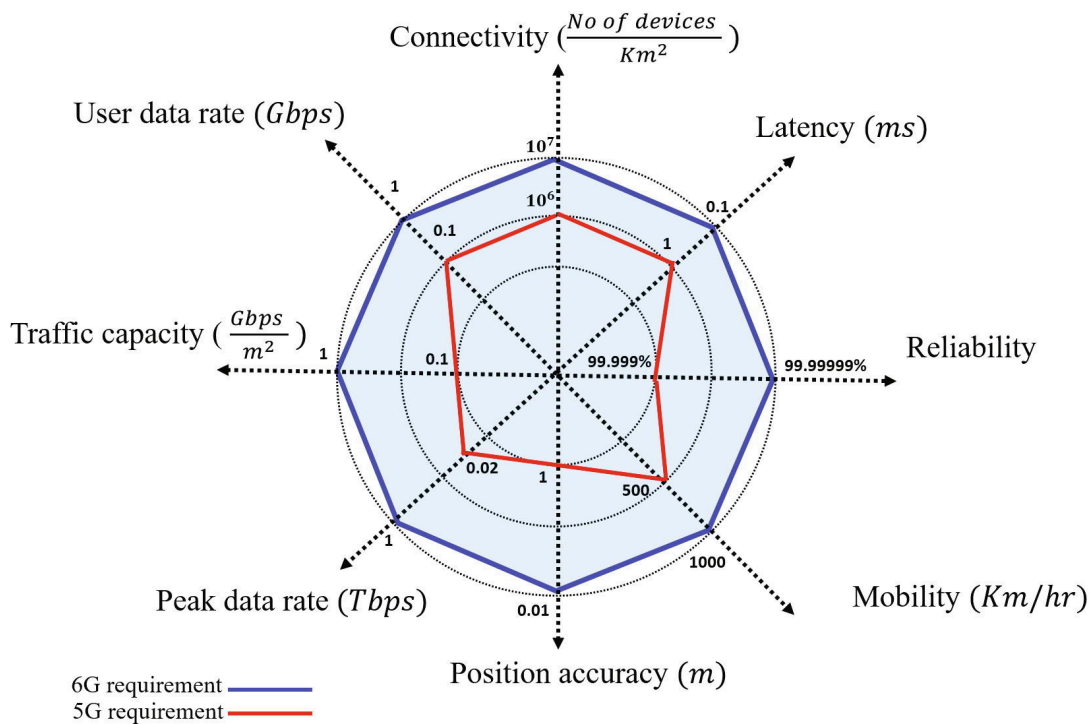
Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union, ITU) αποτελείται από διάφορα τμήματα, όπως το τμήμα ITU-R. Το τμήμα ITU-R είναι υπεύθυνο για τις ραδιοεπικοινωνίες και τη διεξαγωγή της Διεθνούς Διάσκεψης Ραδιοεπικοινωνιών (World Radiocommunication Conference, WRC), η οποία καθορίζει την ανάθεση συχνοτήτων και πραγματοποιείται κάθε λίγα χρόνια. Αν και η ITU έχει αρχίσει τη μελέτη των δικτύων επόμενης γενιάς, τα δίκτυα 6G αναμένονται να οριστούν πλήρως τα επόμενα χρόνια [7], με το σχετικό πρότυπο να παίρνει την ονομασία IMT-2030 [8].

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU, για την ανέγερση νέας γενιάς κινητής τηλεφωνίας καθορίζονται ορισμένα κριτήρια ποιότητας. Στο πιο κάτω Σχήμα 1.1 αναγράφονται τα σημαντικότερα κριτήρια ποιότητας της έκτης γενιάς (6G) των κινητών επικοινωνιών.

- Μέγιστος ρυθμός δεδομένων (Peak Data Rate): Μέγιστος ρυθμός δεδομένων ανά κυψέλη (Tbps).
- Φασματική αποδοτικότητα (Spectral Efficiency): Μέσος ρυθμός δεδομένων ανά μονάδα φάσματος (bit/s/Hz).
- Κινητικότητα (Mobility): Μέγιστη ταχύτητα στην οποία μπορεί να επιτευχθεί συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) (km/h).

- Καθυστέρηση (Latency): Χρόνος ενός πακέτο από την πηγή μέχρι τον προορισμό (ms).
- Πυκνότητα συνδέσεων (Connection Density): Συνολικός αριθμός συνδεδεμένων συσκευών ανά μονάδα επιφανείας (Devices/km<sup>2</sup>).
- Ενεργειακή αποδοτικότητα δικτύου (Network Energy Efficiency): Αριθμός bit που έχουν σταλεί με επιτυχία με κατανάλωση ενέργειας ίσης με 1 Joule (bits/Joule).
- Χωρητικότητα ανά μονάδα επιφανείας (Area Traffic Capacity): Συνολικός ρυθμός εξυπηρέτησης ανά γεωγραφική περιοχή (Gbps/m<sup>2</sup>).
- Αξιοπιστία στην επικοινωνία (Reliability): Η αξιοπιστία στην επικοινωνία (reliability) αποτελεί μια σπουδαία πτυχή που αφορά το βαθμό στον οποίο μπορούμε να εμπιστευτούμε τις πληροφορίες μας.
- Ακρίβεια θέσης (Position Accuracy (m)): Χρησιμοποιείται για να περιγραφεί της ακρίβειας της θέσης από βρίσκεται ο χρήστης.
- User Experienced data rate (Gbps): Ρυθμός δεδομένων που επιτυγχάνεται ανά χρήστη (Mbps).

Συγκρίνοντας τις δύο γενιές 5G και 6G, διαπιστώνεται ότι η έκτη γενιά (6G) βελτιώνει όλα τα κριτήρια ποιότητας, ενώ σε ορισμένα από αυτά επιτυγχάνει διπλάσιες τιμές.



Σχήμα 1.1: Σύγκριση των κριτηρίων ποιότητας 5G - 6G. [9]

### 1.3.2 Εφαρμογές στο 6G

Εν συντομία, θα λέγαμε ότι το 6G στοχεύει στην απόλυτη εμπειρία και στην υποστήριξη νέων υπηρεσιών, όπως αυτο-οδηγούμενα οχήματα και την επικοινωνία μέσω ολογραμμάτων. Κατόπιν, το 6G θα συμβάλει στην ιατρική κοινότητα επιτρέποντας απαιτητικές υπηρεσίες τηλειατρικής όπως την τηλεχειρουργική, όπου ένας ασθενής μπορεί να βρίσκεται σε νοσοκομείο της χώρας του και να χειρουργείται την ίδια στιγμή από γιατρό που βρίσκεται στο εξωτερικό.

- **Αυτοοδηγούμενα οχήματα**

Το αυτο-οδηγούμενα οχήματα είναι αυτοκίνητα με τη δυνατότητα να αντιλαμβάνονται το ευρύτερο περιβάλλον και να κινούνται με ελάχιστη ή με μηδενική χειροκίνητη παρέμβαση [10], [11]. Ωστόσο, για την επίτευξη της παρούσας εφαρμογής γίνεται συνδυασμός προηγμένων τεχνολογιών για την εξασφάλιση ενός αποτελεσματικού, εύχρηστου και ασφαλούς περιβάλλοντος ελέγχου της κυκλοφορίας [12], [13].

Με σκοπό την επίτευξη ενός ανώτερου επιπέδου ευφυούς οδήγησης, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε για τη λήψη αποφάσεων, όμως και στις πληροφορίες εισαγωγή για παράδειγμα: να επιβραδύνει κοντά στο σχολείο, όταν υπάρχει καταιγίδα είτε χιόνι, οδηγεί με υψηλή ταχύτητα στον αυτοκινητόδρομο, [14], [15].



Σχήμα 1.2: Αυτό οδηγούμενο με ικανότητα λήψεις αποφάσεων. [16]

- **Τηλεχειρουργική**

Η επιστήμη της ιατρικής είναι ευθέως συνυφασμένη με τα τεχνολογικά επιτεύγματα. Προς αυτή την κατεύθυνση, το 6G θα συμβάλει στον κλάδο της ιατρικής επιτρέποντας απαιτητικές υπηρεσίες όπως την τηλεχειρουργική, όπου ένας ασθενής μπορεί να βρίσκεται σε νοσοκομείο της χώρας του και να χειρουργείται την ίδια στιγμή από γιατρό που βρίσκεται στο εξωτερικό. Παρόλο που σχετικές μελέτες διεξάγονται εδώ και χρόνια, οι υψηλές απαιτήσεις των υπηρεσιών αυτών, όπως η ανάγκη για υπερβολικά μικρή καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων και πολύ μεγάλη αξιοπιστία στη σύνδεση, καθιστούν εφαρμογές όπως την τηλεχειρουργική μία υπηρεσία στόχο για τα δίκτυα επόμενης γενιάς 6G [17].



Σχήμα 1.3: Εξ αποστάσεως επέμβαση με χρήση τηλεχειρουργικής. [18]

- **Ολογραφική επικοινωνία (HTC)**

Η ολογραφική επικοινωνία έχει ως απώτερο σκοπό το ρεαλισμό στις επικοινωνίες, και βασίζεται στις τρεις διαστάσεις της οπτικής αντίληψης χρησιμοποιώντας τις θεμελιώδεις πτυχές της συμβολής και της περίθλασης. Η επικοινωνία ολογραμμάτων HTC αφορά μετάδοση δεδομένων πολλαπλών αισθήσεων, συνδυάζοντας π.χ. την οπτικοακουστική μετάδοση με την αφή, όσφρηση και τη γεύση [19]. Ωστόσο, η HTC θέτει σημαντικές προκλήσεις στα δίκτυα επικοινωνιών όσον αφορά την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS). Παρόμοια με την τηλεχειρουργική, μέχρι και την 5<sup>η</sup> γενιά κινητών επικοινωνιών δεν κατέστη δυνατή η υποστήριξη της υπηρεσίας, λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε ρυθμό δεδομένων, εύρος ζώνης και σφάλματος μετάδοσης [20].

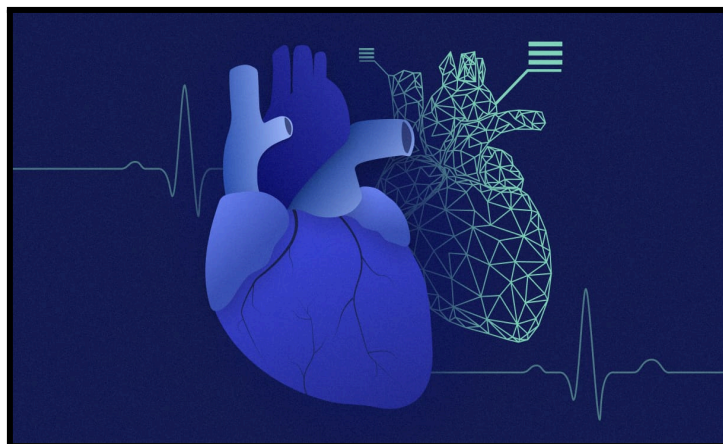


Σχήμα 1.4: Απεικόνιση ολογραφική επικοινωνίας. [21]

- **Ψηφιακό Δίδυμο (Digital twin)**

Το 6G θα επιτρέψει επίσης την ψηφιακή αναπαράσταση αντικειμένων καθώς και των λειτουργιών τους, μέσω ψηφιακών διδύμων σε πολλούς τομείς όπως π.χ. θα μπορούσαμε να κάνουμε μια επέμβαση σε ένα ψηφιακό δίδυμο κάποιας καρδιοπάθειας για να διαπιστώσουμε ποιο θα είναι το αποτέλεσμα προτού το δοκιμάσουμε στον ασθενή. Τα ψηφιακά δίδυμα σχεδιάστηκαν για πρώτη φορά από τη NASA τη δεκαετία του 1960 [22]. Από τότε βρίσκονται σε ερευνητικό επίπεδο ενώ η

ολοκληρωμένη τους εφαρμογή αναμένεται το 2030. Για τη δημιουργία ψηφιακών διδύμων είναι απαραίτητη η συλλογή πληροφοριών μέσω αισθητήρων και IoT συστημάτων για τη μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου [23].



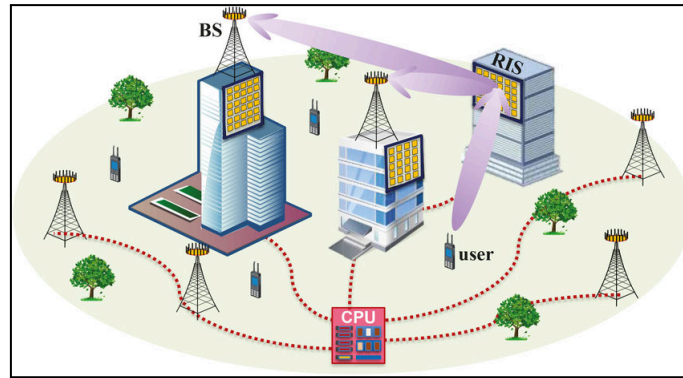
Σχήμα 1.5: Απεικόνιση Ψηφιακού Δίδυμου. [24]

### 1.3.3 Τεχνολογίες κλειδιά και ανοικτά προβλήματα

Ορισμένες τεχνολογίες “κλειδιά” που αναμένεται να παίξουν καθοριστικό ρόλο στα δίκτυα επόμενης γενιάς 6G, είναι οι Επαναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS), η Διαχείριση δικτύου με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (AI), χρήση νέων ζωνών συχνοτήτων (THz) και τα ενοποιημένα επίγεια, εναέρια και διαστημικά δίκτυα. Κλείνοντας, μία ακόμα 6G τεχνολογία κλειδί είναι η ενοποίηση των επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων, στα οποία θα επικεντρωθούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

- **Επαναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS)**

Η πρωτοποριακή τεχνολογία RIS αφορά στην τοποθέτηση επαναδιαμορφώσιμων έξυπνων επιφανειών κυρίως σε υψηλά κτίρια και πυλώνες για την ανάκλαση του σήματος με τέτοιο τρόπο ώστε να αντισταθμίζονται οι απώλειες διαδρομής, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2. Σημαντική χρησιμότητα έχουν σε πόλεις που υπάρχουν υψηλά εμπόδια που δυσχεραίνουν τη λήψη και εκπομπή του σήματος στον χρήστη. Τα RIS περιλαμβάνουν πολύ μικρά κρυσταλλικά στοιχεία για την αντανάκλαση του σήματος και έχουν τη δυνατότητα αυτόματης περιστροφής προς στο σημείο που χρειάζεται ο χρήστης ή προς την κατεύθυνση όπου το σήμα είναι καλύτερο. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν αυτόνομα λαμβάνοντας ενέργεια από κύματα ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency, RF) στον χώρο [25], [26], χωρίς να χρειάζονται συμβατική τροφοδοσία μέσω του δικτύου διανομής ενέργειας. Ωστόσο, σημαντικά ερευνητικά προβλήματα αποτελούν λόγω της θέσης τους η απρόσκοπτη παροχή ενέργειας αλλά και το πόσο συχνά οι επιφάνειες αυτές θα εναλλάσσουν κατάσταση, θα περνάνε δηλαδή από την κατάσταση επικοινωνίας σε εκείνη της ανίχνευσης περιβάλλοντος, ώστε να ξέρουν προς τα που θα στρίψουν δυναμικά, και το ανάποδο [27].



Σχήμα 1.6: Προσέγγιση δικτύου με τη βοήθεια των RIS. [28]

- **Διαχείριση δικτύου με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (AI)**

Τεχνολογίες κλειδιά αποτελούν επίσης η αποσύνθεση και η εικονικοποίηση του δικτύου, καθώς επίσης και η προσθήκη ευφυΐας σε αυτό, χρησιμοποιώντας προηγμένες μεθόδους, οι οποίες επιταχύνονται με τη χρήση μηχανικής μάθησης (Machine Learning, ML).

Προς αυτή την κατεύθυνση, σημαντική είναι η αυτοματοποιημένη διαχείριση του δικτύου με τεχνικές επίγνωσης σημασιολογίας, που λαμβάνουν υπόψη το πόσο πρόσφατα είναι τα δεδομένα αλλά και το πόσο σημαντικά. Έτσι, μπορεί να δοθεί προτεραιότητα π.χ. σε πρόσφατες τιμές του βηματοδότη ενός ανθρώπου έναντι των μετρήσεων θερμοκρασίας στο χώρο του ασθενή.

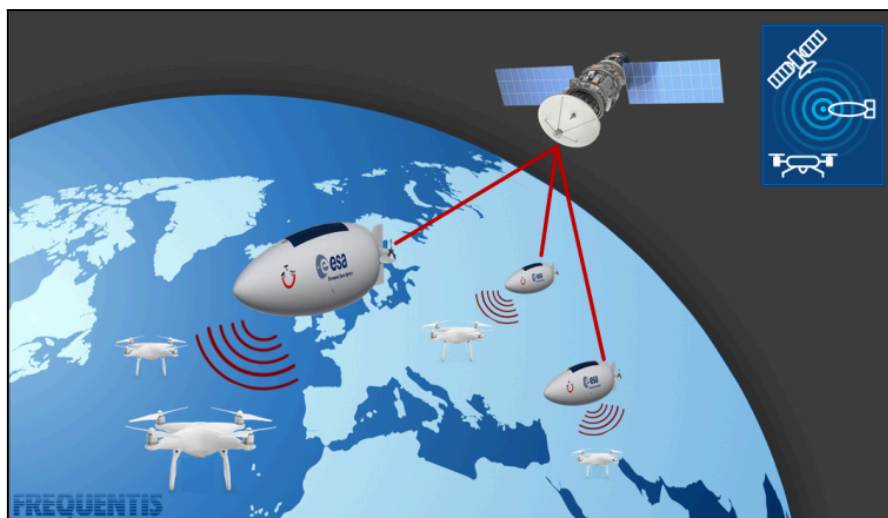
Μια ακόμα βασική τεχνολογία είναι η αυτοματοποιημένη ανάλυση του τεράστιου όγκου δεδομένων που είναι διαθέσιμα στο δίκτυο ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που θα βοηθήσουν στη λήψη στοχεύοντας π.χ. στη βελτιστοποίηση του δικτύου.

Με όλες τις παραπάνω τεχνικές επιτυγχάνεται υψηλή αποδοτικότητα ενέργειας και κόστους αλλά και υψηλή ευελιξία, ενώ είναι δυνατός ο πλήρης προγραμματισμός του δικτύου.

Σε ένα τέτοιο όμως πολύπλοκο σύστημα ανοικτό πρόβλημα αποτελεί η βέλτιστη ανάθεση από κοινού των επικοινωνιακών υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων, καθώς επίσης και η μείωση τόσο της παραγωγής όσο και της αποστολής περιττής πληροφορίας [29].

- **Ενοποιημένα επίγεια, εναέρια και διαστημικά δίκτυα**

Μία ακόμη τεχνολογία κλειδί είναι τα ενοποιημένα επίγεια, εναέρια και διαστημικά δίκτυα, στα οποία επικεντρωνόμαστε στην παρούσα μελέτη. Τα εναέρια μέσα περιλαμβάνουν μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα όπως drones και συστήματα πλατφόρμας μεγάλου υψομέτρου όπως τα αερόπλοια, τα οποία θα μπορούν να παρέχουν 6G κάλυψη πάνω από μεγάλες πόλεις, ενώ τα διαστημικά, δορυφόρους χαμηλής και μεσαίας γήινης τροχιάς καθώς και γεωστατικούς δορυφόρους. Με άλλα λόγια οδηγούμαστε σε μια πολυεπίπεδη 6G αρχιτεκτονική, της οποίας η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η ενοποίηση των επιπέδων. Προς αυτή την κατεύθυνση, ανοικτά ερευνητικά προβλήματα αποτελούν η απευθείας πρόσβαση των κινητών στο ενοποιημένο δίκτυο και η βέλτιστη ανάθεση πόρων λόγω της μεγάλης ετερογένειας του δικτύου. Τέλος, αποτελεί πρόκληση τόσο ο συντονισμός του ενοποιημένου δικτύου, όσο και οι απρόσκοπτες μεταπομπές είτε οριζόντιες είτε κάθετες, μεταξύ διαφορετικών επιπέδων [30].



Σχήμα 1.7: Ενοποιημένο δίκτυο επίγεια, εναέρια και διαστημικά δίκτυα. [31]

#### 1.4 Δομή Διπλωματικής και μεθοδολογία

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη και σύγκριση ενεργειακής απόδοσης τριών ειδών δικτύων (επίγεια, εναέρια και διαστημικά δίκτυα). Επίσης, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια.

Αρχίζοντας από το πρώτο κεφάλαιο, γίνεται γνωριμία με το δίκτυο 6G και τις καινοτόμες τεχνολογίες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναφέρονται παρόμοιες έρευνες που έχουν διεξαχθεί, ώστε να τεκμηριωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο, εστιάζουμε στην ανάλυση των δικτύων επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων, καθώς επίσης την ενοποίηση τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των δικτύων επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναλύεται το πρόβλημα που μελετείται, καθώς και το μαθηματικό μοντέλο που έχει χρησιμοποιηθεί.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής καθώς και προτάσεις βελτίωσης της.

#### 1.5 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιήθηκε μια ανασκόπηση από την πρώτη γενιά (1G) έως την έκτη γενιά (6G), στην οποία και εστιάζουμε. Μελετήσαμε τις καινοτόμες τεχνολογίες που θα προσφέρει η επόμενη γενιά (6G) με νέες δυνατότητες. Επιπλέον μελετήσαμε τα κριτήρια ποιότητας, τα οποία έχουν βελτιωθεί σημαντικά στην έκτη γενιά (6G).

## Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική έρευνα και προσεγγίσεις

### 2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, επικεντρώνεται στη μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Μελέτες προς αυτή την κατεύθυνση όλο και αυξάνονται ειδικότερα τον τελευταίο καιρό. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται αναφορά σε παρόμοιες μελέτες που έχουν διεξαχθεί, ώστε να μπορέσουμε να τεκμηριώσουμε την παρούσα διπλωματική εργασία.

### 2.2 Βιβλιογραφική έρευνα

Ο τομέας των τηλεπικοινωνιών σημειώνει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, με έρευνες που επικεντρώνονται στα 6G δίκτυα. Καθημερινά πραγματοποιούνται μελέτες στα επίγεια, εναέρια και τα διαστημικά δίκτυα όπου θα διαδραματίσουν σπουδαίο ρόλο στην έκτη γενιά (6G) το 2030. Σημαντικό είναι να επισημανθεί ότι αν και έχουν ολοκληρωθεί αρκετές μελέτες στα 6G δίκτυα σε διάφορους τομείς, μέχρι στιγμής δεν έχει διεξαχθεί καμία έρευνα με το ίδιο θέμα όπως της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται παρόμοιες σχετικές μελέτες που έχουν ολοκληρωθεί, ώστε να τεκμηριωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης, στην πρώτη στήλη, γίνεται παραπομπή της σχετικής βιβλιογραφίας. Ωστόσο, κατά την δεύτερη και τρίτη στήλη, πραγματοποιείται παραπομπή σε μελέτες που σχετίζονται την Ενεργειακή Απόδοση (Energy Efficiency, EE) και την Απόδοση κόστους (Cost Efficiency, CE). Ακόμη στις υπόλοιπες στήλες με τη βοήθεια της ένδειξης ✓ επισημαίνονται τα σημεία που επικεντρώνεται η κάθε μια έρευνα.

Στο [32], πραγματοποιείται μελέτη σχετικά με την ενεργειακή απόδοση (energy efficiency), με την χρήση των μη επανδρωμένων αεροχημάτων (UAV) και των επίγειων δικτύων gNB. Εξετάζοντας μια συγκεκριμένη περιοχή της περιοχής ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου. με σκοπό την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κατά την εξεταζόμενη περιοχή, έτσι προτείνεται μια βέλτιστη επιλογή. Με αποτέλεσμα τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος μειώνει αποτελεσματικά την κατανάλωση ενέργειας.

Ακολούθως, το [33], επικεντρώνεται στην ανάλυση δικτύων πέραν του 5G δικτύου με τη χρήση των των μη επανδρωμένων αεροχημάτων (UAV) και των μακρο-κυψελών (MC) gNB, όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση (energy efficiency). Καθώς η εξεταζόμενη περιοχή είναι ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο. Στην περιοχή αυτή, λαμβάνει υπόψη την βελτιστοποίηση της θέσης των μη επανδρωμένων αεροχημάτων (UAV). Όπως επίσης υπολογίζονται οι απώλειες διάδοσης που λαμβάνουν χώρα.

Στο [34], μελετώνται τα εναέρια δίκτυα ραδιοπρόσβασης, τα οποία εξετάζουν την κατανάλωση ισχύος σε εξεταζόμενη περιοχή των οκτώ τετραγωνικών χιλιομέτρων. Το σενάριο αυτό, αναφέρεται σε πυκνοκατοικημένη περιοχή με μεγάλης ανάγκης από τους κινητούς χρήστες UE.

Η έρευνα στο [35], επικεντρώνεται στο διαστημικό δίκτυο με τη χρήση δορυφόρο χαμηλής γήινη τροχιάς (LEO) με το σενάριο επικοινωνίας μεταξύ δορυφόρου και τελικού χρήστη UE. Οι δορυφόροι LEO προσφέρουν μια οικονομική λύση για την παροχή της παγκόσμιας κάλυψης. Επίσης το [37] αναφέρεται σε οικονομική ανάλυση των LEOs.

Στην συνέχεια, το [37] αναφέρεται στο μοντέλο ισχύος των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων με περιστρεφόμενα πτερύγια (rotary wing). Επίσης, εστιάζει στο πρόβλημα αποστολών των UAVs (rotary wing) που παρουσιάζουν μειωμένη αυτονομία, το οποίο βασίζεται σε εμπειρικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί. Το μοντέλο αυτό, λαμβάνει υπόψη του διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του drone, όπως ο χρόνος αιώρησης, την κατανάλωση ισχύος σε κατάσταση αδράνειας, κατανάλωση ισχύος σε σχέση με το υψόμετρο πτήσης.

Πίνακας 2.1: Βιβλιογραφικές Έρευνες

A/N	Ενεργειακή Απόδοση (Energy Efficiency, EE)	Απόδοση κόστους (Cost Efficiency, CE)	Επίγεια Δίκτυα (Terrestrial networks)	Εναέρια Δίκτυα (Aerial Networks)	Διαστημικά Δίκτυα (Satellite Networks)
[32]	✓		✓	UAV	
[33]	✓		✓	UAV	
[34]	✓		✓	HAPS	
[35]	✓	✓			✓
[36]		✓			✓
[37]	✓			UAV	
Proposed	✓	✓	✓	✓	✓

### 2.3 Επίλογος

Ανακεφαλαιώνοντας, στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται παραπλήσιες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, ώστε να τεκμηριωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Η παρούσα διπλωματική εργασία, στηρίζεται στο γεγονός ότι αν και υπάρχουν πολλές παρόμοιες έρευνες στον τομέα αυτόν δεν πραγματοποιηθεί ίδια έρευνα με την δικιά μας.

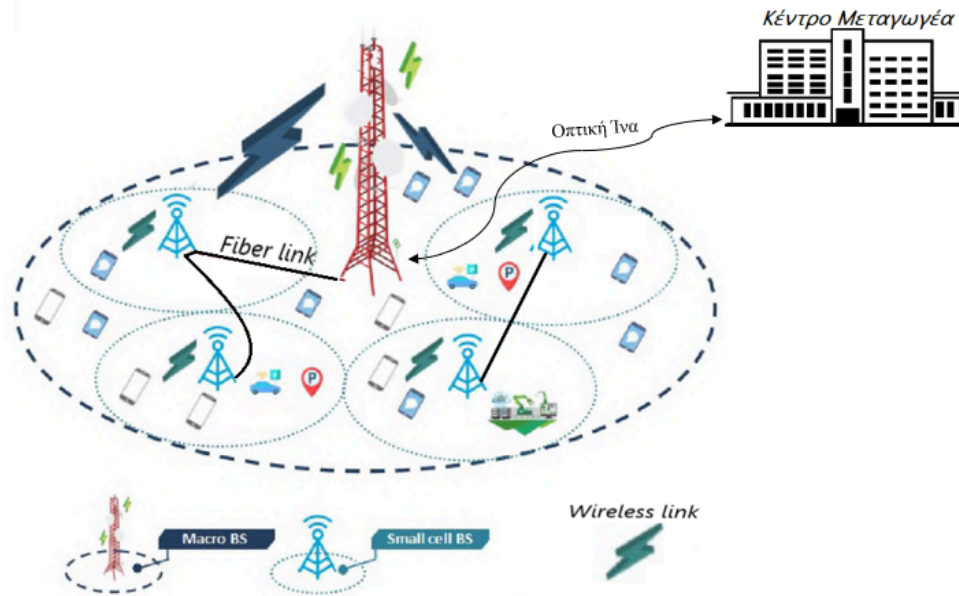
## Κεφάλαιο 3ο: Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης

### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, εστιάζουμε στη μελέτη των τριών δικτύων ραδιοπρόσβασης (επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων), επικεντρώνοντας στις εφαρμογές και τα χαρακτηριστικά σε κάθε κατηγορία. Στα εναέρια δίκτυα ραδιοπρόσβασης, δόθηκε περαιτέρω βαρύτητα, μελετώντας τα είδη των αεροσκαφών που υπάρχουν. Παράλληλα μελετήσαμε το Ενοποιημένο δίκτυο, το οποίο παρουσιάζει αρκετές δυνατότητες στην έκτη γενιά (6G).

### 3.2 Επίγεια Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης

Τα Επίγεια Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης, επίσης γνωστά ως κυψελοειδή δίκτυα, αποτελούν τα επικρατέστερα δίκτυα στην ιστορία των κινητών επικοινωνιών. Τα εν λόγω δίκτυα, εφαρμόστηκαν στις κινητές επικοινωνίες από τη δεύτερη γενιά (2G) κινητών επικοινωνιών μέχρι και σήμερα. Ειδικότερα για την έκτη γενιά, τα Επίγεια Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης παρουσιάζουν ευελιξία στη μετάδοση πληροφοριών τόσο ενσύρματα (με χρήση οπτικών ινών και χαλκού) όσο και ασύρματα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Η τοποθέτηση των σταθμών βάσης (Base Station, BS), είναι συνήθως σε υψηλά σημεία (βουνά, πολυκατοικίες) για ευρύτερη κάλυψη με ένα τυπικό υψόμετρο κεραίας μέχρι 100 μέτρα [38]. Αν και το καλώδιο είναι αξιόπιστο μέσο μετάδοσης δεδομένων, ο χαλκός και η οπτική ίνα είναι επιλογές ενσύρματης μεταφοράς δεδομένων που απαιτούν υψηλό κόστος και αρκετό χρόνο εγκατάστασης. Αντίθετα, τα Εναέρια Δίκτυα επιτρέπουν συνδεσιμότητα παντού με μικρό χρόνο εγκατάστασης για μεγάλες αποστάσεις. Λόγω των υψηλών συχνοτήτων που αναμένονται το 2030 με το 6G, το δίκτυο δε θα μπορούσε να υποστηρίζεται αποκλειστικά από επίγειους σταθμούς βάσης, καθώς λόγω των πολύ υψηλών συχνοτήτων, τα κύματα θα εξασθενούν πιο γρήγορα στον χώρο, μειώνοντας σημαντικά το εύρος κάλυψης [39]. Ένας σταθμός βάσης (BS) αποτελείται από μία μακρο-κυψέλη (Macro Cell, MC), στην οποία περιλαμβάνονται οι μικρο-κυψέλες (Small Cells, SC) όπως φαίνονται στην πιο κάτω εικόνα. Η μακρο-κυψέλη (MC) μπορεί να καλύπτει ακτίνα έως 2 km, καθώς επίσης χρησιμοποιούνται σε υπαίθριους χώρους όπως π.χ. σε βουνά προκειμένου να επιτύχουν μεγαλύτερη κάλυψη. Ωστόσο η κάλυψη των μικρο-κυψελών (SCs) είναι αρκετά μικρότερη της τάξεως μερικών μέτρων, ενώ τοποθετούνται σε κατοικημένες περιοχές, εξαιτίας των διαστάσεων τους. Επιπλέον, η αναγκαιότητα για χρήση μικρο-κυψελών (SCs) στα δίκτυα επόμενης γενιάς 6G είναι περισσότερο αναγκαία, που οφείλεται στη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων του φάσματος. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ένα ετερογενές δίκτυο επικοινωνίας. Όπως επίσης φαίνεται η ενσύρματη σύνδεση (με την χρήση οπτικής ίνας) μεταξύ σταθμού βάσης (BS) και του κέντρου μεταγωγέα. Παράλληλα, η συνδεσιμότητα μεταξύ των δύο ειδών σταθμών βάσης μικρής και ευρείας κάλυψης μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους, είτε ενσύρματα είτε ασύρματα.



Σχήμα 3.1: Ετερογενές δίκτυο επίγειων σταθμών βάσης.

### 3.3 Εναέρια Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης

Τα Εναέρια Δίκτυα Ραδιοπρόσβασης, τα οποία αναμένονται να ενσωματωθούν στην έκκτη γενιά (6G) κινητών επικοινωνιών, διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: i) τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs) που πετούν σε χαμηλό υψόμετρο, επίσης γνωστά ως πλατφόρμες χαμηλού υψομέτρου (Low Altitude Platform - LAP), και ii) Πλατφόρμες Μεγάλου Υψομέτρου (HAPS) που βρίσκονται στο επίπεδο της στρατόσφαιρας.

#### 3.3.1 Μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα UAVs

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs) ευρέως γνωστά και ως drones, εντάσσονται στην κατηγορία των εναέριων ασύρματων δικτύων. Πρόκειται για μια καινοτόμο τεχνολογία, η οποία αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στα δίκτυα έκκτης γενιάς (6G). Αν και τα UAVs πρωτοχρησιμοποιήθηκαν για στρατιωτικές εφαρμογές και συγκεκριμένα για την απομακρυσμένη επιτήρηση εχθρικών εδαφών [40],[41], μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναέριοι σταθμοί βάσης (BS) παρέχοντας αξιόπιστες συνδέσεις. Μερικές από τις εφαρμογές των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων, περιλαμβάνουν την παροχή συνδεσιμότητας σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης, π.χ. σε πλημμύρες, πυρκαγιές και σεισμούς, την παροχή βοήθειας στην έρευνα και διάσωση, καθώς και τη μεταφορά ελαφρών αντικειμένων και ιατρικών προμηθειών (cargo drone) [42],[43]. Επιπλέον, τα UAVs μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην υποστήριξη των συστημάτων IoT, και συγκεκριμένα στην αύξηση της εμβέλειάς τους (η διαθέσιμη ισχύς εκπομπής των συστημάτων IoT είναι συνήθως περιορισμένη, γεγονός που δυσχεραίνει την εμβέλεια τέτοιων συστημάτων), λειτουργώντας ως ασύρματοι αναμεταδότες [44]-[48]. Μάλιστα, χάρη στα ενδογενή χαρακτηριστικά που διαθέτουν δύνανται να αλλάζουν θέση για τη διατήρηση ποιότητας σύνδεσης [49], ενώ διακρίνονται για το χαμηλό κόστος τους [50].

Κάθε μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV) βασικό στοιχείο για την λειτουργία του είναι η μπαταρία, η οποία συχνά είναι τοποθετημένη στο κύτος του αεροσκάφους. Μία από τις κύριες

κατηγορίες μπαταριών που χρησιμοποιούνται είναι οι μπαταρίες λιθίου (Li-ion) και οι μπαταρίες πολυμερών λιθίου (Li-Po). Για τον απομακρυσμένο έλεγχο των UAVs, κάθε περιοχή διαθέτει σταθμό, ο οποίος αναλαμβάνει την εξ αποστάσεως διαχείριση και την επαναφόρτιση της μπαταρίας του αεροσκάφους. Ένα από τα ανοιχτά ζητήματα των UAVs, αποτελεί η απουσία του αεροσκάφους για επαναφόρτιση. Ωστόσο, αναμένεται να φέρει λύσεις η εναλλακτική μέθοδος φόρτισης των UAVs σε αντίθεση με τον συμβατικό τρόπο. Μία από τις μεθόδους είναι με σήματα Ραδιοσυχνότητας (RF) όπου βρίσκονται στον χώρο [51]. Επιπλέον, μία δεύτερη μέθοδος είναι χρησιμοποιώντας λέιζερ (laser) [51], όπου θα υπάρχει η δυνατότητα να φορτίζεται καθώς είναι εν πτήση.

Ο χειρισμός των μη επανδρωμένων αεροσκαφών είναι δυνατή είτε μέσω συστήματος τηλεχειρισμού είτε μέσω ενσωματωμένου λογισμικού, με ανθρώπινη παρέμβαση ή και χωρίς αυτήν. Παράλληλα, ο προσδιορισμός της θέσης του γίνεται μέσω του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης (Global Positioning System, GPS) [52], [53].

### 3.3.1.1 Τύποι αεροσκαφών UAVs

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες UAVs, με την κάθε μία να διαθέτει μεγάλη ποικιλία από μοντέλα, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

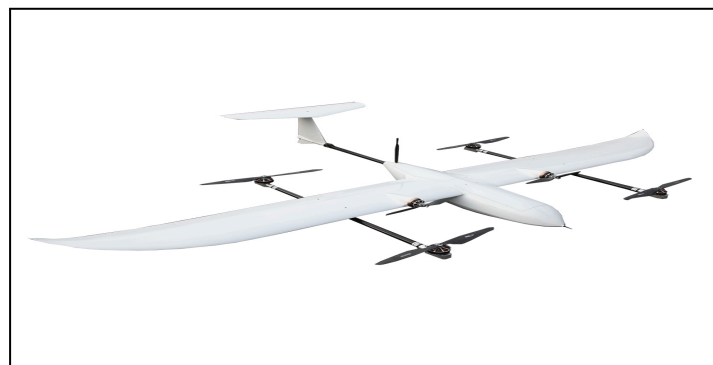
- **UAVs με περιστρεφόμενα πτερύγια (rotary wing):** Μια από τις πιο διαδεδομένες κατηγορίες Drone είναι αυτή των (rotary wing). Σε αυτά ανήκουν τα Quadrotors, και τα Cargo UAVs. Εμφανίζουν ευελιξία στην κάθετη προσγείωση και απογείωση, λόγω των περιστρεφόμενων πτερυγίων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Χρησιμοποιούνται ευρέως στις μελέτες που γίνονται για τα δίκτυα επόμενης γενιάς 6G, λόγω της κάθετης προσγείωσης και απογείωσης που διαθέτουν, είναι επίσης κατάλληλα για να παραμένουν σταθερά στον αέρα ακίνητα (hovering).
- **UAVs με σταθερά πτερύγια (fixed wing):** Κατά τη διάρκεια του παγκόσμιου πολέμου, το 1903 αναπτύχθηκε το πρώτο μη επανδρωμένο αεροσκάφος με σταθερό πτερύγιο (fixed wing) και ονομάστηκε Hewitt-Sperry Automatic Airplane [54]. Τα UAVs με σταθερό πτερύγιο (fixed wing), δεν έχουν δυνατότητα για κάθετη προσγείωση και απογείωση, αλλά υποστηρίζουν μεγάλες ταχύτητες. Τα αεροσκάφη αυτά, χρησιμοποιούνται για σκοπούς όπως επιτήρηση μεγάλου και υψηλού βεληνεκούς ακόμη για χαρτογράφηση τρισδιάστατων εικόνων. Ενδεικτικό παράδειγμα UAV με σταθερά πτερύγια (fixed-wing) απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3.
- **Υβριδικά UAVs με σταθερά πτερύγια (fixed-wing hybrid):** Τα υβριδικά UAVs fixed-wing hybrid, η υβριδική αυτή σχεδίαση συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των αεροσκαφών με σταθερά πτερύγια (fixed-wing) και των αεροσκαφών περιστρεφόμενων πτερυγίων (rotary-wing). Ωστόσο οι κατασκευαστές δεν κατάφεραν τον απόλυτο συνδυασμό, όπως δεν είναι κατάλληλα για αιώρηση όπως τα rotary wing, ακόμη για κίνηση προς τα εμπρός με μεγάλη ταχύτητα όπως τα fixed-wing. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ευρέως για μεταφορές, λόγω της δυνατότητας κάθετης προσγείωσης και απογείωσης που διαθέτουν [55].



Σχήμα 3.2: Περιστρεφόμενα πτερύγια → rotary wing [56].



Σχήμα 3.3: Σταθερά Πτερύγια →fixed wing [57].



Σχήμα 3.4: Υβριδικό Σταθερά Πτερύγια →fixed-wing hybrid [58].

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η κατανάλωση ισχύος δύο τύπων Drone, με βάση το υψόμετρο πτήσης τους. Γίνεται αναφορά σε UAV με περιστρεφόμενο πτερύγιο και σε υβριδικά UAVs με σταθερά πτερύγια, καθώς επίσης δε βρέθηκαν αντιστοιχες πληροφορίες για UAVs με σταθερά πτερύγια. Πιο συγκεκριμένα, για τη διεξαγωγή πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων, στο UAVs με (Rotary-Wing) επιλέχθηκε το μοντέλο UAV DJI MATRICE 100, το οποίο είναι μεσαίας κατηγορίας drone. Το UAV DJI MATRICE 100 που έχει επιλεγεί, έχει θεωρητικό διαθέσιμο χρόνο αιώρησης 30.66 λεπτά, με τον συνδυασμό της μπαταρίας TB48D, η οποία έχει επιλεγεί από τις διαθέσιμες επιλογές. Ο πραγματικός διαθέσιμος χρόνος αιώρησης του UAV είναι 26,66 λεπτά. Κρατώντας το 13% της μπαταρίας, επιτρέπει στο UAV να επιστρέψει στη βάση του για επαναφόρτιση. Η μπαταρία αυτή, έχει τάση λειτουργίας 22,8 V και χωρητικότητα 5.7Ah, ενώ χρειάζονται 44 λεπτά για μια πλήρη φόρτιση. Με

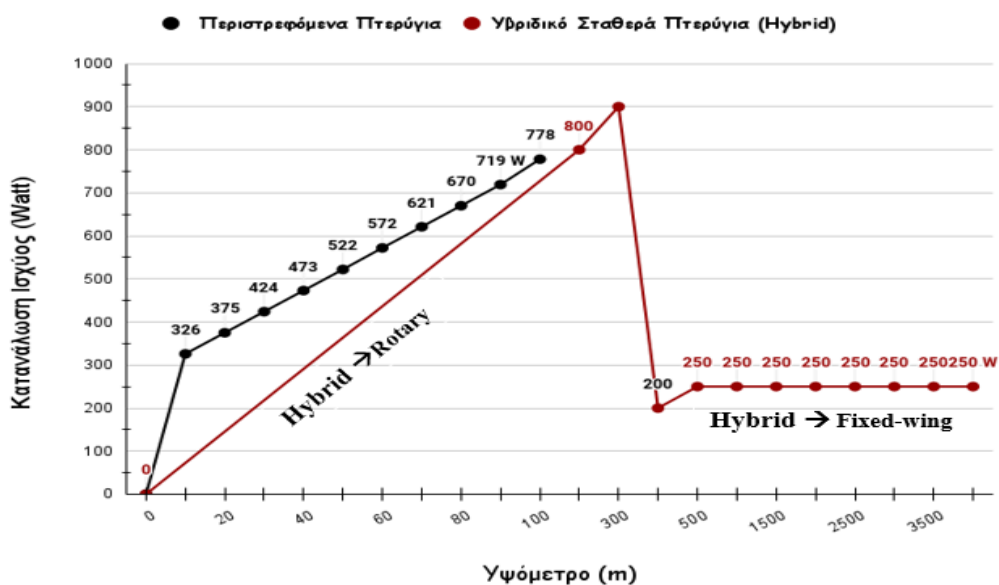
αποτέλεσμα να χρειαζόμαστε τρία UAVs, ώστε να καλυφθεί μία ώρα ή μία ολόκληρη μέρα, τα οποία θα εναλλάσσονται μεταξύ για φόρτιση και θα επιστρέφουν πίσω σε λειτουργία. Ακόμη διαθέτει μέγιστο υψόμετρο πτήσης 3 χιλιόμετρα [59].

Για την δημιουργία του Σχήματος 3.5, το υβριδικό UAV με σταθερά πτερύγια αποτελεί βασική αναφορά το [60], το οποίο έχει την ικανότητα να απογειώνεται και να προσγειώνεται κάθετα (Vertical Takeoff and Landing, VTOL). Το εν λόγω UAV, λειτουργεί υβριδικά, κατά την κατακόρυφη απογείωση από 0 έως 300 μέτρα ύψος χρησιμοποιείται ως Rotary-Wing UAV, ενώ πέραν των 300 μέτρων χρησιμοποιείται ως Fixed-Wing UAV. Όσον αφορά το UAV (Rotary-Wing), αποτελεί βασική αναφορά το Κεφάλαιο 5 στην υποενότητα *Μοντέλο Ισχύος για Rotary-Wing UAVs* η εξίσωση (5.9). Αντίστοιχα για την δημιουργία του Σχήματος 3.6, η κατανάλωση ενέργειας σε (joule) για το UAV (Rotary-Wing), η εξίσωση (5.8) στην υποενότητα *Μοντέλο Ισχύος για Rotary-Wing UAV* είναι κύρια αναφορά.

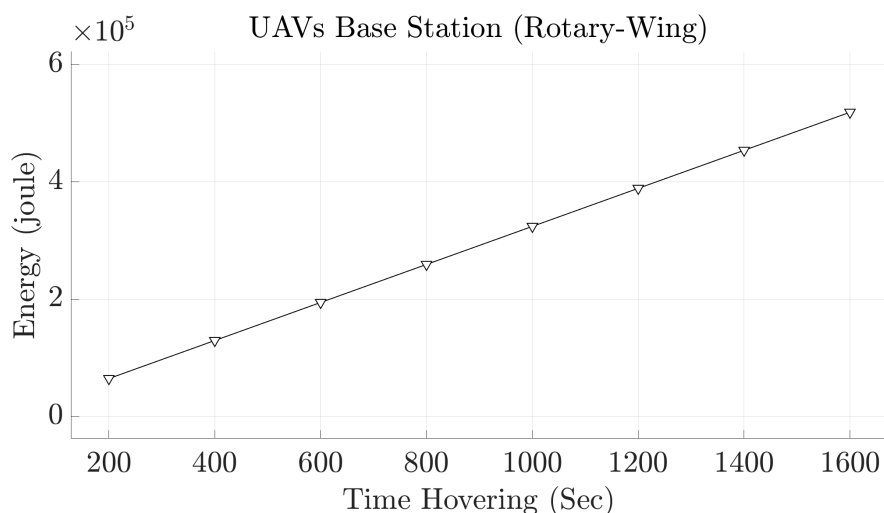
Στο Σχήμα 3.5, φαίνονται οι τιμές κατανάλωσης ισχύος σε (Watt) κατά τον κάθετο άξονα, ενώ στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι τιμές υψομέτρου πτήσης σε μέτρα (m). Όσον αφορά το UAVs με περιστρεφόμενα πτερύγια (Rotary-Wing), η κατανάλωση ισχύος αυξάνεται γραμμικά σε συνάρτηση με το υψόμετρο πτήσης.

Από την άλλη μεριά, το υβριδικό UAV από 0 έως 300 μέτρα πτήσης σε λειτουργία με περιστρεφόμενα πτερύγια (Rotary-Wing), η κατανάλωση ισχύος αυξάνεται γραμμικά. Ωστόσο, σε λειτουργία με σταθερά πτερύγια (Fixed-Wing) από 300 έως 4000 μέτρα πτήσης, σημειώνεται μείωση της κατανάλωσης ισχύος, όπου σταθεροποιείται στα 250 Watt. Λόγω της αεροδυναμικής αλλαγής σε μεγαλύτερα υψόμετρα πτήσης η πυκνότητα του αέρα γίνεται πιο αραιή, έτσι παρουσιάζεται μικρότερη αντίσταση στο UAV. Συνεπώς, το σκάφος χρειάζεται λιγότερη ενέργεια [60]-[62].

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται η κατανάλωση ενέργειας σε joule (J) σε συνάρτηση με τον διαθέσιμο χρόνο αιώρησης (Time Hovering) σε δευτερόλεπτα (sec). Διαπιστώνεται ότι η κατανάλωση ενέργειας συνδέεται άμεσα με τον χρόνο πτήσης του μη επανδρωμένου αεροσκάφους. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται ο χρόνος αιώρησης (Time Hovering), τόσο αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας. Στον Πίνακα 3.1 φαίνεται συγκριτική ανάλυση των δύο ειδών αεροσκαφών UAVs.



Σχήμα 3.5: Κατανάλωση ενέργειας σε συνάρτηση με το υψόμετρο πτήσης.



Σχήμα 3.6: Κατανάλωση ενέργειας σε συνάρτηση με τον διαθέσιμο χρόνο αιώρησης.

Πίνακας 3.1: Συγκριτικός πίνακας τύπων UAV [63]-[65].

Τύπος UAV	Περιστρεφόμενο πτερόγιο	Σταθερό Πτερόγιο	Υβριδικό Σταθερά Πτερόγιο
Διαστάσεις	0.5-1.5m	3m το άνοιγμα φτερών	2.5m άνοιγμα φτερών
Χρονική διάρκεια πτήσης	1-2 ώρες	1-10 ώρες	1-10 ώρες
Πηγή ενέργειας	Μπαταρία	Μπαταρία	Μπαταρία
Ωφέλιμο φορτίο	30~50 kg	100 kg	10~15 kg
Ταχύτητα Πτήσης	Μικρή, -	Μεγάλη, 200m/s	Μεσαία, (100km/h)
Ευελιξία για κάθετη Προσγειωση - Απογειωση	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ
Εμπορικά Παραδείγματα	Professional UAV KUR-1000PRO	Industrial UAS Penguin C	FDG33 VTOL UAV 3 KGS payload for surveillance

<b>Εφαρμογές για κάθε τύπου UAVs</b>	Φωτογράφιση, Τηλεπικοινωνίες, Χαρτογράφηση, Μεταφορά αντικειμένων, Γεωργία, Επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης	Κυρίως χρησιμοποιούνται για μακρινές αποστάσεις. Επιτήρηση, Φωτογράφιση, Επιχειρήσεις, Στρατιωτικές επιχειρήσεις, πυρόσβεση πυρκαγιών	Φωτογράφιση, Τηλεπικοινωνίες, Χαρτογράφηση, Επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης
--------------------------------------	---	---	---

### 3.3.2 Πλατφόρμες Μεγάλου Υψόμετρου (HAPS)

Οι στρατοσφαιρικές ασύρματες επικοινωνίες αναμένεται να αποτελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι των δικτύων επόμενης γενιάς (6G). Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) αναγνώρισε για πρώτη φορά την τεχνολογία αυτή ως δορυφορικούς αναμεταδότες στρατοσφαιρικού επιπέδου στο World Radio Conference 1997 (WRC-97) [66], [67]. Εναλλακτικά, οι εν λόγω αναμεταδότες είναι γνωστοί ως ψευδο-δορυφόροι, ενώ ανήκουν στην κατηγορία των Εναέριων Ασύρματων Δικτύων. Με τον όρο “Στρατόσφαιρα”, χαρακτηρίζεται το δεύτερο στρώμα από την επιφάνεια της Γης σε υψόμετρο 18-50 km [68], ενώ η τοποθέτηση των πλατφόρμων μεγάλου υψόμετρου HAPS κυμαίνεται στα 18-23 km [34]. Για αυτό τον λόγο τα HAPS αποκαλούνται και ως στρατοσφαιρικά δίκτυα. Η υψομετρική θέση των HAPSs θεωρείται επίσης ασφαλής όσον αφορά την εναέρια κυκλοφορία, καθώς όλα τα επιβατικά και στρατιωτικά αεροσκάφη βρίσκονται σε χαμηλότερο υψόμετρο. Επιπλέον, διατίθενται διάφορα μοντέλα και τύποι HAPS, όπως θα δούμε πιο κάτω.

Ο κύριος στόχος τους, είναι να διευρύνουν την κάλυψη εκεί όπου δεν υπάρχουν επίγειες ασύρματες υποδομές όπως στις αγροτικές περιοχές και στις μη αναπτυσόμενες χώρες (Κένυα) ή και να εξασφαλίσουν συνδεσιμότητα όταν επικρατούν έντονα καιρικά φαινόμενα. Τα συστήματα HAPS παρέχουν υπηρεσίες σε κινητούς δέκτες, όπως κινητά τηλέφωνα, τρένα, αυτοκίνητα και επιβατικά αεροσκάφη [69].

Αρκετά από τα μοντέλα HAPS, έχουν την ικανότητα να λειτουργούν αυτόνομα με ηλιακούς συλλέκτες, όπου η ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες λιθίου, προκειμένου να τροφοδοτείται το αεροσκάφος για μερικές ώρες. Η απουσία καταιγίδων, σύννεφων ή οποιασδήποτε άλλης μορφής καιρικών διαταραχών σε αυτά τα ύψη, καθιστά αποτελεσματική την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας από τα HAPS [70]. Σημαντικός είναι ο ρόλος που μπορεί να διαδραματίσει η υποστήριξη κυψελών καυσίμου (fuel cells, FC), για την παροχή ενέργειας στο αεροσκάφος κατά τη διάρκεια της νύχτας. Αντίθετα, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά που παρέχουν ηλιακή ενέργεια στο αεροσκάφος κατά τη διάρκεια της ημέρας [71].

Τέλος, βασικό πλεονέκτημα της τοποθέτησης των HAPS στη στρατόσφαιρα είναι η εξοικονόμηση ενέργεια, λόγω θερμοκρασιών που κυμαίνονται (μεταξύ  $-50^{\circ}\text{C}$  και  $-15^{\circ}\text{C}$ ) δεν χρειάζονται συστήματα ψύξης έτσι εξοικονομούν ενέργεια [72].

#### 3.3.2.1 Τύποι Αεροσκαφών HAPS

Παρακάτω αναλύονται οι τύποι αεροσκαφών HAPS:

- **Μη Επανδρωμένα Αερόστατα (Aerostatic Balloons):**

Τα μη επανδρωμένα αερόστατα, είναι τα αρχαιότερα μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Στις αρχές

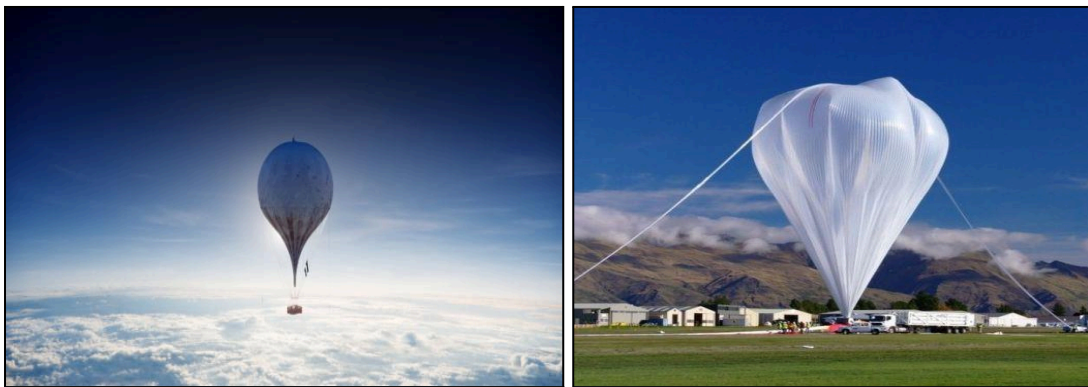
του 1849, κατά τη διάρκεια της Αυστριακής πολιορκίας στην Βιέννη οι Αυστριακές δυνάμεις εκτόξευσαν 200 αερόστατα θερμού αέρα που μετέφεραν βόμβες [73]. Με το πέρασμα της τεχνολογικής ανάπτυξης, τα μη επανδρωμένα αερόστατα μπορούν να αποτελέσουν δυνατή λύση για τη μετάδοση σήματος στα 6G δίκτυα. Στο Σχήμα 3.7, φαίνονται ενδεικτικά παραδείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για το δίκτυο της έκτης γενιάς (6G) είναι το Scientific project gas balloon και το Google Loon (δεν είναι πλέον σε λειτουργία, επειδή δεν υπάρχει άμεσο οικονομικό όφελος στην Google και τα μπαλόνια ξέφευγαν συχνά από την πορεία τους λόγω ανέμων που επικρατούσαν), ενώ υποστήριζαν μεγάλη διάρκεια πτήσης που ανέρχεται στις 300 μέρες. Χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και για ερευνητικούς σκοπούς [74]. Το άνω μέρος του σκάφους είναι εφοδιασμένο με ήλιο, έτσι ώστε να μπορούν να αιωρούνται. Επίσης, είναι γνωστά για τις μικρές διαστάσεις 10-15 μέτρα, ενώ χρησιμοποιούν το συμβατικό καύσιμο για πηγή ενέργειας.

- **Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη Σταθερών Πτερυγίων (Aerodynamic fixed-wing):** Μερικά από παραδείγματα κατηγορίας αποτελούν το Facebook Aquila, και το Airbus Zephyr, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Είναι μοντέλα HAPS βασισμένα στην συγκομιδή ηλιακής ενέργειας με φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετημένα στα πτερύγια του σκάφους. Έως τώρα υπάρχουν δέκα μοντέλα zephyr, τα οποία έχουν άνοιγμα πτερυγίων 25 m, ενώ μέγιστο υψόμετρο πτήσης 21 km. Ακόμη η μάζα του σκάφους είναι μικρή φτάνοντας τα 62 κιλά. Επιπλέον παρουσιάζουν την μικρότερη διάρκεια πτήσης στις 64 ημέρες [75]. Στο μπροστινό μέρος του σκάφους υπάρχουν κινητήρες με έλικες για την απογείωση και προσγείωση, καθώς επίσης για την πλοήγηση του σκάφους. Ακόμη όταν βρίσκονται στη στρατόσφαιρα κάνουν κυκλικές κινήσεις, σε αντίθεση απ' τα αερόπλοια που μπορούν να παραμείνουν ακίνητα. Τέλος, με τη τοποθέτηση ενός HAPS μπορούν να αντικαταστήσουν έως και 250 επίγειους σταθμούς [76].
- **Μη Επανδρωμένα Αερόπλοια (Airship):** Τα αερόπλοια εφευρέθηκαν και εξελίχθηκαν στις αρχές του 20ού αιώνα, από έκτοτε έχουν εξελιχθεί σημαντικά. Στο Σχήμα 3.9 φαίνονται ενδεικτικά παραδείγματα των σύγχρονων μη επανδρωμένων αερόπλοιων (Airships), τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο δίκτυο επόμενης γενιάς (6G) αυτής της κατηγορίας αποτελούν το Thales Alenia Stratobus, Zeppelin. Τα Μη Επανδρωμένα Αερόπλοια είναι σχεδιασμένα ώστε να λειτουργούν υβριδικά (με δύο καταστάσεις) [77], [78], έτσι να παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα παρουσιάζουν την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από 5 έως 10 χρόνια σε σχέση με τα αερόστατα (Aerostatic Balloons) και τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Aerodynamic fixed-wing) [79].

Η δομή του σκάφους αποτελείται απ' τον εξωτερικό και εσωτερικό χώρο. Στον εξωτερικό επάνω τμήμα, υπάρχουν ηλιακοί συλλέκτες για την αυτονομία του σκάφους. Επιπλέον στον εξωτερικό χώρο υπάρχουν τέσσερα πτερύγια στο επάνω και κάτω σημείο του σκαφους, με σκοπό την πλοήγηση του. Ωστόσο, στο εσωτερικό κάτω τμήμα υπάρχει το προηγμένο σύστημα κυψελών καυσίμου (fuels cells, FC) [80]. Στο εσωτερικό μεσαίο τμήμα, υπάρχει ξεχωριστό χώρος, ο οποίος είναι κλειστός αεροστεγώς για την τοποθέτηση του ηλίου, έτσι ώστε το σκάφος να αιωρείται [81]. Όπως προαναφέρθηκε, η υποστήριξη κυψελών καυσίμου (FC) διευκολύνει την παροχή ενέργειας στο αεροσκάφος κατά τη διάρκεια της νύχτας, σε αντίθεση με τα ηλιακά φωτοβολταϊκά όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.9 παρέχουν ηλιακή ενέργεια στο αεροσκάφος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο, αποτελούν μια αρκετά αποδοτική και οικονομική τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα τους είναι οι χαμηλοί ρύποι που εκπέμπουν αντιθέτως με τον συμβατικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η δομή

της κυνέλης καυσίμου, είναι παρόμοια με αυτή της μπαταρίας. Επίσης, το υδρογόνο βρίσκεται σε αφθονία στη φύση και μπορεί να παραχθεί με διάφορους τρόπους όπως π.χ. με ηλεκτρόλυση του νερού (διασπαση του νερού κατά την οποία το νερό διασπάται στα βασικά στοιχεία όπου το αποτελούν, υδρογόνο και οξυγόνο με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος) [82].

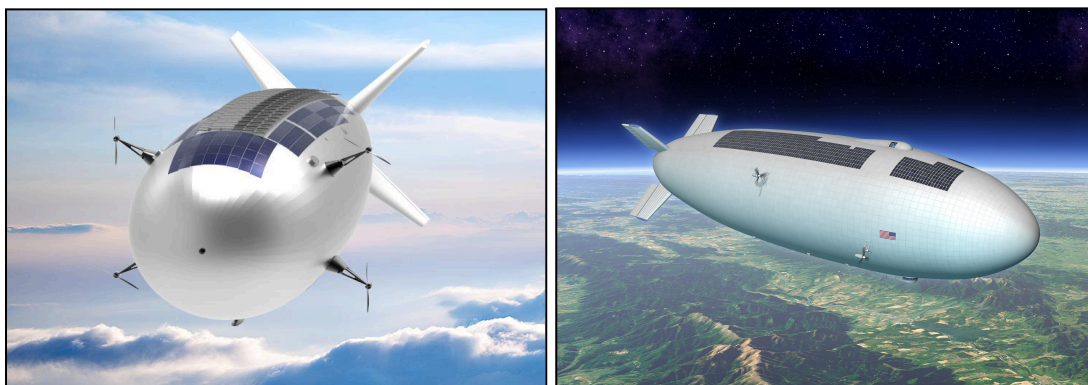
Επίσης, τα Airship είναι γνωστά για τις δυνατότητες που διαθέτουν, όπως το μεγάλο ωφέλιμο φορτίο 500 kg/5~6 kW. Ωστόσο τα μη επανδρωμένα αερόστατα (Aerostatic Balloons), παρουσιάζουν τις μικρότερες δυνατότητες με ωφέλιμο φορτίο <100kg/<100W. Τέλος, τα αεροσκάφη σταθερών πτερυγίων (Aerodynamic fixed-wing), σημειώνουν ωφέλιμο φορτίο <150kg/<500W [83].



Σχήμα 3.7: Μη Επανδρωμένα Αερόστατα. [84], [85].



Σχήμα 3.8: Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη Σταθερών Πτερυγίων. [86],[87].



Σχήμα 3.9: Μη Επανδρωμένα Αερόπλοια. [88],[89].

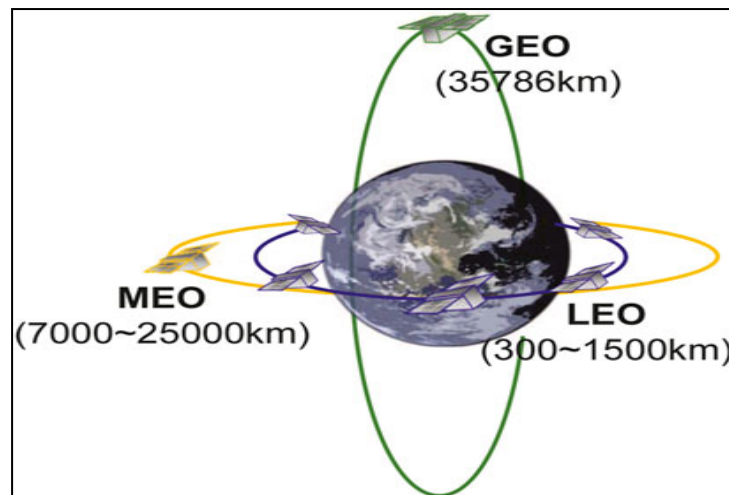
Πίνακας 3.2: Συγκριτικός πίνακας των διαφόρων τύπων HAPS.

Τύπος HAPS	Μη Επανδρωμένα Αερόστατα	Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη	Μη Επανδρωμένα Αερόπλοια
Διαστάσεις	10-15m	25 m το άνοιγμα φτερών	150 - 200 m μήκος
Χρονική διάρκεια πτήσης	300 ημέρες	26 ημέρες	1~αρκετά χρόνια
Πηγή ενέργειας	Φυσικά Καύσιμα	Ηλιακά φωτοβολταϊκά	-Ηλιακά φωτοβολταϊκά (+fuel cells)
Payload (idle+transmit)	<100kg/<100W	<150kg/<500W	500 kg/5~6 kW
Εμπορικά Παραδείγματα	Google Loon, Scientific project gas balloon	Facebook Aquila, Airbus Zephyr	Thales Alenia Space, EcoSat Airship, ATLAS
Εφαρμογές	Google Loon: Τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες Scientific project gas balloon: Εξερεύνηση της ατμόσφαιρας, Τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες	Facebook Aquila: Τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες Airbus Zephyr: Παρακολούθηση, Τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες	Συμμετέχει σε επιστημονικές έρευνες, Τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες

### 3.4 Διαστημικές Επικοινωνίες

Οι δορυφόροι ανάλογα με το υψόμετρο της τροχιάς τους χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10. Οι γεωστατικοί δορυφόροι (Geostationary Earth Orbit, GEO) έχουν ύψος τροχιάς ίσο με 35786 km, λόγω της απόστασης αυτής καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της γήινης επιφάνειας (το 1/3 της Γης) [90]. Ωστόσο, το μεγάλο υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται επιφέρει αισθητή εξασθένηση και σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις των σημάτων. Οι δορυφόροι μέσης γήινης τροχιάς (Medium Earth Orbit, MEO) βρίσκονται στα 7000-25.000 km ύψος, ενώ οι δορυφόροι χαμηλής γήινης τροχιάς (Low Earth Orbit, LEO) στα 300-1.500 km. Λόγω των μεγάλων απαιτήσεων ταχύτητας και μικρής καθυστέρησης στο 6G, ιδιαίτερη βαρύτητα έχει δοθεί στους δορυφόρους χαμηλής γήινης τροχιάς (LEO), καθώς βρίσκονται σε κοντινότερη απόσταση από τη Γη. Έτσι, επιτυγχάνεται μικρότερη καθυστέρηση [91] στο σήμα διάδοσης από και προς τον χρήστη. Ωστόσο, η δυνατότητα για ευρύτερη συνδεσιμότητα αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών επόμενης γενιάς, όπως για παράδειγμα σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές, σε θαλάσσιες περιοχές [91] που δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη επίγειων δικτύων. Ακόμη για την αντιμετώπιση του προβλήματος κάλυψης συστημάτων IoT, όπως εξηγήθηκε νωρίτερα [92].

Τέλος, χρήσιμο είναι να επισημανθεί ότι βασικό μειονέκτημα των δορυφόρων LEO, είναι η ανάγκη για διαρκείς μεταπομπές σήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι LEO βρίσκονται κοντά στη Γη, με αποτέλεσμα να δέχονται μεγαλύτερη δύναμη έλξης (από τη Γη), και να κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα για να την εξισορροπήσουν, ώστε να παραμείνουν στο επιδιωκόμενο ύψος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο δορυφόρος να έχει οπτική επαφή για ένα μικρό χρονικό διάστημα με ένα συγκεκριμένο σημείο στη Γη και να υπάρχει ανάγκη μεταπομπής της σύνδεσης σε γειτονικό LEO δορυφόρο.



Σχήμα 3.10: Επισκόπηση δορυφόρων σε τροχιά. [93]

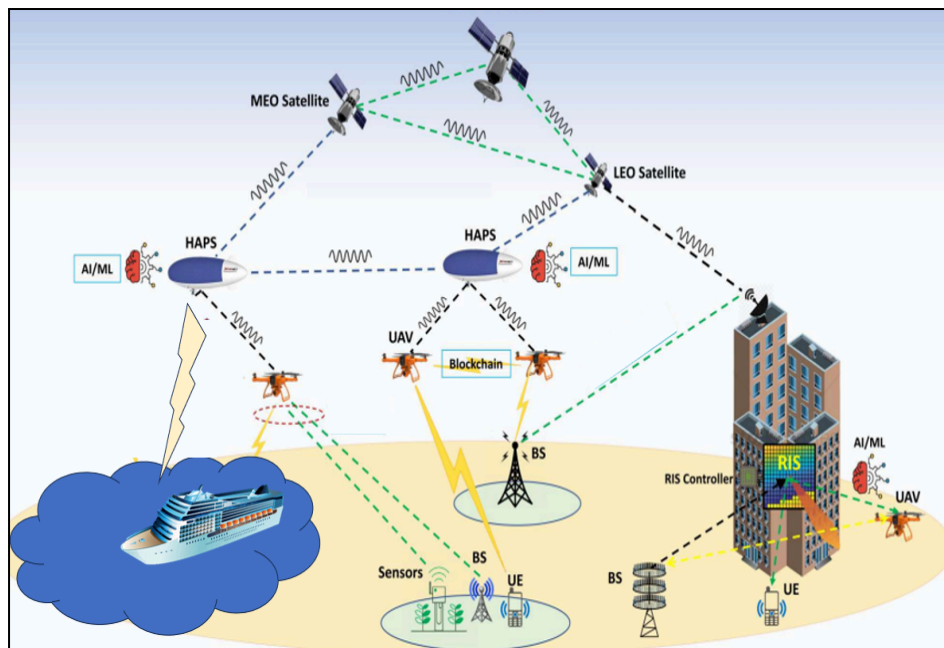
### 3.5 Ενοποιημένο δίκτυο στην έκτη γενιά (6G)

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση των επιμέρους δικτύων, κρίνεται κατάλληλη μια σφαιρική προσέγγιση. Το Ενοποιημένο δίκτυο προκύπτει από την ενοποίηση των τριών δικτύων, επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων και παρουσιάζεται στην παρούσα υποενότητα. Στην έκτη γενιά (6G), το δίκτυο δεν περιορίζεται μόνο σε επίγεια δίκτυα επικοινωνίας, αλλά συνδυάζει τόσο τα επίγεια, εναέρια όσο και τα δ δίκτυα. Η ενοποίηση των τριών δικτύων επιφέρει σημαντική βελτίωση των χαρακτηριστικών του δικτύου όπως π.χ. χωρητικότητα, καθυστέρηση, κινητικότητα, ενεργειακή αποδοτικότητα δικτύου κ.λπ.. Ακόμη, αναμένεται μια πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα σε οποιοδήποτε μέρος του πλανήτη χωρίς περιορισμούς π.χ Θαλάσσιες περιοχές που καλύπτουν το 70 % της Γης, Μη αναπτυγμένες περιοχές, Συνδεσιμότητα επιβατικών αεροσκαφών, κ.λπ. όπως ήδη προαναφέρθηκαν [94].

Στο Σχήμα 3.11 απεικονίζεται η τοπολογία ενός Ενοποιημένου δικτύου, η ολοκλήρωση του οποίου αναμένεται το 2030. Μεταξύ των διαφορετικών σταθμών βάσης (Satellite, Haps, Drone, Terrestrial base station), υπάρχει ευελιξία ως προς την συνδεσιμότητα τους. Πιο συγκεκριμένα, συνδέονται μεταξύ τους μέσω απευθείας ζεύξη για τη μεταφορά πληροφοριών. Η μεταφορά αυτή, πραγματοποιείται κυρίως όταν υπάρχουν έντονα καιρικά φαινόμενα, ιδίως στα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα UAVs.

Από την άλλη μεριά, η συνδεσιμότητα μεταξύ τερματικών χρηστών και διαφορετικών σταθμών βάσης, μπορούν να στέλνουν (upload) και να λαμβάνουν (download) δεδομένα μέσω απευθείας

ζεύξης, χωρίς την υποστήριξη άλλου μέσου αναμετάδοσης. Η λειτουργία αυτή, προσφέρει άμεση σύνδεση και ανταλλαγή δεδομένων παρέχοντας γρήγορη και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων, καθώς επίσης βελτιώνοντας την απόδοση του δικτύου. Επιπλέον η συνδεσιμότητα αυτή προσφέρει βελτίωση όσον αφορά την καθυστέρηση του δικτύου, ώστε να υπάρχει καλύτερη εμπειρία του χρήστη [95]. Παράλληλα στο Σχήμα 3.11 φαίνονται μερικές από τις τεχνολογίες κλειδιά όπου αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 1. Οι σύγχρονες τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για τη λήψη αυτοματοποιημένων αποφάσεων στο δίκτυο, καθώς επίσης οι επαναδιαμορφώσιμες εξυπνες επιφάνειες (RIS), οποίες αντανακλώνται για την μείωση απωλειών σημάτων αποστολής και λήψης (upload, download).



Σχήμα 3.11: Τοπολογία Ενοποιημένου δικτύου.[95]

### 3.6 Επίλογος

Συνοψίζοντας, στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε μια λεπτομερή εξέταση των επιμέρους δικτύων επίγειων, εναέριων και των διαστημικών δικτύων στο (6G). Όσον αφορά το εναέριο δίκτυο, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση, αναλύονται σε βάθος οι τύποι των UAVs και των HAPS. Τέλος, μελετήθηκε το Ενοποιημένο δίκτυο που θα υλοποιηθεί στην έκτη γενιά (6G) το 2030 με πολύ περισσότερες δυνατότητες από τα προηγούμενα δίκτυα.

## Κεφάλαιο 4ο: Σύγκριση Δικτύων Ραδιοπρόσβασης

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό συγκρίνονται τα επίγεια εναέρια και τα διαστημικά δίκτυα, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Επικεντρωνόμαστε σε βασικά χαρακτηριστικά όπως π.χ. η διάρκεια λειτουργία, εδαφική κάλυψη, το υψόμετρο. Ένα επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό είναι το κόστος, το οποίο αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο 6G δίκτυο.

### 4.2 Σύγκριση των τριών ειδών δικτύων

Μετά τη διεξαγωγή περιγραφικής ανάλυσης των επιμέρους δικτύων στο Κεφάλαιο 3, κρίνεται σκόπιμη μια συγκριτική ανάλυση των επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων ραδιοπρόσβασης. Στον Πίνακα 4.1 αναγράφονται τα κυριότερα γνωρίσματα των τεχνολογιών, όπως παρουσιάζονται παρακάτω. Τα τρία είδη δικτύων διαφέρουν σε πολλά σημεία, όπως π.χ. το υψόμετρο τους, διάρκεια λειτουργίας, κ.λπ..

Αρχίζοντας, με βάση το υψόμετρο που είναι τοποθετημένα τα BS, τα επίγεια δίκτυα είναι τοποθετημένα πολύ χαμηλότερα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δίκτυα, με αποτέλεσμα να διαθέτουν την μικρότερη γεωγραφική κάλυψη (Coverage) [96]. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια το υψόμετρο σε κάθε τύπο σταθμό βάσης (BS), παράλληλα παρατηρείται η αύξηση της Γεωγραφικής κάλυψη. Πιο συγκεκριμένα, οι γεωστατικοί δορυφόροι (GEO), σημειώνουν την μεγαλύτερη γεωγραφική κάλυψη έως 3500 km [90] δηλαδή το  $\frac{1}{3}$  της Γης. Λόγω του υψόμετρο πτήσης (35786 km) των GEOs, όμως εμφανίζουν μεγάλη χρονική καθυστέρηση διάδοσης του σήματος από 250 ms έως 750 ms [97], η οποία είναι δέκα οκτώ φορές μεγαλύτερη από τον δορυφόρο LEO που είναι από 30 έως 40 ms [98]. Επιπλέον, οι δορυφόροι χαμηλής γήινης τροχιάς (LEOs) έχουν μέγιστη γεωγραφική κάλυψη 1000 km [99], με ακτίνα κυψέλης (radius cell) πενήντα χιλιόμετρα [96]. Στην συνέχεια, η πλατφόρμα μεγάλου υψομέτρου (HAPS) σημειώνει γεωγραφική κάλυψη (Coverage) από 100 έως 200 km ανά πλατφόρμα [100], ενώ έχουν καθυστέρηση διάδοσης 10 ms, η οποία είναι μικρότερη από το διαστημικό δίκτυο[97].

Όσον αφορά την χρονική διάρκεια λειτουργίας, τα UAVs σημειώνουν την μικρότερη διάρκεια ζωής από 0.3 έως 30 ώρες. Λόγω της μικρής διάρκειας λειτουργίας, θα πρέπει να υπάρχουν εναλλακτικά UAVs, τα οποία θα αλλάζονται για επαναφόρτιση της μπαταρίας. Οι δορυφόροι GEO παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής μέχρι 15 χρόνια [101], ενώ μια μικρότερη διάρκεια οι δορυφόροι LEOs και τα αερόπλοια (Airship) από 5 έως 10 χρόνια [79], [99].

Σχετικά με το ωφέλιμο φορτίο (payload), τα μη επανδρωμένα εναέρια μέσα (UAV), διαθέτουν το μικρότερο ωφέλιμο φορτίο που μπορούν να μεταφέρουν. Αντίθετα, τα διαστημικά δίκτυα παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο, συγκεκριμένα οι γεωστατικοί δορυφόροι (GEO) οι οποίοι μπορούν να μεταφέρουν έως και 6500 Kg. Ακόμη, οι δορυφόροι χαμηλής γήινης τροχιάς (LEOs) σημειώνουν μια πιο μικρή τιμή η οποία είναι 500 Kg [97].

Εξίσου σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη ενός βέλτιστου δικτύου είναι το κόστος. Αρχίζοντας απ' το επίγειο δίκτυο με τη χρήση του Macro Cell, το κόστος ανάπτυξης, λειτουργίας και συντήρησης (Total Cost of Ownership, TCO) ανέρχεται στις 168 χιλιάδες ευρώ για έναν BS [100]. Επίσης, παρουσιάζουν υψηλό κόστος TCO για την ανάπτυξη δικτύου μεγάλων αποστάσεων (30 km), αντίθετα πρόκειται για μια οικονομική λύση για κάλυψη μικρών αποστάσεων (1 km). Τα Small Cells

σημειώνουν το μικρότερο κόστος TCO σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δίκτυα, που ανέρχεται στις 30 000 ευρώ ανά έτος [102].

Όσον αφορά το κόστος TCO των UAVs με (Fixed-Wing), ποικίλοι λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως π.χ ο τύπο του Drone, την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά που διαθέτει. Το TCO κόστος με το συγκεκριμένο UAV που έχει επιλεγεί (Hermes 900), ανέρχεται τις 200 000 ευρώ ανά BS [103]. Για τις πλατφόρμες HAPS, το κόστος TCO ανέρχεται στο ποσό των 0,5 εκατ. δολαρίων ευρώ ανά HAPS [100], [104].

Από την άλλη μεριά, οι δορυφορικές επικοινωνίες παρουσιάζουν υψηλό κόστος TCO, σε αντίθεση απ'τους επίγειους και εναέριους σταθμούς βάσης (BS). Συγκεκριμένα, οι δορυφόροι LEO καταγράφουν υψηλό κόστος TCO, το οποίο κυμαίνεται από 5 έως 15 δισ. ευρώ για έναν δορυφόρο. Ακόμη και το μέσο κόστος αγοράς (capital expenditure, CAPEX) είναι επίσης υψηλό, το οποίο κυμαίνεται από 25 έως 30 δισ. ευρώ [97]. Παράλληλα τα λειτουργικά έξοδα, κόστος εκτόξευσης και το μέσο κόστος εκτόξευσης (Cost OPEX) ανέρχεται στις ~ 7.000 EUR/kg [97].

Αν ένας δορυφόρος LEO έχει βάρος 1000 κιλά και το κόστος εκτόξευσης (Cost OPEX) ανέρχεται στις ~ 7.000 EUR/kg, με αποτέλεσμα το κόστος TCO ανέρχεται στις 750 000 EUR. Ωστόσο, για ένα δοφόρο LEO μικρών διαστάσεων τύπου Oneweb έχει βάρος 150 κιλά που αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στα 6G δίκτυα λόγω των διαστάσεων τους. Συνεπώς το κόστος TCO ανέρχεται στις 155 000 EUR, στο οποίο θα αναφερθούμε για τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Οι γεωστατικοί δορυφόροι GEO χρειάζονται μεγαλύτερο κόστος OPEX που ανέρχεται στις ~ 21.000 EUR/kg [97]. Γνωρίζοντας ότι απαιτούνται λιγότεροι δορυφόροι MEO και GEO σε σχέση με τους δορυφόρους LEO, συνεπώς το κόστος CAPEX είναι μικρότερο στους GEO δορυφόρους. Τέλος, οι γεωστατικοί δορυφόροι GEO παρουσιάζουν το μικρότερο κόστος TCO από τους υπόλοιπους δορυφόρους, λόγω ότι χρειάζονται λιγότεροι δορυφόροι για την κάλυψη της Γης [97].

Πίνακας 4.1: Συγκριτική ανάλυση επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων. [96],[98]-[99],[101],[103]-[104]

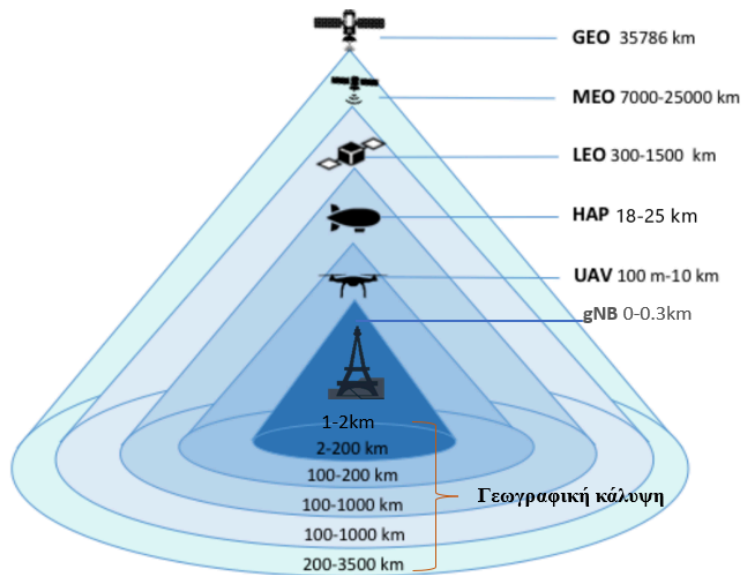
	<b>Επίγεια (BS)</b>	<b>UAVs</b>	<b>HAPS</b>	<b>Δορυφόροι</b>
<b>Υψόμετρο</b>	0 - 0.3km	0.1 - 10 km	18 - 25 km	300 - 35786 km
<b>Χρονική διάρκεια λειτουργίας</b>	N/A	0.3 - 30 ώρες	5 - 10 Χρόνια στα Airship	5-10 Χρόνια LEO 12 Χρόνια MEO 15 Χρόνια GEO
<b>Αυτονομία</b>	OXI	OXI	NAI	NAI
<b>Γεωγραφική κάλυψη (Coverage)</b>	Έως 1 - 2 km ανά Σταθμό βάσης	Έως 10 km	100 έως 200 km ανά BS	Έως 3500 km στο GEO το 1/3 της Γης, LEO έως 1000 km
<b>Ακτίνα κυψέλης (Cell)</b>	0.1 - 1 km	0.1-5 km	>10km	<b>LEO:</b> 50 km, <b>GEO:</b> >400 km
<b>Καθυστέρηση</b>	Μικρή	Μεταβάλλεται	Χαμηλή	<b>LEO:</b> 30-40 ms,

<b>διάδοσης</b>	< 1ms	Στρατιωτικά: 1ms Συμβατικά: 60-70 ms	10 ms	<b>GEO:</b> 250-750 ms
<b>Ωφέλιμο φορτίο (Payload)</b>	N/A	10-100 kg	100-500 kg	<b>LEO:</b> ~500 Kg (μέσο βάρος) <b>GEO:</b> >1000 Kg (έως 6500 Kg) (βάρος)
<b>Κόστος</b>	- Υψηλό για μεγάλες εκτάσεις - Μικρότερο από το δορυφορικό για μικρες αποστασεις	Φθηνό	Μεσαίο, μικρότερο από BS	Υψηλό, μεγαλύτερο από το κόστος ανάπτυξης ενός επίγειου δικτύου

Πίνακας 4.2: Αναλυτική παρουσίαση των δαπανών. [97],[100],[102],[104]-[105]

<b>Κόστος ανάπτυξης, λειτουργίας και συντήρησης των BSs</b>				
<b>gNB</b>	<b>Small Cells</b>	<b>UAVs (Fixed-Wing)</b>	<b>HAPS (Airship)</b>	<b>Satellite LEO</b>
<p><b>Για ακτίνα 1 km</b> TCO: € 168 k/BS</p> <p><b>Για ακτίνα 30 km</b> TCO: 151 εκατομμύρια € /1 BS</p>	<p><b>TCO 1 BS:</b> <b>EUR 30 000/year</b></p>	<p><b>CAPEX:</b> ~\$750 000 per UAV</p> <p><b>TCO:</b> για 5 έτη ζωής: Eur 200 000/year</p>	<p><b>CAPEX:</b> Μικρότερο Σε σύγκριση με τους δορυφόρους</p> <p><b>OPEX:</b> Υψηλότερο σε σύγκριση με τους δορυφόρους</p> <p><b>TCO Airships:</b> 5 εκ. / 10 χρόνια / 1 BS</p> <p><b>άρα:</b> 0.5 εκ. \$ / 1 χρόνο/ 1 BS</p>	<p>-Μέσο κόστος αγοράς <b>CAPEX:</b>EUR 25-30bn, <b>-Για 1 LEO CAPEX</b> 500 000 \$ / LEO</p> <p>-Κόστος εκτόξευσης -Κόστος λειτουργίας <b>OPEX: ~ 7000</b> EUR/kg</p> <p>-Κόστος κατασκευής, -Κόστος λειτουργίας, -Κόστος συντήρησης, -Κόστος εκτόξευσης <b>-Total network TCO:</b> 5 - 15 δισ. ευρώ.</p>

				<p><b>-Για 1 LEO για 1000 kg Sat:</b>  <b>TCO:</b> Euro 750 000 /ανά LEO/ανά έτος</p> <p><b>- Για 150 kg LEO Oneweb</b>  <b>TCO:</b> Euro 155 000 /ανά LEO/ανά έτος</p> <p><b><u>MEO:</u></b>  <b>CAPEX:</b>                  Μικρότερο από τους δορυφόρους LEO  <b>TCO:</b> 1,5 δισ. €/ BS</p> <p><b><u>GEO:</u></b>  <b>CAPEX GEO &lt;</b>  <b>CAPEX MEO &lt;</b>  <b>CAPEX LEO</b>  <b>OPEX:</b> Μέσο κόστος εκτόξευσης ~ 21.000 EUR/kg  <b>TCO:</b> Λιγότερο από 1 δισ. €/1 BS</p>
--	--	--	--	--



Σχήμα 4.1: Υψόμετρο διαφορετικών σταθμών βάσης σε συνάρτηση με την Γεωγραφική κάλυψη. [106]

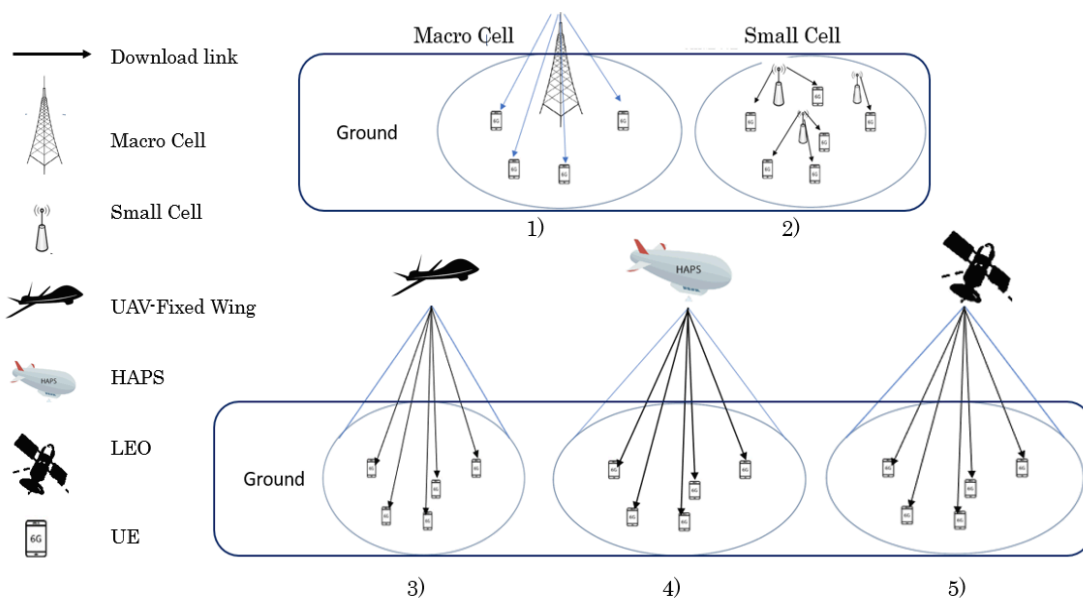
### 4.3 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των επιμέρους δικτύων επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων, τα οποία εμφανίζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Μερικές από αυτές, την μεγαλύτερη γεωγραφική κάλυψη υποστηρίζουν τα δορυφορικά δίκτυα, ενώ τη μικρότερη από το επίγειο δίκτυο. Επιπλέον, μελετήθηκαν οι απαιτούμενες δαπάνες σε κάθε σταθμό βάσης. Με μια σφαιρική ματιά, τα δορυφορικά δίκτυα απαιτούν το υψηλότερο κόστος.

## Κεφάλαιο 5ο: Μοντέλο Συστήματος και Πρόβλημα προς Επίλυση

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, δίνεται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Καθώς αναφέρονται οι απώλειες διάδοσης, όπως απώλειες ελεύθερου χώρου, απώλειες λόγω βροχής, απώλειες ατμοσφαιρικών αερίων, που εμπίπτουν τα τρία δίκτυα ραδιοπρόσβασης (επίγειο, εναέριο και διαστημικό). Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην αναλυτική προσομοίωση του σεναρίου επικοινωνίας, και στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφεται με λεπτομέρεια το πρόβλημα επίλυσης της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 5.1: Αναλυτική προσομοίωση Σεναρίου επικοινωνίας.

### 5.2 Μοντέλο Ισχύος στο δίκτυο Ραδιοπρόσβασης

Το μοντέλο αυτό, χρησιμοποιήθηκε στο Επίγειο, Εναέριο και Διαστημικό δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (gNB, SC, UAV, HAPS, LEO). Στο πιο κάτω σύστημα, απευθύνεται στο σύνολο τελικών χρηστών UE με το γράμμα  $u$ , καθώς επίσης με το γράμμα  $i$  απευθύνεται σε οποιοδήποτε τύπο σταθμών βάσης (gNB, SC, UAV, HAPS, LEO) που έχει χρησιμοποιηθεί στα πέντε δίκτυα ραδιοπρόσβασης.

Η συνολική κατανάλωση ισχύος της κεραίας σε κάθε Σταθμό Βάσης (BS), σε (Watt), δίνεται από:

$$P_i^{AN} = \sum_{i \in B} N_{TRX_i}^{AN} (P_{o_i}^{AN} + \Delta_{pi}^{AN} P_{t_{max_{i,u}}}^{AN}), \quad \forall i \in E \cup S, \quad (5.1)$$

όπου  $N_{TRXi}^{AN}$  είναι το πλήθος των αλυσίδων (transceiver chains) σε κάθε σταθμό βάσης (BS), το  $Po_i^{AN}$  αντιπροσωπεύει την μη μηδενική ισχύ εξόδου του πομποδέκτη (AN) στον σταθμό βάσης ( $P_{idle}$ ), το  $\Delta_{pi}^{AN}$  δηλώνει τον τρόπο μεταβολής της εκπεμπόμενης ισχύος των κεραιών σε σχέση με το φορτίο που εξυπηρετείται. Το όπου  $Pt_{max\ i,u}^{AN}$ , που είναι η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς του BS στον δέκτη UE σε (dBm ή Watt).

Το  $SE_{i,u}$  είναι η μέγιστη φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency), σε (bps/Hz), η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$SE_{i,u} = \min(NTRX_i, NRX_u) \log_2 \left( 1 + \frac{NRXu * SNR_{ui}}{\min(NTRX_i, NRX_u)} \right) \quad (5.2)$$

όπου οι παράμετροι  $NTRX_i$ ,  $NRX_u$  αντιπροσωπεύουν το πλήθος των κεραιών εκπομπής  $BS_i$  και λήψης  $UE_u$ , ενώ το  $SNR_{u,i}$  είναι η σηματοθορυβική σχέση που λαμβάνει ο δέκτης, σε (dBm), από την σχέση:

$$\begin{aligned} SNR_{ui} \text{ (dB)} = & Pt_{max\ i,u}^{AN} \text{ (dBm)} + GT_{xi} \text{ (dBi)} + GR_{xu} \text{ (dBi)} - LT_{cable\ i} \text{ (dB)} \\ & - LR_{cable\ u} \text{ (dB)} - Lp_{ui} \text{ (dB)} - N_{th} \text{ (dBm)} - NF \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (5.3)$$

όπου  $Pt_{max\ i,u}^{AN}$  είναι η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς του BS στον δέκτη UE σε (dBm ή Watt), ενώ το  $GT_{xi}$  δηλώνει το κέρδος της κεραίας του σταθμού βάσης  $i$  σε (dBi), ενώ το  $GR_{xu}$  είναι το κέρδος της κεραίας του δέκτη. Το  $LT_{cable\ i}$ ,  $LR_{cable\ u}$  είναι οι απώλειες καλωδίων πομπού και δέκτη, καθώς επίσης το  $Lp_{ui}$  είναι οι απώλειες διάδοσης μεταξύ του χρήστη  $u$  και σταθμού βάσης  $i$  σε (dB), όπως απωλειες ελεύθερου χώρου, βροχής, αερίων κλπ.,  $N_{th}$  είναι ο θερμικός θόρυβος σε (dBm), τέλος NF είναι η εικόνα θορύβου του δέκτη σε dB.

Με βάση το θεώρημα του Shannon η χωρητικότητα καναλιού, σε (bps), υπολογίζεται:

$$C_i = B \log_2(1 + SNR_{ui}) \quad (5.4)$$

Αλλιώς:

$$C_i = SE_{i,u} * B \quad (5.5)$$

όπου  $B$  το εύρος ζώνης σε (Hz),  $SNR_{ui}$  ο σηματοθορυβικός λόγος σε γραμμική κλίμακα (σε γραμμική κλίμακα και όχι dB),  $SE_{i,u}$  είναι η μέγιστη φασματική αποδοτικότητα που δίνεται στην εξίσωση (5.2).

Η ενεργειακή αποδοτικότητα (Energy efficiency) σε (*bits/Joule*) δίνεται από τη σχέση:

$$EE = \frac{\text{Data Rate}}{\text{Power Consumption}} = \frac{\frac{\text{bps}}{\text{m}^2}}{\text{Watt}} = \text{bits/Joule} \quad (5.6)$$

όπου *Data Rate* χωρητικότητα ανά μονάδα επιφανείας (Area Traffic Capacity) που είναι ο συνολικός ρυθμός εξυπηρέτησης ανά εξεταζόμενη περιοχή σε (Gbps/m<sup>2</sup>), *Power Consumption* δηλώνει την κατανάλωση των BS από την σχέση (5.1).

Για την αποδοτικότητα κόστους (Cost efficiency) σε (*bps/Eur/year*) δίνεται από τη σχέση:

$$CE = \frac{C_i}{\text{cost}} = \text{bps/Euro/year} \quad (5.7)$$

όπου  $C_i$  είναι η χωρητικότητα καναλιού σε (*bps*) ανά σταθμό βάσης από την εξίσωση (5.5), ενώ *cost* απευθύνεται στο κόστος TCO ανά έτος.

### 5.3 Μοντέλο Ισχύος για Rotary-Wing UAVs

Το μοντέλο με αναφορά [37] αποτελεί βασική αναφορά στον τομέα αυτό.

Σε περίπτωση που το UAV διαθέτει τέσσερις περιστρεφόμενους έλικες, η συνολική κατανάλωση ενέργειας, σε (joule), δίνεται από:

$$E_{total} = (4.917 * H + 275.204)t \quad (5.8)$$

όπου  $H$  είναι το υψόμετρο πτήσης,  $t$  είναι ο χρόνος αιώρησης του drone.

Η κατανάλωση ισχύος των UAVs, σε (Watt), δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{total} = 4.917 H + 275.204 \quad (5.9)$$

#### 5.4 Μοντέλο πλατφόρμας HAPS και δορυφόρου LEO

Στο πιο κάτω σύστημα, απευθύνεται στο σύνολο τελικών χρηστών UE με το γράμμα  $u$ , καθώς επίσης με το γράμμα  $j$  απευθύνεται στις πλατφορμες HAPS και δορυφόρους LEOs

Η ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (Effectively Isotropically Radiated Power, EIRP), σε (dBW), υπολογίζεται ως εξής:

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{Tx} \quad (5.10)$$

$$EIRP = \text{ισχύς πομπού (dBW)} + \text{κέρδος κεραίας (dBi)} - \text{απώλειες πομπού (dB)}$$

όπου  $P_{Tx}$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς του πομπού,  $G_{Tx}$  είναι το κέρδος της κεραίας του πομπού και  $L_{Tx}$  οι απώλειες σκόπευσης πομπού, σε (dB), οι οποίες υπολογίζονται από τη σχέση:

$$L_T = 12 \left( \frac{\theta_t}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (5.11)$$

όπου  $\theta_t$  το γωνιακό σφάλμα σκόπευσης στην κεραία πομπού και  $\theta_{3dB}$  είναι η γωνία ημίσειας ισχύος για παραβολική κεραία, σε (μοίρες), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\theta_{3dB} = 70 \left( \frac{\lambda}{D} \right) = 70 \left( \frac{c}{f_D} \right) \quad (5.12)$$

όπου  $D$  είναι η διάμετρος κεραίας σε (m), και  $f_D$  συχνότητα στην κάτω ζευξη.

Η ισχύς θερμικού θορύβου, υπολογίζεται από:

$$N = N_0 B = kTB \quad (5.13)$$

όπου  $N_0 = kT$  είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος θερμικού θορύβου,  $B$  είναι το εύρος ζώνης,  $k$  η σταθερά Boltzmann που ισούται με  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K ή  $-228,6$  dBW  $\cdot$  K $^{-1}$   $\cdot$  Hz $^{-1}$ , τέλος  $T$  η θερμοδυναμική θερμοκρασία θορύβου, σε (kelvin), υπολογίζεται:

$$T = \frac{N_0}{kB} \quad (5.14)$$

Ακολούθως ο λόγος του φέροντος σήματος  $C$  προς την φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου  $N_0$ ,  $\frac{C}{N_0}_{j,u}$  για τη κάτω ζεύξη, σε (dBHz), υπολογίζεται από:

$$\frac{C}{N_0}_{j,u} = (EIRP)_{j,u} - L_p - k + \left( \frac{G}{T} \right)_u \quad (5.15)$$

όπου  $k$  είναι η σταθερά Boltzmann, το  $(\frac{G}{T})_u$  είναι ο λόγος του σύνθετου κέρδους στον δέκτη UE προς την θερμοκρασία θορύβου που χαρακτηρίζει τον εξοπλισμό και ονομάζεται δείκτης ποιότητας (figure of merit)  $(\frac{G}{T})_u$ , το  $L_p$  είναι οι συνολικές απώλειες στην κάτω ζευξη.

Για τον υπολογισμό της σηματοθορυβικής σχέσης  $SNR$ , σε (dB), δίνεται:

$$SNR_{i,u} = (\frac{C}{N_0})_{j,u} - 10 \log_{10}(BW) \quad (5.16)$$

όπου  $BW$  είναι το εύρος ζώνης του φέροντος σε (Hz),  $\frac{C}{N_0}$  είναι ο η αναλογία Φέροντος προς Πυκνότητα Ισχύος Θορύβου σε (dBHz).

### 5.3.1 Απώλειες Διάδοσης

Οι απώλειες διάδοσης μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά στη μείωση της ισχύος. Παράγοντες που επηρεάζουν στο δίκτυο Ραδιοπρόσβασης είναι οι i) Απώλειες ελεύθερου χώρου, οι οποίες είναι οι κυριότερες απώλειες ii) Απώλειες λόγω βροχής iii) Απώλειες από ατμοσφαιρικά αέρια.

- **Απώλειες ελεύθερου χώρου**

Οι απώλειες ελεύθερου χώρου (Free Space Loss,  $LFS$ ) είναι μεταξύ της κεραίας των BS και της κεραίας του δέκτη δίνονται από τη σχέση [107]:

$$LFS = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d \quad (5.17)$$

όπου:

$f$ : Συχνότητα (MHz)

$d$ : Απόσταση (km).

- **Απώλειες λόγω βροχής**

Τα σταγονίδια της βροχής υποβαθμίζουν την ενέργεια του εκπεμπόμενου σήματος, με αποτέλεσμα να χάνεται σημαντική απόδοση. Λειτουργούν ως ημιαγωγοί των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, είτε σκεδάζουν το κύμα σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις είτε απορροφώντας το [108].

Οι συνολικές απώλειες λόγω βροχής σε (dB):

$$A_{rain} = \gamma R L_e \quad (5.18)$$

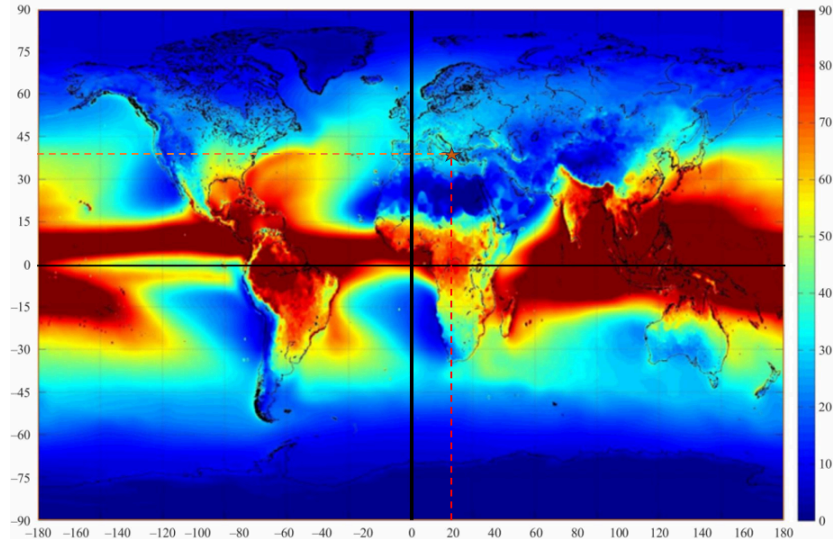
όπου  $L_e$  το ενεργό μήκος διαδρομής και  $\gamma R$  η ειδική εξασθένηση λόγω βροχής (σε dB/km).

Η Ειδική απόσβεση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\gamma R = k R_{0.01}^a \quad (5.19)$$

οι συντελεστές  $a$  και  $k$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε γραμμική ή κυκλική πόλωση, όπου  $R_{0.01}$  μέσος ρυθμός βροχόπτωσης διάρκειας ενός έτους, όπου κυμαίνεται από 0 έως 90 χιλιοστά ανα ώρα (mm/hr).

Στο πιο κάτω σχήμα, απεικονίζεται η παγκόσμια χαρτογράφηση από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών με πρότυπο ITU-R P.837 του 2017 για τον υπολογισμό του μέσου ρυθμού βροχόπτωσης  $R_{0.01}$  ετησίως [109]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάμε το σενάριο για ένα συγκεκριμένο σημείο της Θεσσαλονίκης, το οποίο βρίσκεται Βορειοανατολικά (BA) της Γης, όπως απεικονίζεται με αστερίσκο στο Σχήμα 5.2. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες που χρησιμοποιήθηκαν από τον Πίνακα 6.2, με αποτέλεσμα ο ρυθμός βροχόπτωσης να ανέρχεται στα 27 mm/h. Ακόμη, όπως παρατηρείται οι χώρες που βρίσκονται πλησίον του Ισημερινού πλήττονται από υψηλά ποσοστά βροχόπτωσης έως και 90 mm/h. Λόγω των μετακινήσεων των νεφών από το Βόρειο και Νότιο πόλο, με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται στον Ισημερινό.



Σχήμα 5.2: Τοπολογία ρυθμού βροχόπτωσης  $R_{0.01}$ . [109]

Για το  $k$  και  $a$  υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$k = \frac{K_H + K_V + (K_H - K_V) \cos^2 \epsilon \cos(2\tau)}{2} \quad (5.20)$$

$$\alpha = \frac{K_H \alpha_H + K_V \alpha_V + (K_H \alpha_H - K_V \alpha_V) \cos^2 \epsilon \cos(2\tau)}{2k} \quad (5.21)$$

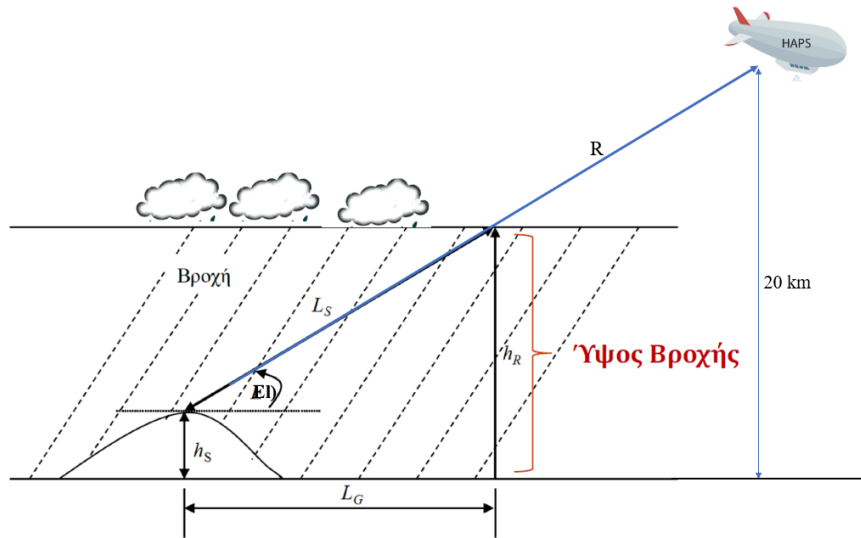
όπου  $E_l$  είναι η γωνία ανύψωσης σε (μοίρες) και  $\tau$  είναι η γωνία κλίσης της πόλωσης ( $\tau=0^\circ$  για οριζόντια,  $45^\circ$  για κυκλική και  $90^\circ$  που είναι για κατακόρυφη πόλωση. Τα  $K_H$ ,  $\alpha_H$  είναι συντελεστές οριζόντιας πόλωσης και οι συντελεστές  $K_V$ ,  $\alpha_V$  για κάθετη πόλωση. Με βάση το πρότυπο Rec. ITU-R P.838-3 της ITU-R, οι συντελεστές κάθετης και οριζόντιας πόλωσης εξαρτώνται από τη συχνότητα  $f$  λειτουργία από 1 έως 1000 GHz, καθώς επίσης ο υπολογισμός γίνεται με τη βοήθεια τεσσάρων σχημάτων. Οι συντελεστές  $K_V$  και  $K_H$  σε λογαριθμική κλίμακα, ενώ οι συντελεστές  $\alpha_V$ ,  $\alpha_H$  σε γραμμική κλίμακα, τα οποία τα βρίσκουμε σε πίνακες στο [108] και είναι εξαρτώμενα από την συχνότητα. Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται ενδεικτικές τιμές συχνοτήτων σε (GHz) για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\alpha_V$ ,  $\alpha_H$  και  $K_V$ ,  $K_H$ . Τέλος, στον Πίνακα 5.2 δίνονται ενδεικτικές τιμές απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης σε σχέση με τον ρυθμό βροχόπτωσης και τη συχνότητα σε GHz.

Πίνακας 5.1: Ενδεικτικές Τιμές Συντελεστών. [108]

Συχνότητα (GHz)	$K_H$	$K_V$	$\alpha_H$	$\alpha_V$
2	0.00065	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
30	0.187	0.167	1.021	1.000
40	0.350	0.310	0.939	0.929

Πίνακας 5.2: Ειδική απόσβεση λόγω βροχόπτωσης. [110]

Συχνότητα (GHz)	$R_{0.01}$ (mm/h)			
	5	10	50	100
Ρυθμός Βροχόπτωσης				
10	-0.0021	-0.0058	-0.0729	-0.2315
20	-0.0084	-0.0430	-0.6147	-1.6740
35	-0.0609	-0.1502	-1.0648	-2.3515
50	-0.0708	-0.1682	-1.0317	-2.1436
95	-0.0358	-0.0887	-0.5907	-1.2851



Σχήμα 5.3: Ενεργό υψόμετρο βροχόπτωσης hR.

Το γεωμετρικό μήκος της διαδρομής του σήματος που διέρχεται από τη βροχή σε (m):

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sin(El)} \quad (5.22)$$

όπου  $h_S$  είναι το ύψος επίγειου σταθμού πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας,  $h_R$  ψηλότερο σημείο που αρχίζει η εξασθένηση λόγω βροχής,  $El$  γωνία ανύψωσης σε (μοίρες), τέλος  $L_G$  είναι η απόσταση μεταξύ  $h_S$  και  $h_R$  σε (km), δίνεται:

$$L_G = L_S \cos(El) \quad (5.23)$$

Για τον ρυθμό βροχόπτωσης, από το [111], δίνετε:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38 (1 - e^{-2L_G})} \quad (5.24)$$

Υπολογισμός του συντελεστή κατακόρυφης προσαρμογής,  $v_{0.01}$ , πρέπει να ισχύει:

Για να βρούμε το  $\zeta$ :

$$\zeta = \tan\left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}}\right)^{-1} \quad (5.25)$$

Αν το  $\zeta > El$  τότε σε (km):

$$LR = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos(El)} \quad (5.26)$$

Αλλιώς αν  $\zeta \leq El$  τότε ισχύει σε (km):

$$LR = \frac{(h_R - h_S)}{\sin(El)} \quad (5.27)$$

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό της κατακόρυφης προσαρμογής,  $v_{0.01}$ , ο υπολογισμός του  $\chi$  δίνεται από τη σχέση:

$$\chi = \{36^\circ - |\varphi| \quad \text{αν } |\varphi| < 36^\circ\}$$

$$\text{Αλλιώς } \chi=0$$

όπου ( $\varphi$ ) γεωγραφικού πλάτους του επίγειου σταθμού.

Συνεπώς ο συντελεστής κατακόρυφης προσαρμογής,  $v_{0.01}$ , ισχύει:

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin(EL)31(1-e^{EL})(31(1 - e^{-EL/(1+x)})^{\frac{\sqrt{LR\gamma R}}{f^2}} - 0.45)}} \quad (5.28)$$

όπου  $\gamma R$  ειδική εξασθένηση σε (dB/km) και  $f$  συχνότητα λειτουργίας σε (GHz). (5.29)

Για το ενεργό μήκος διαδρομής,  $LE$  (dB), ισχύει:

$$LE = LR - v_{0.01} \quad (5.30)$$

Τέλος, ο υπολογισμός της συνολικής εξασθένησης λόγω της βροχόπτωσης,  $L_{rain}$ , σε dB κάνουμε:

$$A_{rain} = A_{0.01} = (\gamma R * LE) R \quad (5.31)$$

- **Απώλειες από ατμοσφαιρικά αέρια**

Εκτός από τη βροχή, ένας επιπλέον σημαντικός παράγοντας εξασθένησης του σήματος είναι η **απορρόφηση** ατμοσφαιρικών αερίων. Οι απώλειες αυτές, προκύπτουν από την απορρόφηση του οξυγόνου (O<sub>2</sub>) και των υδρατμών (H<sub>2</sub>O), οι οποίες εξαρτώνται από την θερμοκρασία, ατμοσφαιρική πίεση και τα επίπεδα υγρασίας.

Υπολογίζεται από:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820 f N''(f) \quad (5.32)$$

όπου  $\gamma_o$  είναι η ειδική εξασθένηση λόγω του Οξυγόνου,  $\gamma_w$  είναι η ειδική εξασθένηση λόγω Υδρατμών. Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται ειδική εξασθένηση αερίων, που εξαρτώνται από τη συχνότητα. Η αύξηση της ειδικής εξασθένησης αερίων, εμφανίζεται σε υψηλότερες συχνότητες και σε συχνότητες

συντονισμού. Όσον αφορά το  $\gamma_o$  παρουσιάζει συχνότητα συντονισμού (μεγαλύτερη ειδική εξασθένιση) στα 60 και 118.74 (GHz), σε αντίθεση το  $\gamma_w$  που παρουσιάζει συχνότητα συντονισμού στα 22.2 και 183.3 GHz [112].

Για τον υπολογισμό των φανταστικών μερών με τους εξής τύπους:

$$N''_{Oxygen}(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) \quad (5.33)$$

$$N''_{Water Vapour}(f) = \sum_{i (Water Vapour)} S_i F_i \quad (5.34)$$

όπου  $S_i$  είναι η φασματική ενέργεια γραμμής οξυγόνου και υδρατμών (the strength of the ith oxygen or water vapour,  $F_i$  το εύρος ζώνης τοπικής συχνότητας,  $N''_D(f)$  είναι το εύρος της ξηρότητας που οφείλεται στην απορρόφηση αζώτου λόγω της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Η ισχύς της γραμμής οξυγόνου και υδρατμών δίνεται από τη σχέση:

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1 - \theta)] = b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp[b_2(1 - \theta)] \quad (5.35)$$

όπου  $p$  η ατμοσφαιρική πίεση,  $e$  η πίεση των υδρατμών και  $\theta$  η θερμοκρασία  $300/T$ , ενώ  $T$  σε (Kelvin).

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left( \frac{\Delta f - \delta(fi - f)}{(fi - f)^2 + (\Delta f)^2} + \frac{\Delta f - \delta(fi + f)}{(fi + f)^2 + (\Delta f)^2} \right) \quad (5.36)$$

όπου  $f_i$  είναι η συχνότητα της γραμμής οξυγόνου ή υδρατμών και  $\Delta f$  είναι το πάχος της εν λόγω γραμμής.

Για να υπολογιστεί το  $\Delta f$  για το οξυγόνο και των υδρατμών δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta f = a3 \cdot 10^{-4} (p \theta^{(0.8-a4)} + 1.1 \cdot e \cdot \theta) = b3 \cdot 10^{-4} (p \theta^{(b4)} + b5 \cdot e \cdot \theta^{(b6)}) \quad (5.37)$$

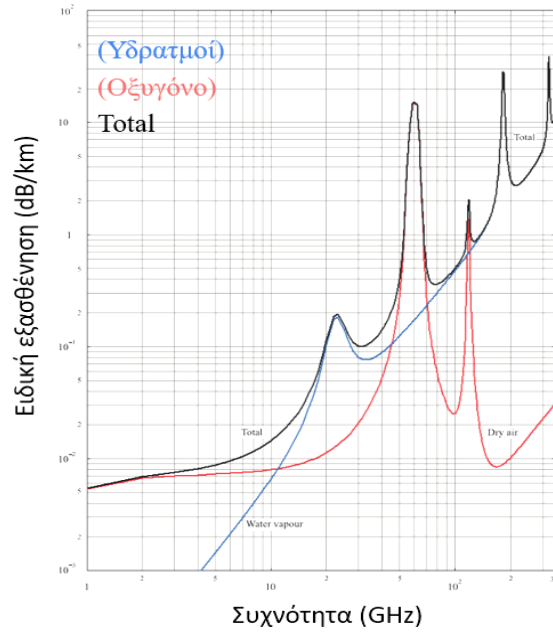
όπου τα  $a1$ -  $a6$  και  $b1$  -  $b6$  υπολογίζονται με βάση τον πίνακα του [112]

Για την σειρά ξηρότητας  $N''_D(f)$  λόγω απορρόφησης αζώτου:

$$N''_D(f) = f p \theta^2 \left[ \frac{6.14 \chi 10^{-5}}{d[1+(\frac{f}{d})^2]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p \theta^{1.5}}{1+1.9 \chi 10^{-5} f^{1.5}} \right] \quad (5.38)$$

όπου  $d$  είναι η παράμετρος πλάτους για το φάσμα Debye:

$$d = 5.6 \cdot 10^{-4} (p + e)\theta^{0.8} \quad (5.39)$$



Σχήμα 5.4: Ειδική απόσβεση από ατμοσφαιρικά αέρια. [112]

Τέλος, απώλειες αερίων σε (dB), από τη σχέση:

$$A_{Atmospheric} = \gamma = (\gamma_O + \gamma_W) \quad (5.40)$$

- **Συνολικές απώλειες που επιδρούν**

Για τον υπολογισμό των συνολικών απωλειών, ισχύει:

$$A_{Total Loss} = A_{Atmospheric} + A_{rain} + LFS \quad (5.41)$$

### 5.3.2 Δορυφορική τροχιά

Για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ Δορυφόρου και επίγειου Σταθμού, σύμφωνα με το [113], σε (m), ισχύει:

$$R = \sqrt{R_E^2 + R_S^2 - 2R_E R_S \cos(\gamma)} \quad (5.42)$$

όπου  $R_E$  είναι η ακτίνα της Γης που είναι 6371 km,  $R_S$  είναι η απόσταση του δορυφόρου από το κέντρο της Γης,  $\gamma$  είναι η κεντρική γωνία μεταξύ των διανυσμάτων  $R_E$  και  $R_S$ , το οποίο υπολογίζεται:

$$\cos(\gamma) = \cos(l_e)\cos(l_s)\cos(L) + \sin(l_e)\sin(l_s) \quad (5.44)$$

$$\gamma = \cos^{-1}(\cos(\gamma)) \quad (5.45)$$

όπου  $L$  Γεωγραφικό μήκος, το οποίο προκύπτει από την αφαίρεση Γεωγραφικό μήκος επίγειου σταθμού  $l_e$  και από το Γεωγραφικό μήκος δορυφόρου  $l_s$ , ισχύει:  $L = l_e - l_s$ , σε (μοίρες).

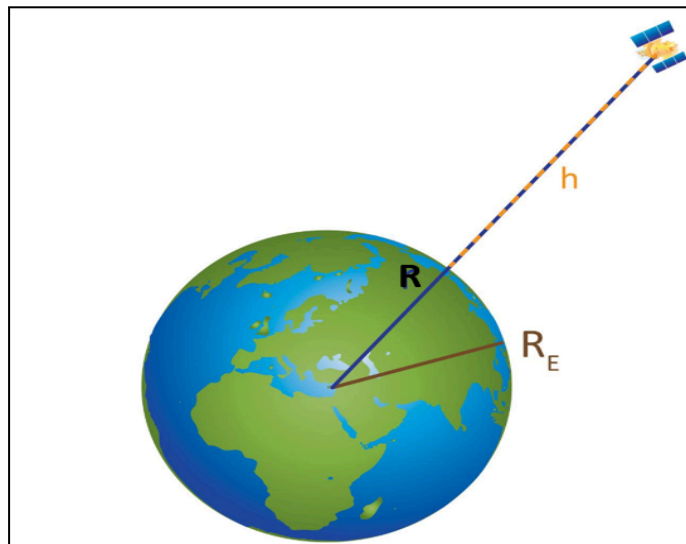
Το ύψος  $h$  του δορυφόρου από την επιφάνεια της Γης, βρίσκεται από την απόσταση TS και είναι:

$$h = R_s - R_E \quad (5.46)$$

Η Γωνία Ανύψωσης (Elevation Angle), σε (μοίρες):

$$\cos El = \frac{R_s \sin(\gamma)}{R} \quad (5.47)$$

$$El = \cos^{-1}(\cos(El)) \quad (5.48)$$



Σχήμα 5.5: Συνοπτικό διάγραμμα τροχιάς δορυφόρου. [114]

Για την Γωνία Αζιμουθίου, σε (rad), από τη σχέση:

$$\alpha = \arctan \left[ \frac{\tan(|L|)}{\sin(l_e)} \right] \quad (5.49)$$

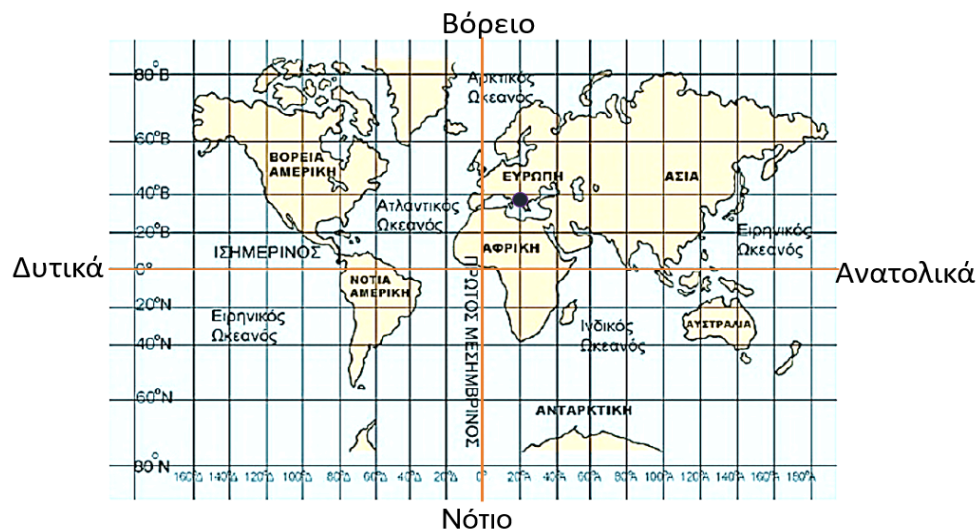
όπου  $L$  Γεωγραφικό μήκος, το οποίο προκύπτει από την αφαίρεση Γεωγραφικό μήκος επίγειου σταθμού  $l_e$  και από το Γεωγραφικό μήκος δορυφόρου  $l_s$ , ισχύει:  $L = l_e - l_s$ , σε (μοίρες).

Για τον υπολογισμό του πραγματικού αζιμουθίου γίνεται από τον Πίνακα 5.3, με τη βοήθεια του Σχήματος 5.6, το οποίο παρουσιάζει την παγκόσμια τροπολογία για τον εντοπισμό Ημισφαιρίου στον

χρήστη και της θέσης του δορυφόρου σε σχέση με τον χρήστη. Στο σενάριο αυτό, ο τελικός χρήστης και δορυφόρος βρίσκονται στο ΒορειοΑνατολικό τμήμα, όπως φαίνεται με ακίδα στο Σχήμα 5.6. Συνεπώς από τον Πίνακα 5.3 προκύπτει η σχέση:  $A = 180^\circ - \alpha$

Πίνακας 5.3: Υπολογισμός Αζιμουθίου. [113]

A/A	Ημισφαίριο στον χρήστη	Θέση δορυφόρου σε σχέση με τον χρήστη	Γωνία Αζιμουθίου-Az, σε (rad)
1)	Βόρειο	Ανατολικά	$A=180^\circ -\alpha$
2)	Βόρειο	Δυτικά	$A=180^\circ +\alpha$
3)	Νότιο	Ανατολικά	$A = \alpha$
4)	Νότιο	Δυτικά	$A=360^\circ -\alpha$



Σχήμα 5.6: Τοπολογία εντοπισμού τελικού χρήστη και Δορυφόρου. [115]

## 5.5 Καθορισμός των χρησιμοποιούμενων σταθμών βάσης (BS)

Το ενοποιημένο δίκτυο στην έκτη γενιά (6G) πηγάζει απ' την ενοποίηση των τριών δικτύων (επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων), όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3. Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να τονιστεί ότι η παρούσα διπλωματική εργασία από τα εναέρια και τα διαστημικά δίκτυα ραδιοπρόσβασης, αναφερόμαστε σε συγκεκριμένη κατηγορία σταθμών βάσης.

Οι επιλογές αυτές, βασίζονται στο γεγονός ότι οι περισσότερες μελέτες στην έκτη γενιά (6G) αναφέρονται στα μοντέλα αυτά, όπως π.χ. στον IEEE, Researchgate, διαδίκτυο κλ.π..

Στα εναέρια δίκτυα ραδιοπρόσβαση, όσον αφορά τις πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου HAPS, αναφερόμαστε σε Αερόπλοια (Airship), τα οποία παρουσιάζουν τις περισσότερες δυνατότητες. Στην αναφορά των Μη Επανδρωμένων Οχημάτων (UAVs), μιλάμε για UAVs με σταθερά πτερύγια (fixed wing), Συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στο ποιοτικό UAV Hermes 900 που απεικονίζεται στην Εικόνα

5.7, το οποίο έχει πολλές δυνατότητες, όπως αυτονομία, payload. Επίσης, έχει μήκος 8.5 μέτρα και άνοιγμα φτερών 15 μέτρα και βάρος 970 κιλά. Το εν λόγω UAV, επιλέχθηκε με βάση το ωφέλιμο φορτίο (payload) που υποστηρίζει, το οποίο είναι 350 Kg, έτσι ώστε να μπορέσει να ανταπεξέλθει στο βάρος των κεραιών. Στο Κεφάλαιο 6 θα παρουσιαστούν αποτελέσματα κόστους, τα οποία βασίζονται στο συγκεκριμένο UAV. Το εν λόγω UAV, έχει αυτονομία 30 ώρες πτήσης, με αποτέλεσμα να χρειάζονται δύο Drone για μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας, τα οποία θα εναλλάσσονται για φόρτιση της μπαταρίας [116].

Από την άλλη μεριά, στις διαστημικές επικοινωνίες εστιάζουμε στους δορυφόρους χαμηλής γήινης τροχιάς (LEO), λόγω του ότι βρίσκονται σε χαμηλότερο υψόμετρο πτήσης σε σύγκριση με τους υπόλοιπους δορυφόρους (MEO, GEO). Οι δορυφόροι LEO παρουσιάζουν μικρότερη καθυστέρηση διάδοσης (Latency) από τους (MEO, GEO), καθώς επίσης αναμένεται να διαδραματίσουν σπουδαίο ρόλο στα 6G δίκτυα, το οποίο επικεντρώνεται η παρούσα εργασία.



Εικόνα 5.7: Το UAV Hermes 900. [116]

## 5.6 Πρόβλημα προς Επίλυση

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί να προσφέρει βέλτιστη λύση στην επιλογή ενός αποδοτικού δικτύου στην έκτη γενιά (6G). Πιο συγκεκριμένα, διερευνώνται δύο διαφορετικά σενάρια όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, τα οποία απευθύνονται στην σύνδεση μεταξύ σταθμού βάσης (BS) και ενός τελικού χρήστη (UE) (δίκτυο ραδιοπρόσβασης radio access network).

Το πρώτο σενάριο, εξετάζει μια μικρή αστική περιοχή με κάλυψη (coverage) πενήντα χιλιάδες τετραγωνικά μέτρα, η οποία απαιτεί υψηλή τηλεπικοινωνιακή κίνηση (Area Traffic Capacity).

Το δεύτερο σενάριο, απευθύνεται σε μεγαλύτερη εξεταζόμενη περιοχή (coverage) που είναι από 10 τετραγωνικά χιλιόμετρα έως 100 τετραγωνικά χιλιόμετρα, η οποία απαιτεί μικρή τηλεπικοινωνιακή κίνηση (Area Traffic Capacity). Λόγω ότι περιλαμβάνονται τόσο οι αστικές περιοχές που απαιτούν υψηλή τηλεπικοινωνιακή κίνηση, όσο και περιοχές που απαιτούν χαμηλή τηλεπικοινωνιακή κίνηση (Area Traffic Capacity).

Στα δύο σενάρια, διεξάγεται μελέτη των πέντε τύπων σταθμών βάσης (gNB, SC, UAV, HAPS, LEO), κατά την ατομική τους λειτουργία, στην κάτω ζεύξη (Downlink, DL) στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης. Εξετάζοντας, τόσο την Οικονομική απόδοση (Cost efficiency, CE) όσο και το πλήθος των

απαιτούμενων σταθμών βάσης (Number of Base Stations, NBS), ώστε να καλυφθούν πλήρως από τις απαιτήσεις της εξεταζόμενης περιοχής.

Όσον αφορά το πλήθος των απαιτούμενων σταθμών βάσης (NBS), προσδιορίζεται με βάση δύο παραμέτρους. Η πρώτη παράμετρος, εξετάζει τον αριθμό των απαιτούμενων σταθμών βάσης (BS) με γνώμονα τον συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης (Area Traffic Capacity) και την χωρητικότητα καναλιού  $C_i$  ανά BS. Ο συνολικός ρυθμός εξυπηρέτησης μελετά την εξέλιξη από το 5G έως 6G. Στην πέμπτη γενιά (5G), απαιτείται  $0.1 \text{ Gbps}/m^2$ , με αποτέλεσμα στα  $50\,000 \text{ m}^2$  που εξετάζει το πρώτο σενάριο είναι  $5 \text{ Tbps}/m^2$ . Ωστόσο, στην έκτη γενιά (6G) ο συνολικός ρυθμός εξυπηρέτησης ανά τετραγωνικό μέτρο είναι  $1 \text{ Gbps}/m^2$ , με αποτέλεσμα στα  $50\,000 \text{ m}^2$  είναι  $50 \text{ Tbps}/m^2$ .

Η χωρητικότητα καναλιού  $C_i$  προσδιορίζει την μέγιστη πληροφορία που μπορεί να μεταδοσή ένας σταθμός βάσης μέσω του τηλεπικοινωνιακού καναλιού. Επιπλέον, η χωρητικότητα καναλιού συνδέεται άμεσα με την μέγιστη φασματική αποδοτικότητα (Spectral Efficiency, SE) που εκφράζει την αποδοτικότητα χρήσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η φασματική αποδοτικότητα (SE), σχετίζεται άμεσα με την σηματοθορυβική σχέση SNR, η οποία εκφράζει την εμβέλεια στο πιο απομακρυσμένο τελικό χρήστη (UE), όσον αφορά τα επίγεια και τα UAVs από τη σχέση 5.3, ενώ για τις πλατφόρμες HAPS και LEO απ' την εξίσωση 5.16.

Η δεύτερη παράμετρος του NBS, εξετάζει τον αριθμό των απαιτούμενων σταθμών βάσης (BS), ώστε να καλυφθεί η γεωγραφική περιοχή που εξετάζεται. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου αυτής, χρησιμοποιήθηκε σχετική μαθηματική γεωμετρία.

Από την άλλη μεριά, η ενεργειακή απόδοση (energy-efficient) υπολογίζεται με βάση τον απαιτούμενο ρυθμό τηλεπικοινωνιακής κίνησης της εξεταζόμενης περιοχής προς την κατανάλωση ισχύος των BS, από την εξίσωση 5.6. Η κατανάλωση ισχύος  $P_i^{AN}$  σε κάθε σταθμό βάσης από τη σχέση 5.1.

Η φασματική αποδοτικότητα καναλιού  $SE$  των επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων, υπολογίζεται από τη σχέση 5.2. Αξιοσημείωτο είναι ότι για τον υπολογισμό της χωρητικότητας καναλιού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε από τη σχέση 5.4 είτε από τη σχέση 5.5. Στο πλαίσιο της παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η σχέση 5.4, διότι λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των κεραιών που χρησιμοποιούνται. Τέλος, η αποδοτικότητα κόστους (cost-efficiency) από την εξίσωση (5.7), όπου λαμβάνει υπόψη την χωρητικότητα καναλιού ανά BS και το κόστος TCO.

## 5.7 Επίλογος

Συνοψίζοντας, στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού εκπονήθηκε το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Παράλληλα, γίνεται αναφορά στον τύπο των χρησιμοποιούμενων σταθμών βάσης καθώς επίσης και στον λόγο επιλογής των χρησιμοποιούμενων σταθμών βάσης (BS). Τέλος, εκπονήθηκε με λεπτομέρεια η περιγραφή του προβλήματος επίλυσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## Κεφάλαιο 6ο: Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

### 6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που πήραμε από την προσομοίωση του MATLAB. Παράλληλα, εξετάζονται λεπτομερώς τα Σχήματα των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και οι λόγοι της ύπαρξης συγκεκριμένων φαινομένων. Επίσης, δίνονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίες επιλέχθηκαν με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να προκύψουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

### 6.2 Περιβάλλον Προσομοίωσης

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB (Matrix Laboratory), το οποίο είναι δυναμικό και εύχρηστο περιβάλλον στις επιστημονικές εφαρμογές. Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2023b με πρόσβαση ακαδημαϊκών δικαιωμάτων, με Η/Υ της εταιρίας Lenovo. Ο Η/Υ είναι μοντέλο IdeaPad 3 σε σύστημα Windows 10 τον 64-bit με επεξεργαστή AMD Ryzen™ 7 με βασική συχνότητα 2.0 GHz καθώς επίσης μνήμη RAM 12GB.

Το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB υποστηρίζεται από ένα ευρύ φάσμα εσωτερικών λειτουργιών με τη χρήση βιβλιοθηκών (Toolboxes) για εξειδικευμένες εφαρμογές. Με τη βοήθεια τους, μπορέσαμε να εκτελέσουμε και να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματά μας.

Στον παρακάτω Πίνακα δίνονται οι τιμές των παραμέτρων που ορίστηκαν στο πρόγραμμα, ώστε να μπορέσουμε να προσομοιώσουμε τα αντίστοιχα μεγέθη, σε κάθε σενάριο επικοινωνίας μεταβάλλουμε τις αντίστοιχες παραμέτρους.

Αρχίζοντας από την εκπεμπόμενη ισχύ της κεραίας  $P_t$  σε (dBm), μικρότερη ισχύ σημειώνουν τα UAVs που είναι [32,28] dBm. Ωστόσο την μεγαλύτερη ισχύ απαιτούν οι δορυφόροι LEO με [65.17, 64.55] dBm, η οποία υπολογίστηκε με τη βοήθεια της ενεργού ισοτροπικά ακτινοβολούμενης ισχύος EIRP που είναι 4 (dBW/MHz) [117]. Για την πλατφόρμα HAPS είναι [42,40] dBm, ενώ η μακροκυψέλη (MC) [46,43] dBm [118]. Παράλληλα, παρατηρείται ότι η εκπεμπόμενη ισχύς της μακρο-κυψέλης (MC) ότι είναι μεγαλύτερη από ότι της πλατφόρμας HAPS, παρόλο που υπάρχει μεγάλη απόσταση μεταξύ HAPS και τελικού χρήστη UE.

Όσον αφορά την συχνότητα λειτουργίας (Frequency), τα επίγεια δίκτυα τα gNBs έχουν [3.5,30] GHz, με αντίστοιχο διαθέσιμο εύρος ζώνης [100-400, 500-2000] MHz. Η συχνότητα και το εύρος ζώνης συνδέονται άμεσα, όσο αυξάνει η συχνότητα λειτουργίας, τόσο αυξάνει το εύρος ζώνης.

Τα SC έχουν [5,28] GHz και διαθέσιμο εύρος ζώνης (Bandwidth, BW) [100-600, 500-2000] MHz. Για τις πλατφόρμες HAPS, συχνότητα λειτουργίας [2.1, 28] GHz [119] και αντίστοιχο εύρος ζώνης (BW) [40-200, 500-1000] MHz [120]. Η υποστηριζόμενη γεωγραφική κάλυψη (Coverage), σε κάθε σταθμό βάσης (BS) που δόθηκε είναι: gNB στα 500 μέτρα, SC στα 100 μέτρα, UAV στα 1000 μέτρα [33]. Για τις πλατφόρμες HAPS και δορυφόρους LEO εξετάζονται δύο διαφορετικές διαστάσεις, η οποίες είναι HAPS [5, 2] (km) και LEO [20, 10] (km) [120]. Με την βοήθεια εργαλιών της Google Earth, μπορέσαμε να προσομοιώσουμε τις αποστάσεις των LEOs και των HAPSs, παίρνοντας τις γεωγραφικές συντεταγμένες που απαιτούνται. Το κέρδος των κεραιών GTxι, όσον αφορά την μακροκυψέλη (MC) είναι [32,36] (dBi) [121], ενώ στο δορυφορικό δίκτυο ανέρχεται [38.5,42] (dBi) [120], [122]. Ακόμη το πλήθος των πομποδεκτών (αλυσίδων) του δορυφόρου LEO [128, 256]. Τέλος,

οι απώλειες λόγω βροχόπτωσης, ο ρυθμός βροχόπτωσης  $R_a$  (mm/h), καθορίζεται με την βοήθεια του Σχήματος 5.2, ο οποίος είναι 27 mm/h.

Οι γεωγραφικές συντεταγμένες που έχουν χρησιμοποιηθεί δίνονται στον Πίνακα 6.2. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.2 φαίνεται η τοπολογία πλατφόρμας HAPS, η οποία βρίσκεται στην Θεσσαλονίκη κοντά από την πλατεία Αριστοτέλους με γεωγραφικό μήκος (longitude)  $22.94^\circ$  και γεωγραφικό πλάτος (latitude)  $40.63^\circ$ , σε υψόμετρο 20 km. Παρομοίως για το UAV, όμως σε υψόμετρο πτήσης 10 km. Μελετώντας δύο διαφορετικούς χρήστες. Ο πρώτος χρήστη (A User), βρίσκεται κοντά στα Πεύκα της Θεσσαλονίκης σε απόσταση 5 km από την πλατφόρμα HAPS, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Ωστόσο ο δεύτερος χρήστης (B User), βρίσκεται στην Πλατεία Ναυαρίνου, σε απόσταση 2 km από το HAPS.

Όσον αφορά τον δορυφόρο LEO, έχει γεωγραφικό μήκος (longitude)  $22.56$  και γεωγραφικό πλάτος (latitude)  $40.57^\circ$ , σε υψόμετρο 600 χιλιόμετρα από την Γη, και βρίσκεται στην Τοπική Κοινότητα Πλατάνου. Θεωρούμε και πάλι ότι υπάρχουν δύο διαφορετικοί χρήστες. Ο πρώτος χρήστης (A User), βρίσκεται στον Δήμο Γευγελής στην Βόρεια Μακεδονία, ο οποίος απέχει 20 km από τον δορυφόρο LEO. Ο δεύτερος χρήστης (B User), βρίσκεται στην Θέρμη της Θεσσαλονίκης, σε απόσταση 10 km από τον δορυφόρο LEO, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.3.

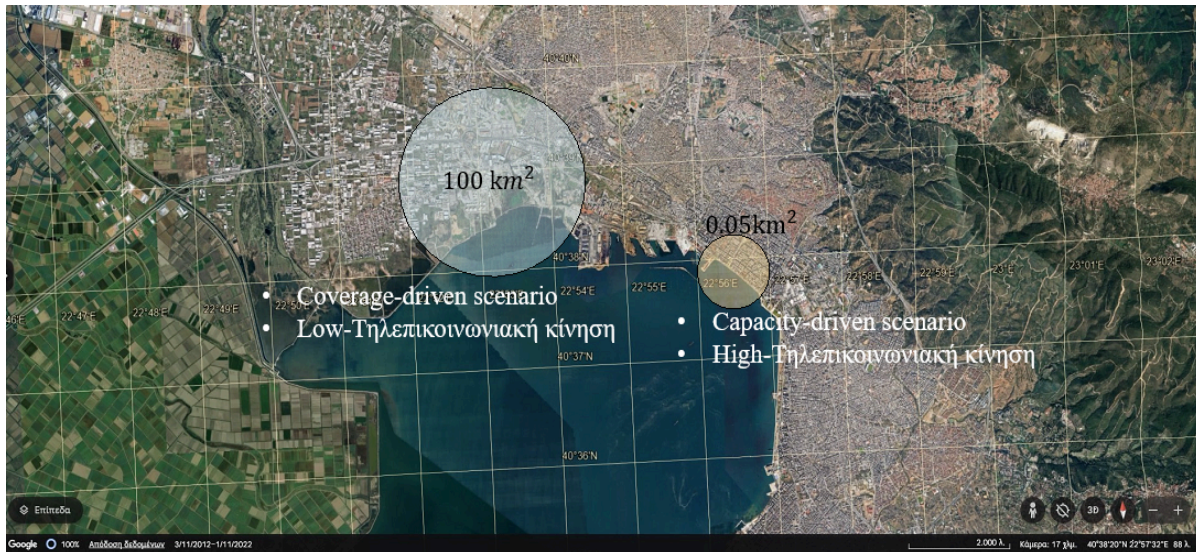
Πίνακας 6.1: Τιμές των μεταβλητών στην προσομοίωσης.

Παράμετροι	Χαρακτηριστικά Σταθμών Βάσης (BSs)				
	gNB	SC	UAV	HAPS	LEO
Pt (dBm)	[46, 43]	[38, 36]	[32, 28]	[42, 40]	N/A
EIRP (dBW/MHz)	N/A	N/A	N/A	N/A	4
Frequency (GHz)	[3.5, 30]	[5, 28]	[5, 28]	[2.1, 28]	[20, 28]
Bandwidth (MHz)	[100-400, 500-2000]	[100-600, 500-2000]	[100-600, 500-2000]	[40-200, 500-1000]	[500-1000, 500-2000]
GTxi (dBi)	[32, 36]	[26, 32]	[26, 32]	[28, 42]	[38.5, 42]
GRxu (dBi)	[24, 28]	[20, 24]	[20, 24]	[24, 36]	[24, 32]
N_TRX	[128, 256]	[32, 64]	[16, 32]	[64, 128]	[128, 256]
N_ant_Tx	[128, 256]	[32, 64]	[16, 32]	[64, 128]	[128, 256]
N_ant_Rx	[64, 128]	[16, 32]	[16, 32]	[32, 64]	[64, 128]
Coverage (km)	0,5	0.1	1	[5, 2]	[20, 10]

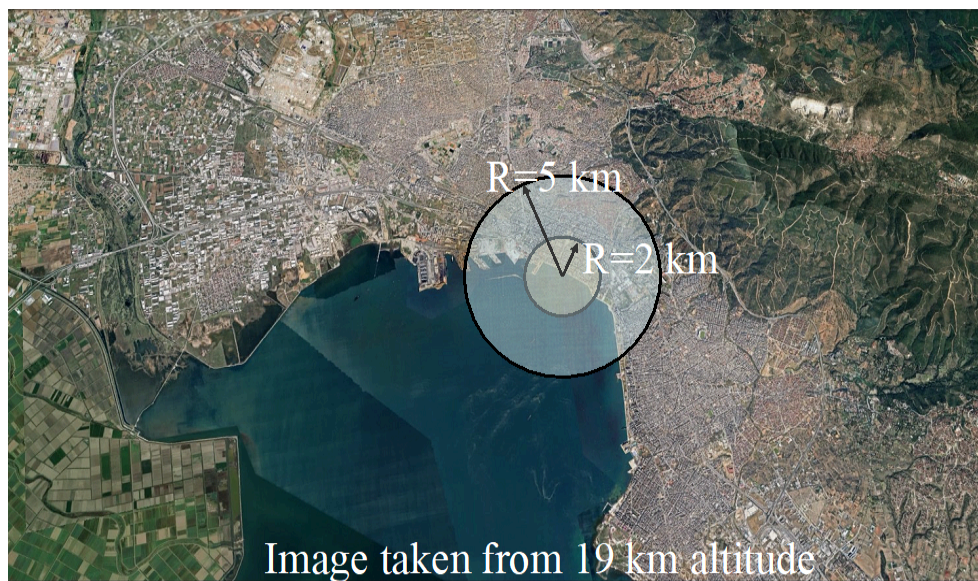
<b><math>\Delta p</math></b>	[4.2, 4.7]	[4, 4.5]	[4, 4.5]	[2, 2.5]	[1, 1]
<b>NF (dB)</b>	[1.5, 4.5]	[2, 4]	[2, 4]	N/A	N/A
<b>G/T (dB/K)</b>	N/A	N/A	N/A	[0, 15]	[10, 15]
<b>P idle (Watt)</b>	[145, 130]	[6.8, 6]	[2, 1.5]	[1, 0.5]	[1, 0.5]
<b>L_cable_Tx (dB)</b>	[1, 2]	[0.5, 0.5]	[0.5, 0.5]	[0.5, 0.5]	[0.5, 0.5]
<b>L_cable_Rx (dB)</b>	[1, 2]	[0.5, 0.5]	[0.5, 0.5]	[0.5, 0.5]	[0.5, 0.5]
<b>Διαθεσιμότητα ζεύξεις</b>	99.999	99.999	99.999	99.999	99.999
<b>R_a (mm/h)</b>	27	27	27	27	27

Πίνακας 6.2: Τιμές συντεταγμένων των Εναέριων και των Δορυφορικών δικτύων.

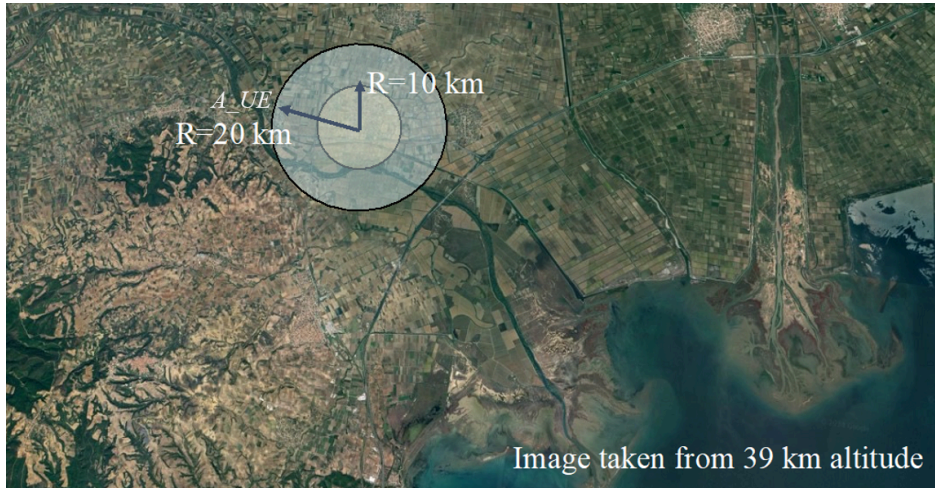
Μεταβλητή	Τιμή	Μεταβλητή	Τιμή	Μεταβλητή	Τιμή	Μεταβλητή	Τιμή
<b>HAPS και UAV</b>				<b>LEO</b>			
$lon_{HAPS}$	22.94	$lon User_{HAPS}$	[22.98, 22.92]	$lon_{LEO}$	22.56	$lon User_{LEO}$	[22.48, 23.08]
$lon_{UAV}$	22.94	$lon User_{UAV}$	[22.98, 22.95]				
$lat_{HAPS}$	40.63	$lat User_{HAPS}$	[40.66, 40.64]	$lat_{LEO}$	40.57	$lat User_{LEO}$	[41.25, 40.58]
$lat_{UAV}$	40.63	$lat User_{UAV}$	[40.66, 40.63]				
$alt_{HAPS}$	20km	$alt User_{HAPS}$	1.5 m	$alt_{LEO}$	600 km	$alt User_{LEO}$	1.5 m
$alt_{UAV}$	10 km	$alt User_{UAV}$	1.5 m				



Σχήμα 6.1: Τοπολογία Σεναρίων Επικοινωνίας



Σχήμα 6.2: Τοπολογία σεναρίου Πλατφορμάς HAPS.



Σχήμα 6.3: Τοπολογία σεναρίου δορυφόρου LEO.

### 6.3 Αποτελέσματα

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του MATLAB. Πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των δικτύων, εστιάζοντας στο πλήθος των απαιτούμενων σταθμών βάσης και στην οικονομική αποδοτικότητα (cost-efficiency), καθώς επίσης στην κατανάλωση ισχύος των δικτύων. Μεταβάλλοντας παραμέτρους που επηρεάζονται, όπως την Συχνότητα (f).

#### Για το πρώτο σενάριο επικοινωνίας:

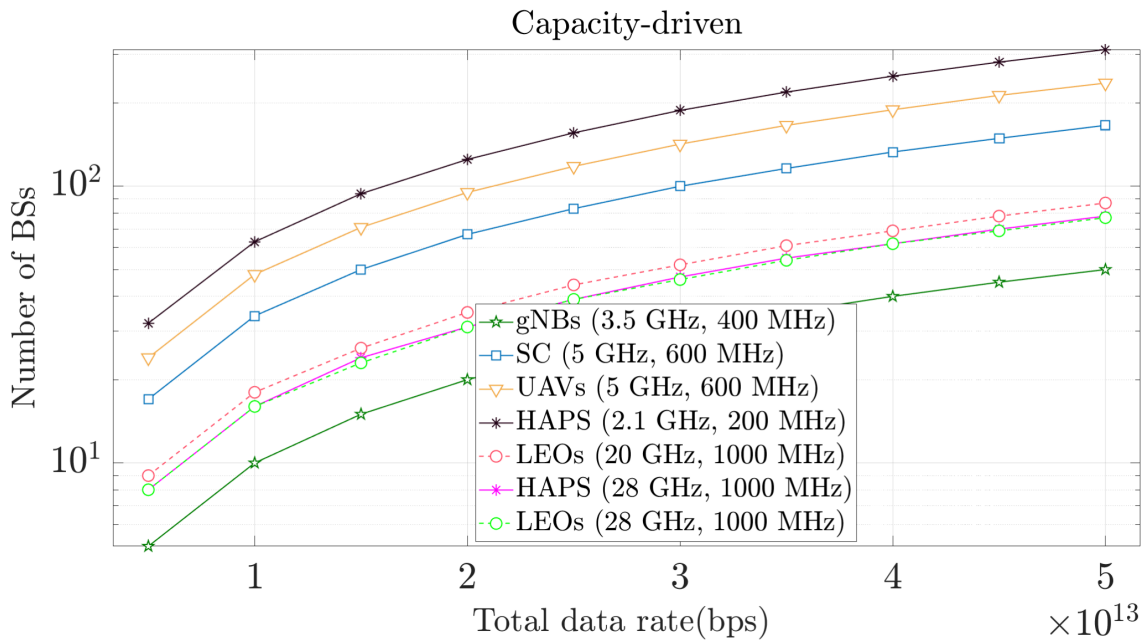
Αρχικά, στο Σχήμα 6.4 φαίνεται σε γραμμική κλίμακα το πλήθος των απαιτούμενων BS των τριών τύπων δικτύων σε συνάρτηση με τον συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης των  $50\,000\ m^2$ . Παρατηρώντας το πιο κάτω σχήμα, διαπιστώνεται ότι υπάρχει περαιτέρω ανάγκη των εναέριων σταθμών βάσης (UAV, HAPS) σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δίκτυα ραδιοπρόσβασης. Συγκεκριμένα, οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες (HAPS) χρειάζονται περισσότερους σταθμούς βάσης (BS), ώστε να καλυφθεί πλήρως η εξεταζόμενη περιοχή ( $50\,000\ m^2$ ). Λόγω της μικρής χωρητικότητας καναλιού (C), η οποία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στο σενάριο αυτό. Καθώς τα UAVs παρουσιάζουν μικρή χωρητικότητα καναλιού (C). Επιπλέον εξαιτίας της δομής των UAVs δεν υποστηρίζουν πολύπλοκα συστήματα κεραιών όπως τα επίγεια gNBs, έτσι τοποθετούνται κεραιές πλησίον των Small Cells με μικρές δυνατότητες. Συνεπώς, ο συνδυασμός των πιο πάνω αιτιών, οδηγούν προς την ανάγκη για περαιτέρω BS.

Στον αντίποδα, τα επίγεια δίκτυα gNBs, αποδεικνύονται ότι απαιτούν τις λιγότερες υποδομές BS. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι τα gNBs υποστηρίζουν πολύπλοκα συστήματα κεραιών με πολλές δυνατότητες, κατά συνέπεια η υποστήριξη μεγάλης χωρητικότητας καναλιού (capacity) με αποτέλεσμα να χρειάζονται λιγότεροι gNBs σταθμοί βάσης.

Με μια πρώτη σκέψη, μπορεί να πει κανείς ότι η εξεταζόμενη περιοχή των ( $50\,000\text{ m}^2$ ) μπορεί να καλυφθεί είτε μόνο με ένα δορυφόρο LEO είτε μόνο με ένα HAPS, λόγω του υψομέτρου πτήσης τους. Στην εργασία αυτή, μετά από περαιτέρω έρευνα αποδεικνύεται ότι, χρειάζονται περισσότεροι του ενός LEO ή HAPS. Λόγω του ότι μελετώνται δύο κριτήρια για τον υπολογισμό του πλήθους των απαιτούμενων BS, το πρώτο απευθύνεται στον συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης (Area Traffic Capacity) των πενήντα χιλιάδων τετραγωνικών μέτρων, που απευθύνεται σε αστική περιοχή με μεγάλο ρυθμό εξυπηρέτησης. Έτσι, απαιτείται ένα ευρύ φάσμα απαιτούμενων σταθμών βάσης.

Παράλληλα, τα διαστημικά δίκτυα (LEO) και οι πλατφόρμες (HAPS), μελετήθηκαν σε δύο διαφορετικές συχνότητες και παρατηρείται ότι, όταν χρησιμοποιείται μεγαλύτερη συχνότητα το πλήθος των απαιτούμενων σταθμών βάσης μειώνεται. Λόγω των περισσότερων πληροφοριών που μεταδίδονται. Τα Διαστημικά δίκτυα (LEO), χρειάζονται λιγότερους σταθμούς βάσης σε αντίθεση των εναέριων (UAV, HAPS). Μια λιγότερη αποδοτική περίπτωση των LEOs, είναι με συχνότητα 20 GHz που χρειάζονται από 9 για 5 Tbps έως 87 δορυφόροι LEOs για 50 Tbps. Ωστόσο μια καλύτερη περίπτωση των LEOs, είναι με συχνότητα 28 GHz, που απαιτούνται 8 LEOs για 5 Tbps έως 77 δορυφόροι για 50 Tbps. Από την άλλη μεριά, οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες (HAPS) με βασική συχνότητα λειτουργίας 2.1 GHz απαιτούνται 32 HAPS για 5 Tbps, ενώ στα 50 Tbps απαιτούνται 312 HAPS. Συνεπώς αποδεικνύεται ότι, όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, τόσο μειώνεται το πλήθος των απαιτούμενων σταθμών βάσης, λόγω της μεγαλύτερης χωρητικότητας καναλιού (capacity).

Η χωρητικότητα καναλιού (capacity), συνδέεται άμεσα με την φασματική αποδοτικότητα καναλιού  $SE$ , η οποία σημειώνει μεγαλύτερη τιμή σε μεγαλύτερη συχνότητα. Λόγω του αυξανόμενου πλήθους των αλυσίδων  $N_{TRXi}^{AN}$  (transceiver chains). Ακόμη, ένα μεγαλύτερο  $SE$  επιτυγχάνεται, λόγω του μεγαλύτερου SNR που επιτυγχάνεται. Όμως, όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, σημειώνονται σημαντικά μεγαλύτερες απώλειες διάδοσης, έτσι το εκπεμπόμενο σήμα μειώνεται. Λόγω ότι σημειώνουν μεγαλύτερο κέρδος της κεραία στον πομπό και στον δέκτη, έχει ως αποτέλεσμα την εξισορρόπηση του υποβιβασμού του εκπεμπόμενου σήματος. Επίσης, μια μεγαλύτερη χωρητικότητα καναλιού (capacity) επιτυγχάνεται, λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης (bandwidth). Το εύρος ζώνης, συνδέεται άμεσα με την συχνότητα, μια μεγαλύτερη συχνότητα θα οδηγήσει στην αύξηση του εύρους ζώνης. Συνοψίζοντας, μια μεγαλύτερη φασματική αποδοτικότητα  $SE_{i,u}$  και ένα μεγαλύτερο εύρος ζώνης, συνεπώς προκύπτει μια μεγαλύτερη χωρητικότητα καναλιού  $C_i$ . Έτσι, παρατηρείται ένα μικρότερο πλήθος απαιτούμενων σταθμών βάσης (BS).



Σχήμα 6.4: Απαιτούμενος αριθμός σταθμών βάσης (BS) σε συνάρτηση με τον Συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης ανά Γεωγραφική περιοχή.

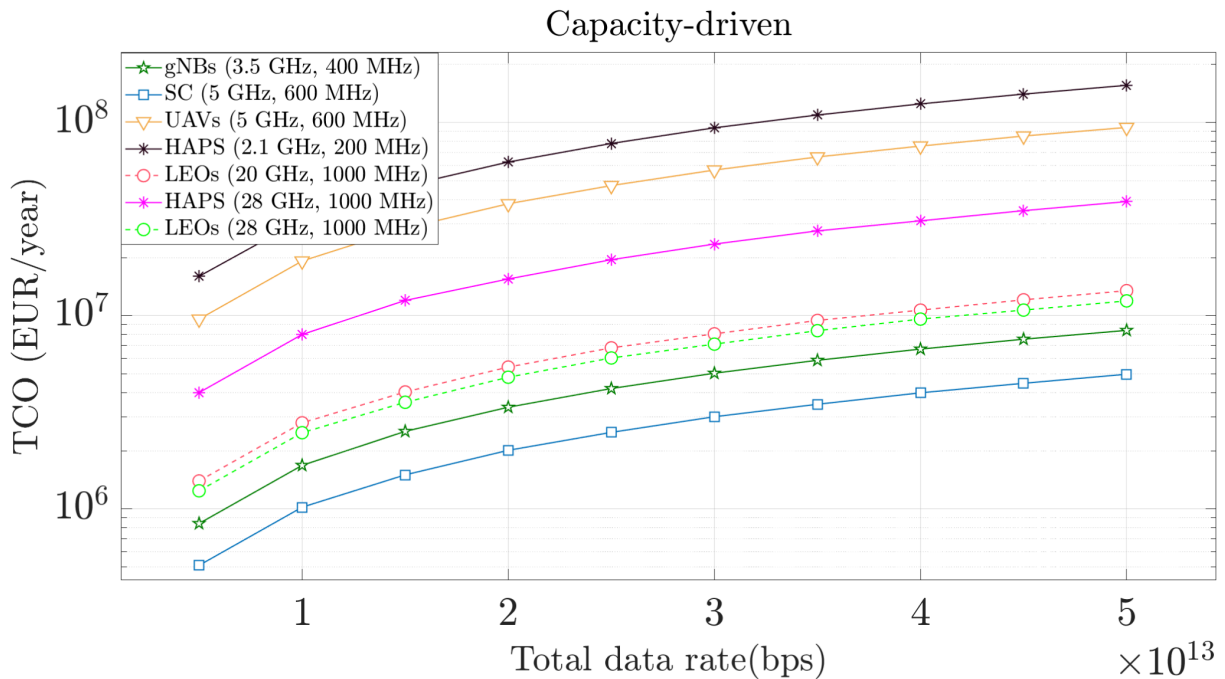
Παρατηρώντας το Σχήμα 6.5, βλέπουμε το συνολικό κόστος TCO, το οποίο αναφέρεται στο κόστος ανάπτυξης, λειτουργίας, συντήρησης και το κόστος εκτόξευσης σε συνάρτηση με τον συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης ανά γεωγραφική περιοχή (coverage). Παρατηρείται ότι, όσο αυξάνεται ο συνολικός ρυθμός εξυπηρέτησης ανά γεωγραφική περιοχή (Total data rate), τόσο αυξάνεται το κόστος TCO. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στο πλήθος των απαιτούμενων σταθμών βάσης που φαίνεται στο Σχήμα 6.4 και στο κόστος TCO.

Στο Σχήμα 6.5 διαπιστώνεται ότι, τα εναέρια δίκτυα μειώνουν το μεγαλύτερο κόστος TCO ανά έτος. Συγκεκριμένα, οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες HAPS με συχνότητα 2.1GHz παρουσιάζουν το υψηλότερο κόστος TCO ανά έτος, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα BS. Λόγω του πλήθους των απαιτούμενων σταθμών βάσης που είναι 327 HAPS και το υψηλό κόστος TCO που είναι 0.5 εκ. ευρώ. Συνεπώς, ο συνδυασμός των δύο παραγόντων έχει ως αποτέλεσμα μια μη οικονομική λύση, το οποίο ανέρχεται στα 16 εκ. ευρώ ετησίως για 5 Tbps έως 156 εκ. ευρώ ετησίως για απαιτήση τηλεπικοινωνιακής κίνησης 50 Tbps. Αξιοσημείωτο είναι ότι το μη επανδρωμένο UAV Hermes 900, έχει κόστος TCO 200 000 ευρώ ανά BS, λόγω ότι έχει αυτονομία τριάντα ώρες αναγκαστικά θα χρειαστούν δυο Drone, τα οποία θα εναλλάσσονται για φόρτιση της μπαταρίας, ώστε ανταπεξέλθουν σε ετήσια λειτουργία. Επομένως το ετήσιο κόστος για ένα UAV ανέρχεται στις τετρακόσιες χιλιάδες ευρώ.

Όσον αφορά τα HAPS και Satellite LEOs, μελετήθηκαν παράλληλα σε δύο διαφορετικές συχνότητες, που παρατηρήθηκε ότι, όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, τόσο μειώνεται το κόστος TCO. Λόγω του ότι υπάρχει ανάγκη λιγότερων Σταθμών Βάσης (BS) και στις δύο περιπτώσεις (HAPS, LEO).

Τα επίγεια δίκτυα, αποδουκνούνται ως μια οικονομική λύση στον τομέα αυτό. Πλέον, μπορούμε να πούμε ότι βέλτιστη οικονομική λύση είναι τα Small Cells, παρόλο των μεγάλων αναγκών από BS ώστε να καλυφθεί πλήρως η εξεταζόμενη περιοχή, όπως διαπιστώθηκε και στο Σχήμα 6.4. Τα Small Cells σημειώνουν το μικρότερο κόστος TCO ανά SC που ανέρχεται στις τριάντα χιλιάδες ευρώ. Όσον

αφορά το σενάριο επικοινωνίας που εξετάζεται, ανέρχεται στις 510 χιλ. ευρώ ετησίως για 5 Tbps έως και 4,98 εκ. ευρώ ανά έτος για 50 Tbps που χρειάζονται 166 BS.

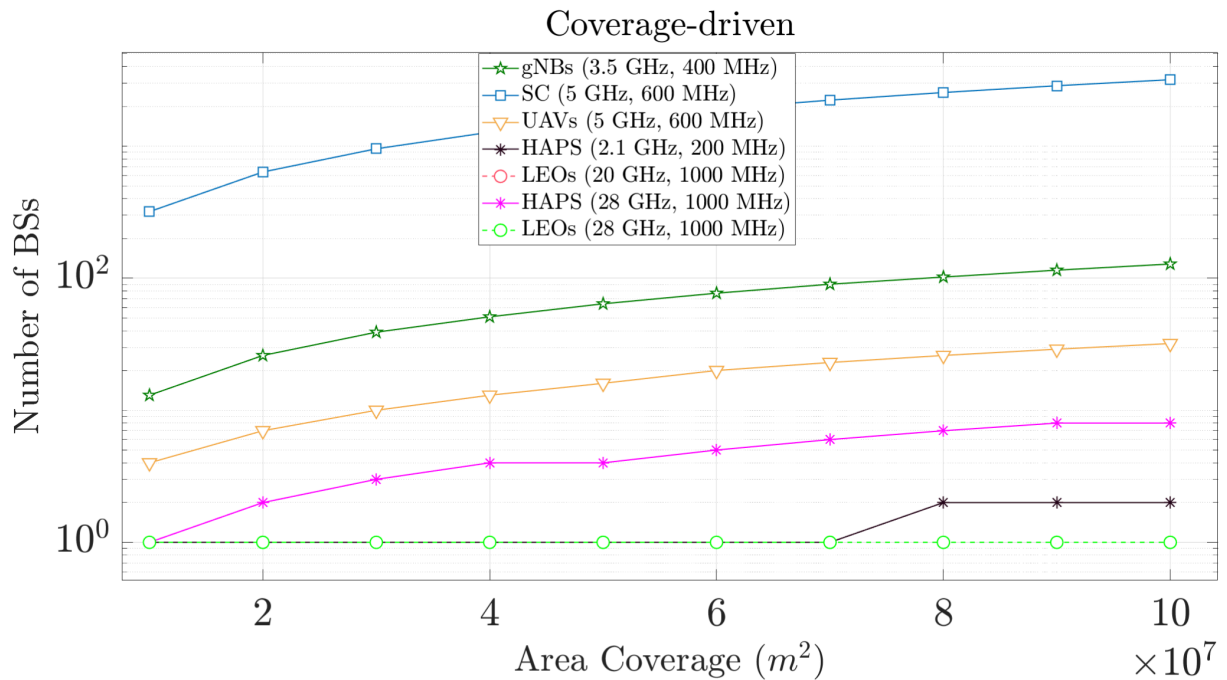


Σχήμα 6.5: Συνολικό Κόστος σταθμών βάσης σε συνάρτηση με τον Συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης της περιοχής που εξετάζεται.

### Για το δεύτερο σενάριο επικοινωνίας:

Στο Σχήμα 6.6, βλέπουμε σε λογαριθμική κλίμακα τον αριθμό των BS που απαιτούνται για τα πέντε είδη σταθμών βάσης (BS) σε συνάρτηση με την εξεταζόμενη περιοχή. Παρατηρώντας το πιο κάτω Σχήμα, διαπιστώνουμε ότι όσο αυξάνεται η περιοχή που εξετάζεται, τόσο αυξάνεται ο αριθμός απαιτούμενων σταθμών βάσης. Επίσης, παρατηρείται ότι τα εναέρια και τα διαστημικά δίκτυα μέσα, χρειάζονται τις λιγότερες υποδομές σταθμών βάσης σε σύγκριση με τα επίγεια μέσα (BS). Πιο συγκεκριμένα, οι Διαστημικές και Στρατοσφαιρικές επικοινωνίες, διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στον τομέα αυτό, καθώς χρειάζεται μόνο ένας σταθμός βάσης για την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Λόγω του ύψους πτήσης που είναι τοποθετημένα, όπως είδαμε επίσης στο Σχήμα 4.1, όσο αυξάνεται το ύψος πτήσης, τόσο αυξάνεται η γεωγραφική κάλυψη (coverage).

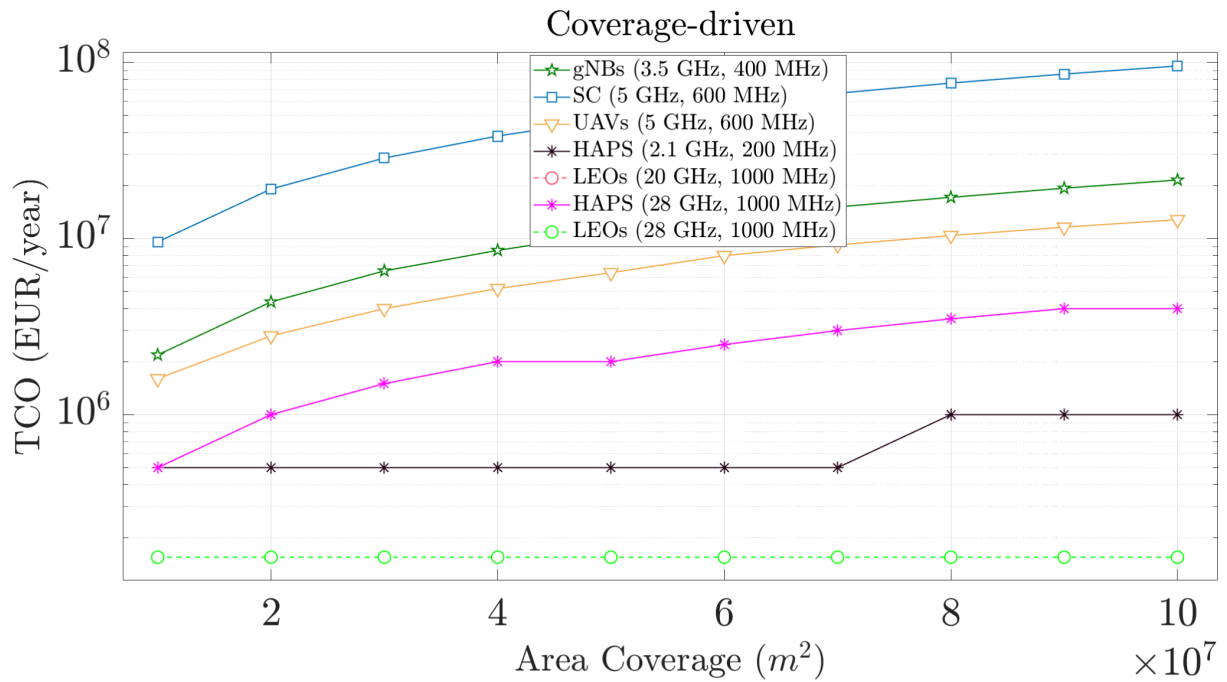
Τα Small Cells, με συχνότητα 5GHz και εύρος ζώνης 600 MHz, χρειάζονται τους περισσότερους BSs σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δίκτυα, που χρειάζονται 319 BSs σε έκταση δέκα χιλιάδων τετραγωνικών μέτρων. Συγκεκριμένα, οι περισσότεροι σταθμοί βάσης (BS) απαιτούνται σε έκταση εκατόν χιλιάδων τετραγωνικών μέτρων, τα οποία χρειάζονται 3181 BS.



Σχήμα 6.6: Λογαριθμικός απαιτούμενος αριθμός σταθμών βάσης (BS) σε συνάρτηση με την εξεταζόμενη Γεωγραφική περιοχή.

Παρατηρώντας το Σχήμα 6.7, βλέπουμε το κόστος TCO ανά έτος σε συνάρτηση με την εξεταζόμενη περιοχή. Το κόστος TCO συνδέεται με την αύξηση της εξεταζόμενης περιοχής. Έτσι, όπως διαπιστώθηκε στο Σχήμα 6.6, ότι όσο αυξάνεται η περιοχή που εξετάζεται, τόσο αυξάνεται ο αριθμός απαιτούμενων σταθμών βάσης (BSs). Συνεπώς, το κόστος TCO συνδέεται με το πλήθος των απαιτούμενων σταθμών βάσης, καθώς παρατηρείται ότι, όσο αυξάνεται η περιοχή κάλυψης, τόσο αυξάνεται κόστος TCO. Ακόμη, διαπιστώνεται ότι τα Επίγεια δίκτυα παρουσιάζουν το υψηλότερο κόστος TCO. Πιο συγκεκριμένα, οι μικρο-κυψέλες (SC) εμφανίζουν το μεγαλύτερο κόστος TCO ανά έτος, σε αντίθεση με τις μακρο-κυψέλες (MC). Λόγω του πλήθους των απαιτούμενων σταθμών βάσης και το υψηλό κόστος TCO σε σύγκριση με άλλους BS. Συνεπώς ο συνδυασμός των δύο παραγόντων, έχει ως αποτέλεσμα μια μη οικονομική λύση. Το κόστος TCO των SCs, ανέρχεται στα 9,57 εκ. ευρώ κατά έτος για 5 Tbps μέχρι και 95,52 εκ. ευρώ ετησίως για απαίτηση τηλεπικοινωνιακής κίνησης 50 Tbps.

Όσον αφορά τα Εναέρια και Δικαστικά μέσα, εμφανίζονται ως μια Οικονομική επιλογή για την ανάπτυξη δικτύου με μεγάλη περιοχή κάλυψης (coverage). Συγκεκριμένα, τα Στρατοσφαιρικά μέσα (HAPS), αποδυναμώνονται ως βέλτιστη οικονομική επιλογή στον τομέα αυτό, όπου αναμένεται να διασραματίσει σπουδαίο ρόλο στα 6G δίκτυα.



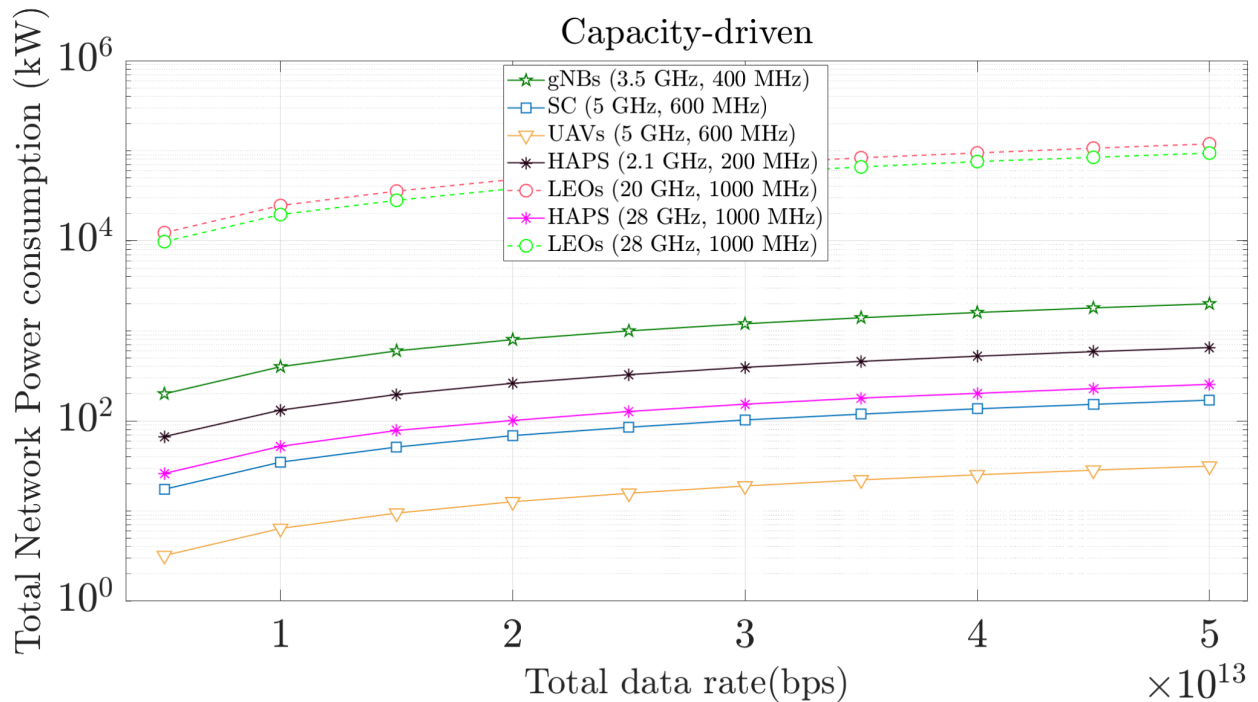
Σχήμα 6.7: Το συνολικό Κόστος των σταθμών βάσης (BS) σε συνάρτηση με την εξεταζόμενη περιοχή.

Στο Σχήμα 6.8, βλέπουμε την Συνολική Κατανάλωση Ισχύος του δικτύου σε συνάρτηση με την εξεταζόμενη γεωγραφική περιοχή σε ( $\text{bps}/m^2$ ). Με μια πρώτη ματιά, παρατηρείται ότι η συνολική κατανάλωση ισχύος σε κάθε τύπο σταθμό βάσης, όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις για περετέρο τηλεπικοινωνιακή κίνηση, τόσο αυξάνεται η κατανάλωση ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, το γεγονός αυτό διαπιστώνεται σε όλα τα BSs.

Όσον αφορά το Διαστημικό δίκτυο, παρουσιάζουν την μεγαλύτερη Κατανάλωση Ισχύος σε σχέση με τα υπόλοιπα BS, λόγω του πλήθους των απαιτούμενων BSs και της ενεργό ισοτροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP). Οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες HAPS και οι δορυφορικοί LEO σταθμοί βάσης, εξετάζονται παράλληλα σε δύο διαφορετικές συχνότητες που παρατηρείται ότι, όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, παρουσιάζεται μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση (energy efficiency).

Συγκρίνοντας τις στρατοσφαιρικές πλατφόρμες HAPS με τους Δορυφόρους LEO, οι πλατφόρμες HAPS εμφανίζεται ως καλύτερη επιλογή σε σχέση με τους δορυφόρους LEO. Τα Δορυφορικά δίκτυα, λόγω του ύψος πτήσης που βρίσκονται, καταγράφουν τις μεγαλύτερες απώλειες διάδοσης αν και στο διάστημα μεταξύ της Εξόσφαιρας μέχρι την Τροπόσφαιρα, το σήμα δεν υποβιβάζεται σημαντικά έτσι απαιτείται μεγαλύτερη εκπεμπόμενη ισχύ. Οι μακροκυβέλες (MC), εμφανίζουν επίσης μεγάλη κατανάλωση ισχύος, λόγω των πολύπλοκων συστημάτων των κεραιών που υποστηρίζουν και της υψηλής κατανάλωσης όταν η κεραία είναι σε αδράνεια  $P_{idle}$  που είναι [145,130].

Στον αντίποδα, τα UAVs παρουσιάζουν την μικρότερη κατανάλωση ισχύος σε σχέση με τα υπόλοιπα BS. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι είναι βέλτιστη λύση από άποψη Ενεργειακής απόδοσης (Energy efficiency) για την ανάπτυξη δικτύου μόνο με UAVs. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καταναλώνουν χαμηλή ισχύ κατά τη λειτουργία τους, παρόλο που απαιτούνται αρκετά UAVs ώστε να καλυφθεί η εξεταζόμενη περιοχή.



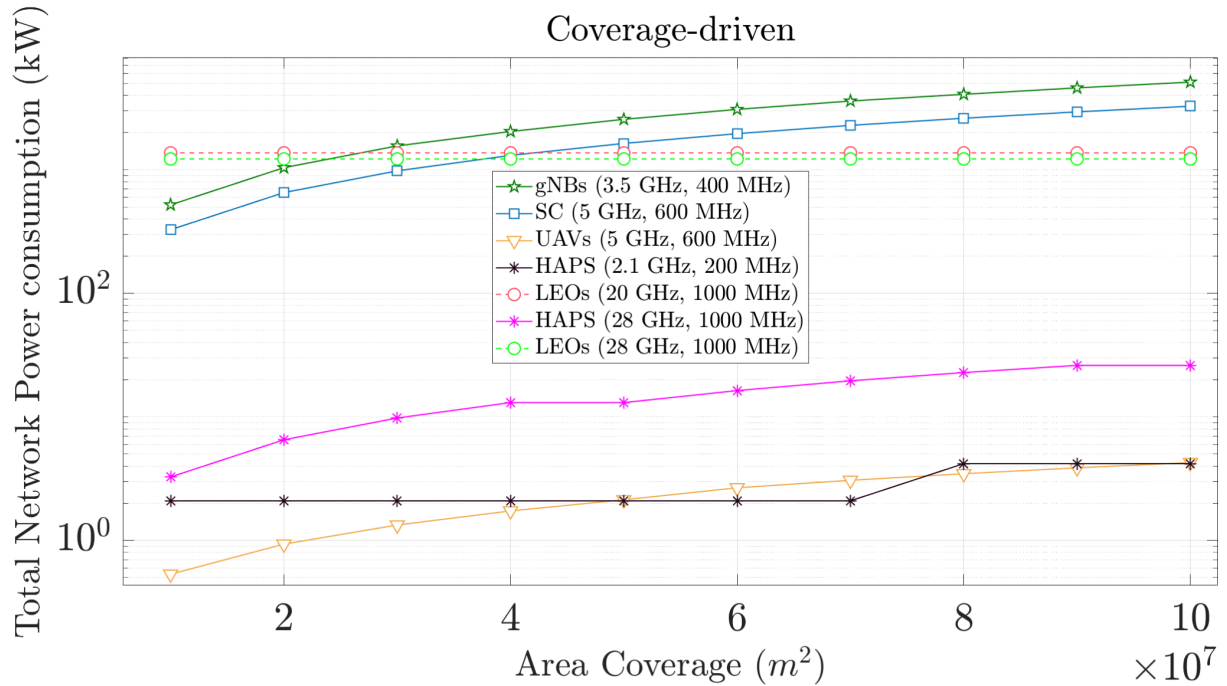
Σχήμα 6.8: Λογαριθμική συνολική Κατανάλωση Ισχύος του δικτύου σε συνάρτηση με τον Συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης ανά Γεωγραφική περιοχή.

Στο Σχήμα 6.9, βλέπουμε την Συνολική Κατανάλωση Ισχύος καθώς αυξάνεται η περιοχή που μελετάμε. Παρατηρείται ότι, όσο αυξάνεται η εξεταζόμενη περιοχή, τόσο αυξάνεται η Κατανάλωση Ισχύος, λόγω αύξηση των απαιτούμενων σταθμών βάσης.

Η συχνότητα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, όσο αυξάνεται η συχνότητα, τόσο μειώνεται η κατανάλωση ισχύς, όπως διαπιστώθηκε επίσης στο Σχήμα 6.8.

Τα δορυφορικά και τα επίγεια δίκτυα, σημειώνουν τη μεγάλη κατανάλωση ισχύος. Αντίθετα, τα εναέρια δίκτυα παρουσιάζονται ως βέλτιστη επιλογή.

Όσον αφορά την ενεργειακή απόδοσης (energy efficiency), βέλτιστη λύση αποτελούν τα UAV με συχνότητα 5 GHz, όπου διαπιστώθηκε και στο Σχήμα 6.8 που απευθύνεται στο σενάριο με αστική περιοχή κάλυψης.



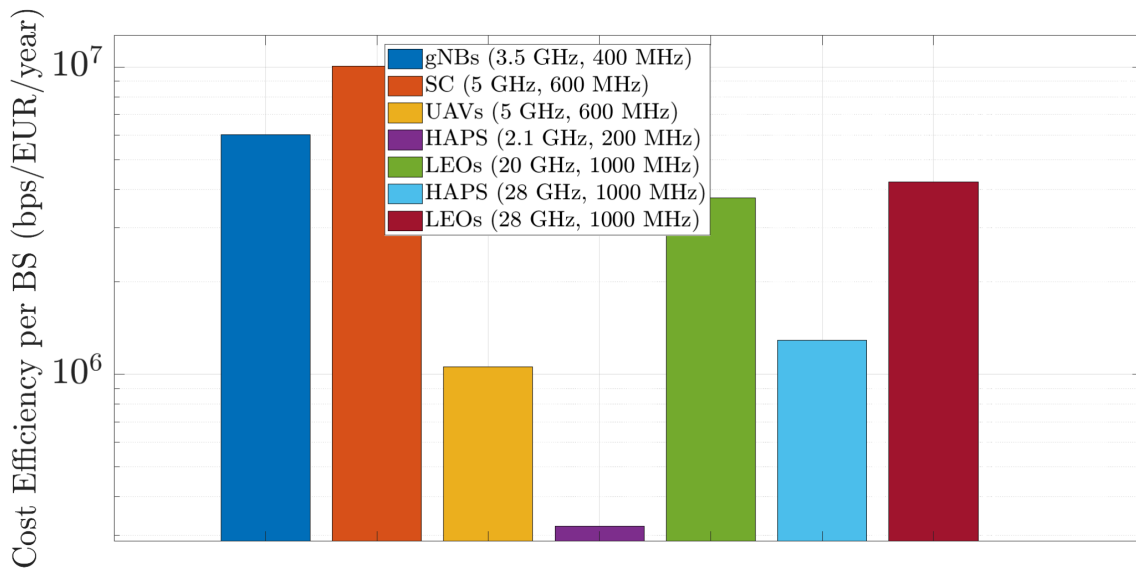
Σχήμα 6.9: Λογαριθμική Συνολική Κατανάλωση Ισχύος του δικτύου σε συνάρτηση με την εξεταζόμενη περιοχή.

Παρατηρώντας το Σχήμα 6.10, βλέπουμε την Αποδοτικότητα κόστους ανά ρυθμό δεδομένων κατά την χρονική διάρκεια ενός έτους. Στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών αποτελεί σημαντική πτυχή για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός δικτύου. Μια μεγαλύτερη τιμή καταδεικνύεται ότι, υπάρχει κατάλληλη ισορροπία μεταξύ ρυθμού δεδομένων και κόστους TCO. Τα επίγεια δίκτυα, όπως αποδεικνύεται αποτελεσματικές λύσεις στον τομέα αυτό, σε διπλάσια επίπεδα σε σύγκριση με τα εναέρια δίκτυα. Πλέον, μπορούμε να πούμε ότι, τα Small Cells (CSs) αποτελούν βέλτιστη Οικονομικά Αποδοτική λύση (Cost Efficiency) για την ανάπτυξη 6G δικτύου μόνο με την χρήση των SCs. Τα παρατηρείται δορυφορικά δίκτυα επίσης σημειώνουν μεγάλη αποδοτικότητα, κυρίως σε μεγαλύτερη συχνότητα. Όσον αφορά τις Στρατοσφαιρικές πλατφόρμες (HAPS) και τους δορυφόρους LEO, παρατηρείτε ότι σε μια υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας σημειώνουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα.

Από την άλλη μεριά, τα εναέρια δίκτυα ραδιοπρόσβασης παρουσιάζουν την μικρότερη αποδοτικότητα κόστους. Επιπλέον, μια μη αποδοτική λύση, είναι με μικρότερη συχνότητα 2.1GHz και εύρος ζώνης 200 MHz, διαπιστώνεται ότι, η αποδοτικότητα μειώνεται αισθητά που είναι τέσσερις φορές μικρότερη από την συχνότητα των 28 GHz.

Μια μη αποδοτική λύση, είναι τα HAPS με συχνότητα 2.1GHz και εύρος ζώνης 200 MHz,

Τέλος, τα UAVs, με συχνότητα λειτουργίας 5GHz και εύρος ζώνης 600 MHz, τα οποία δεν αποτελούν αποδοτική οικονομική λύση στον τομέα αυτό.



Σχήμα 6.10: Λογαριθμική αποδοτικότητα κόστους ανά ρυθμό δεδομένων σε ετήσια βάση.

#### 6.4 Επίλογος

Συνοψίζοντας, στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του MATLAB. Επιπλέον, δόθηκαν οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση, οι οποίες επιλέχθηκαν με ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να προκύψουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Ακόμη, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των σταθμών βάσης, ώστε να διαπιστωθεί η πιο βέλτιστη λύση. Μετά την ολοκλήρωση του κεφαλαίου αυτού, πλέον μπορούμε να επισημάνουμε βέλτιστες λύσεις, οι οποίες είναι Οικονομικά Αποδοτικές (Cost-efficient) λύσεις, όπου θα συμβάλλουν στην ανάπτυξη 6G δικτύων. Τέλος, τα επίγεια δίκτυα επιτυγχάνουν καλή ισορροπία μεταξύ χωρητικότητας καναλιού και κατανάλωσης κόστους TCO.

## Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης

### 7.1 Εισαγωγή

Στο τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα όπου διαπιστώθηκαν κατά την διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα αναφερθούν προτάσεις βελτίωσης και περαιτέρω έρευνα.

### 7.2 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν με τα τρία βασικά δίκτυα (επίγεια, εναέρια και διαστημικά δίκτυα) όπου θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στα 6G δίκτυα. Στην συνέχεια, προσομοιώθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB, χρησιμοποιώντας μεταβλητές από έγκυρες και αξιόπιστες πηγές.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μελετήθηκαν δύο διαφορετικά σενάρια, το πρώτο σενάριο απευθύνεται σε περιοχή με εμβαδόν πενήντα τετραγωνικών χιλιομέτρων, η οποία απαιτεί μεγάλη τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Το δεύτερο σενάριο, μελετάει μεγαλύτερη εξεταζόμενη περιοχή, η οποία απαιτεί μικρή τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

Σημαντικό συμπέρασμα είναι, με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, πλέον μπορούμε να ισχυριστούμε ότι, τα επίγεια δίκτυα ραδιοπρόσβασης αποδεικνύονται ως βέλτιστη Οικονομικά Αποδοτική (Cost-Efficiency) επιλογή στην ανάπτυξη 6G δικτύου σε πυκνοκατοικημένη περιοχή. Συγκεκριμένα, τα Small Cells (SC) παρουσιάζουν μια πιο βέλτιστη επιλογή σε σύγκριση με τα gNBs και τα υπόλοιπα δίκτυα. Λόγω καλής ισορροπίας μεταξύ χωρητικότητας καναλιού (C) και κόστους TCO. Παράλληλα, τα διαστημικά δίκτυα (LEO) και οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες (HAPS) μελετήθηκαν σε δύο διαφορετικές συχνότητες, όπου αποδεικνύεται ότι, όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, τόσο αυξάνεται η αποδοτικότητα κόστους (Cost-Efficiency). Λόγω ότι επιτυγχάνεται υψηλότερο SE, εξαιτίας της αύξησης του πλήθους των αλυσίδων (transceiver chains), καθώς επίσης λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης (BW). Συνεπώς, ο συνδυασμός των δύο έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη μεταφοράς πληροφοριών. Έτσι, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αποδοτικότητα κόστους (Cost-Efficiency).

Όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση (energy efficiency), τα UAV με συχνότητα 5 GHz αποτελούν βέλτιστη λύση και στα δύο σενάρια επικοινωνίας που διερευνήθηκαν. Αντιθετα, τα διαστημικά δίκτυα (LEO) και στα δύο σενάρια παρουσιάζουν την μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος, λόγω της μεγάλης ενεργού ισοτροπικά ακτινοβολούμενης ισχύος (EIRP). Επίσης, διαπιστώθηκε ότι, όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας η κατανάλωση ισχύος μειώνεται. Λόγω περισσότερων αλυσίδων (transceiver chains) και με συνδυασμό μεγαλύτερου (EIRP).

Από την άλλη μεριά, στο σενάριο επικοινωνίας που μελετάει μεγαλύτερη εξεταζόμενη περιοχή, η οποία απαιτεί μικρή τηλεπικοινωνιακή κίνηση, τα εναέρια και τα διαστημικά δίκτυα ραδιοπρόσβασης αποτελούν ως βέλτιστη Οικονομική επιλογή. Παράλληλα, μελετήθηκαν τα διαστημικά δίκτυα (LEO) και οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες (HAPS) σε δύο διαφορετικές συχνότητες, διαπιστώνεται ότι, σε μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας, παρουσιάζεται μεγαλύτερη Οικονομική αποδοτικότητα (Cost-Efficiency).

Το σημαντικότερο συμπέρασμα της εργασίας αυτής, είναι ότι με τον συνδυασμό των επίγειων δικτύων που παρουσιάζονται ως βέλτιστη επιλογή σε ζήτηση υψηλής τηλεπικοινωνιακής κίνησης (Area Traffic

Capacity). Επιπλέον με τον συνδυασμό των εναέριων και των διαστημικών δικτύων που παρουσιάζονται ως βέλτιστη λύση σε περίπτωση ζήτησης μικρής τηλεπικοινωνιακής κίνησης (Aera Traffic Capacity). Συνεπώς, μπορεί να υποστηριχθεί ότι, καταλήγουμε σε ενοποιημένες λύσεις (Hybrid) των επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων, έτσι, οδηγώντας σε μια πιο βέλτιστη επιλογή για την ανάπτυξη ενός οικονομικά αποδοτικού (cost-effective) βιώσιμου 6G δικτύου όπου αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2030.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, μια σημαντική ενότητα της εργασίας είναι μελέτη και σύγκριση των τριών δικτύων (επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων), εστιάζοντας σε διάφορα χαρακτηριστικά, που διαπιστώνεται ότι έχουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους. Όσον αφορά τις πλατφόρμες HAPS, τα Αερόπλοια (Airship), παρουσιάζουν τις περισσότερες δυνατότητες σε σύγκριση με τα υπόλοιπα HAPS, τα οποία αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα 6G network.

### **7.3 Κατεύθυνση για Περαιτέρω Έρευνα**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, ανοίγει ένας νέος κύκλος προσκλήσεων για μελλοντικές έρευνες, όπως:

Μελλοντικά, θα μπορούσε να συμπεριληφθούν διαφορετικά είδη σταθμών βάσης, όπως π.χ. δορυφόροι GEO, MEO, UAVs με περιστρεφόμενα πτερύγια και Hybrid UAVs. Μελετώντας διαφορετικούς BS, θα είμαστε σε θέση να ερευνήσουμε για περαιτέρω έρευνα, έτσι ώστε να προκύψουν πιο βέλτιστες επιλογές για την ανάπτυξη 6G δικτύου το 2030.

Παράλληλα, θα μπορούσε να συμπεριληφθεί στην έρευνα άλλα μέρη του δικτύου, όπως το Backhaul ή το δίκτυο κορμού (core network), ώστε να αυξήσουμε την απόδοση και να μειώσουμε το κόστος υλοποίησης του συνολικού από άκρη σε άκρη δικτύου.

Ακόμη, το παρόν πρόβλημα υπό μελέτη μπορεί να συνδυαστεί με την επίλυση του προβλήματος ανάθεσης πόρων στα ενοποιημένα δίκτυα (επίγεια, εναέρια και διαστημικά) στην έκτη γενιά (6G). Υπάρχουν αρκετοί επιστήμονες που επικεντρώνονται στο πρόβλημα αυτό. Έτσι, επιτυγχάνεται η βελτίωση των δικτύων ως προς π.χ. την ενεργειακή αποδοτικότητα, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με το κόστος, το εύρος ζώνης και την εξυπηρέτηση των χρηστών.

### **7.4 Επίλογος**

Κλείνοντας, είναι αντιληπτό ότι η επιδίωξη για περαιτέρω έρευνα οδηγεί στην βελτίωση της παρούσας εργασίας. Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που έχουν διαπιστωθεί κατά την διεξαγωγή της εργασίας, καταλήγοντας σε υβριδικές λύσεις (Hybrid solution), όπου θα συνδυάζουν τις δυνατότητες των επίγειων, εναέριων και διαστημικών δικτύων. Το μεγαλύτερο επίτευγμα, αποτελεί ο καθοριστικός ρόλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπου θα συμβάλλει σημαντικά στην ανέγερση ενός οικονομικά αποδοτικού 6G δικτύου το 2030, το οποίο θα πληροί όλα τα κριτήρια ποιότητας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R. Galazzo, "Timeline from 1G to 5G: A Brief History on Cell Phones," *CENGN*, July.2022. [Online]. Available: <https://www.cengn.ca>.
- [2] COCC, "Διαφορά μεταξύ 1G, 2G, 3G Vs. 4G και 5G," *COCC*, Feb.2019. [Online]. Available: <https://gr.opticalpatchcable.com>.
- [3] A. F. M. Shahen Shah, A. N. Qasim, M. A. Karabulut, H. Ilhan and M. B. Islam, "Survey and Performance Evaluation of Multiple Access Schemes for Next-Generation Wireless Communication Systems," in *IEEE Access*, vol. 9, no.1, pp. 113428-113442, 2021.
- [4] M. Banafaa et al., "6G mobile communication technology: Requirements, targets, applications, challenges, advantages, and opportunities," *Alexandria Eng. J.*, vol. 64, pp. 245–274, Feb. 2023.
- [5] A. F. M. Shahen Shah, "A Survey From 1G to 5G Including the Advent of 6G: Architectures, Multiple Access Techniques, and Emerging Technologies," 2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), Las Vegas, NV, USA, 2022, pp. 1117-1123, doi: 10.1109/CCWC54503.2022.9720781.
- [6] Rajesh P.S, "What are the differences between 1G, 2G, 3G, 4G and 5G," in *Net-informations*, May. 2023.
- [7] R. Liu, R. Yu-Ngok Li, M. Di Renzo and L. Hanzo "A Vision and An Evolutionary Framework for 6G: Scenarios, Capabilities and Enablers," Cornell University, May. 2023.
- [8] J. Zhang, J. Lin, P. Tang, Y. Zhang, H. Xu, T. Gao, H. Miao, Z. Chai, Z. Zhou, Y. Li, H. Gong, Y. Liu, Z. Yuan, X. Liu, Lei Tian, S. Yang, L. Xia, G. Liu and P. Zhang "Channel Measurement, Modeling, and Simulation for 6G: A Survey and Tutorial," Cornell University, May. 2023.
- [9] S. A. Abdel Hakeem, H. H. Hussein, and H. Kim, "Vision and research directions of 6G technologies and applications," *J. King Saud Univ. Com- 792 put. Inf. Sci.*, vol. 34, no. 6, pp. 2419–2442, Jun.2022.
- [10] J. Ni, Y. Chen, Y. Chen, J. Zhu, D. Ali, and W. Cao, "A survey on theories and applications for self-driving cars based on deep learning methods," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8, p. 2749, Apr. 2020.
- [11] R. Hussain and S. Zeadally, "Autonomous cars: Research results, issues, and future challenges," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 21, no. 2, pp. 1275–1313, Apr.–Jun. 2018.
- [12] F. Duarte, "Self-driving cars: A city perspective," *Sci. Robot.*, vol. 4, no. 28, Mar. 2019, Art. no. eaav9843, doi: 10.1126/scirobotics.aav9843.
- [13] N. A. Greenblatt, "Self-driving cars and the law," in *IEEE Spectrum*, vol. 53, no. 2, pp. 46-51, Feb. 2016, doi: 10.1109/MSPEC.2016.7419800.
- [14] H. Xu and G. Srivastava, "Automatic recognition algorithm of traffic signs based on convolution neural network," *Multimedia Tools Appl.*, vol. 79, nos. 17–18, pp. 11551–11565, May 2020.
- [15] C. Shen et al., "Multi-receptive field graph convolutional neural networks for pedestrian detection," *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 13, no. 9, pp. 1319–1328, Sep. 2019.
- [16] AMN aftermarketNews "Dumb Thoughts About Smart Cars," *AMN aftermarketNews*, Octo.2019. [Online]. Available: <https://www.aftermarketnews.com/dumb-thoughts-about-smart-cars>.

- [17] Z. Xiong, Y. Zhang, et al., "Deep reinforcement learning for mobile 5G and beyond: Fundamentals, applications, and challenges," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 2, 2019, pp. 44–52.
- [18] Laboratory news, "5G could support telesurgery during COVID-19 pandemic," *Laboratory news*, Jul.2020. [Online]. Available: <https://www.labnews.co.uk>.
- [19] A. Vlahov, V. Poulkov, and A. Mihovska, "Analysis of Open RAN Performance Indicators Related to Holographic Telepresence Communications," in *2021 24th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, IEEE, 2021, pp. 1–5.
- [20] R. Li et al., "Towards a new internet for the year 2030 and beyond," in *Proc. 3rd Annual ITU IMT-2020/5G Workshop Demo Day*, 2018, pp. 1–21.
- [21] Award Solutions, "6G: Is it Myth or Reality?," *Award Solutions*, [Online]. Available: <https://www.awardsolutions.com>.
- [22] All you ever wanted to know about digital twins."What Is a Digital Twin, Anyway?," *All you ever wanted to know about digital twins*, IEEE Transmitter, Aug.2022. [Online]. Available: <https://transmitter.ieee.org>.
- [23] R. Saracco, "Digital Twins: Advantages & Issues of a Powerful Emerging Technology," *IEEE Future Directions*, 2018.
- [24] PixelPlex, "Digital twins in healthcare: benefits and industry examples," *PixelPlex*, April.2023 [Online]. Available: <https://pixelplex.io/blog/digital-twins-healthcare/>.
- [25] G. Lee, M. Jung, A. Taleb Zadeh Kasgari, W. Saad and M. Bennis, "Deep Reinforcement Learning for Energy-Efficient Networking with Reconfigurable Intelligent Surfaces," In *Proc. IEEE, Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA*, July. 2020.
- [26] J. Ni, Y. Chen, Y. Chen, J. Zhu, D. Ali, and W. Cao, "A survey on theories and applications for self-driving cars based on deep learning methods," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8, p. 2749, Apr. 2020.
- [27] S. Aboagye, A. R. Ndjiongue, T. M. Ngatched, O. A. Dobre and H. V. Poor "RIS-Assisted Visible Light Communication Systems: A Tutorial" In *Proc. IEEE*, Dec. 2022.
- [28] Z. Zhang and L. Dai, "A Joint Precoding Framework for Wideband Reconfigurable Intelligent Surface-Aided Cell-Free Network," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 69, pp. 4085-4101, 2021, doi: 10.1109/TSP.2021.3088755.
- [29] S. Mumtaz et al., "Terahertz communication for vehicular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 7, pp. 5617-5625, July. 2017.
- [30] M. M. Azari et al., "Evolution of Non-Terrestrial Networks From 5G to 6G: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 4, pp. 2633-2672, Fourthquarter 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3199901.
- [31] ESA CSC, "Rpas-HAPS," [Online]. Available: <https://connectivity.esa.int/projects/rpashaps>.
- [32] W. Liu, B. Li, W. Xie, Y. Dai and Z. Fei, "Energy Efficient Computation Offloading in Aerial Edge Networks With Multi-Agent Cooperation," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 9, pp. 5725-5739, Sept. 2023, doi: 10.1109/TWC.2023.3235997.
- [33] S. Shakoor, Z. Kaleem, D. -T. Do, O. A. Dobre and A. Jamalipour, "Joint Optimization of UAV 3-D Placement and Path-Loss Factor for Energy-Efficient Maximal Coverage," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 12, pp. 9776-9786, 15 June15, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3019065.

- [34] C. E. Kement *et al.*, "Sustaining Dynamic Traffic in Dense Urban Areas with High Altitude Platform Stations (HAPS)," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 7, pp. 150-156, July 2023, doi: 10.1109/MCOM.001.2200584.
- [35] Q. Liao and M. Kaneko, "Global Energy Efficiency Optimization of a Ka-Band Multi-Beam LEO Satellite Communication System," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 55232-55243, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3071475.
- [36] J. Ren, D. Sun, D. Pan, M. Li, and J. Zheng, "Cost-efficient LEO navigation augmentation constellation design under a constrained deployment approach," *Int. J. Aerosp. Eng.*, vol. 2021, p. 5042650, 2021.
- [37] H. V. Abeywickrama, B. A. Jayawickrama, Y. He and E. Dutkiewicz, "Comprehensive Energy Consumption Model for Unmanned Aerial Vehicles, Based on Empirical Studies of Battery Performance," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 58383-58394, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2875040.
- [38] Shakir, Z., Al-Thaedan, A., Alsabah, R., Al-Sabbagh, A., M. Salah, M. E., & Zec, J. "Performance evaluation for RF propagation models based on data measurement for LTE networks - International Journal of Information Technology. SpringerLink" Springer Link, June. 2022.
- [39] G. Vallerio, M. Deruyck, M. Meo and W. Joseph, "Base Station switching and edge caching optimisation in high energy-efficiency wireless access network" *ScienceDirect*, June. 2023.
- [40] M. Ghamari, P. Rangel, M. Mehrubeoglu, G. S. Tewolde and R. S. Sherratt, "Unmanned Aerial Vehicle Communications for Civil Applications: A Review," in *IEEE Access*, Sep.2022, vol. 10, pp. 102492-102531.
- [41] Z. Xiaoning, "Analysis of military application of UAV swarm technology," Scientific research and Planning Department, IEEE, Dec.2020, pp 1200-1204.
- [42] Y. B. Sebbane, Ed., *Smart Autonomous Aircraft: Flight Control and Planning for UAV*. CRC Press, 2015.
- [43] K. Nonami, F. Kendoul, S. Suzuki, W. Wang, and D. Nakazawa, Eds., *Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles*. Springer Publisher, 2010.
- [44] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 4th Quart., 2015.
- [45] T. Park, N. Abuzainab, and W. Saad, "Learning how to communicate in the Internet of Things: Finite resources and heterogeneity," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 7063–7073, 2016.
- [46] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of Things for smart cities," *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, Feb. 2014.
- [47] A. Ferdowsi and W. Saad, "Deep learning-based dynamic watermarking for secure signal authentication in the Internet of Things," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Kansas City, MO, USA, May 2018, pp. 1–6.
- [48] G. Ding *et al.*, "An amateur drone surveillance system based on the cognitive Internet of Things," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 29–35, Jan. 2018.
- [49] B. Li, Z. Fei and Y. Zhang, "UAV Communications for 5G and Beyond: Recent Advances and Future Trends," in *IEEE Network*, Apr. 2019, pp. 2241-2263.

- [50] B. Li, Z. Na and B. Lin, "UAV Trajectory Planning from a Comprehensive Energy Efficiency Perspective in Harsh Environments," in *IEEE Network*, Aug.2022, vol. 36, no. 4, pp. 62-68.
- [51] D. S. Lakew, W. Na, N. -N. Dao and S. Cho, "Aerial Energy Orchestration for Heterogeneous UAV-Assisted Wireless Communications," in *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 2483-2494, June. 2022.
- [52] R. Alyassi, M. Khonji, A. Karapetyan, S. C. K. Chau, K. Elbassioni and C. M. Tseng, "Autonomous Recharging and Flight Mission Planning for Battery Operated Autonomous Drones," in *IEEE, Transactions on Automation Science and Engineering*, Apr. 2023, vol. 20, no. 2, pp. 1034-1046.
- [53] C. Zhu, X. Liang, L. He and L. Liu, "Demonstration and verification system for UAV formation control," 2017 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE), Aug.2017, pp. 56-60.
- [54] Blom, John David. *Unmanned Aerial Systems: A Historical Perspective*. (Washington D.C.: Combat Studies Institute Press, 2010).
- [55] V. Chamola, P. Kotes, A. Agarwal, N. Gupta, M. Guizani, "A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques," *Sciencedirect*, Aug. 2020.
- [56] J. Hernandez, "A Military Drone With A Mind Of Its Own Was Used In Combat, U.N. Says," *NPR*, Jun. 2021. [Online]. Available: <https://www.npr.org>.
- [57] E. Sitaria, "Unmanned Systems Development, Research and Integration," *UAVOS*, Jun.2024 [Online]. Available: <https://www.uavos.com>.
- [58] Fly Dragon "VTOL and Fixed-wing," Mar. 2024. Online. [Online]. Available: <http://www.dronefromchina.com/product/FDGC04-Fixedwing>.
- [59] DJI, "Support for Matrice 100," *DJI*. [Online]. Available: <https://www.dji.com/gr/support/product/matrice100>.
- [60] Peciak, M.; Skarka, W.; Mateja, K.; Gude, M. "Impact Analysis of Solar Cells on Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Fixed-Wing UAV," *Mdpi*, Mar.2023.
- [61] Motor, "Determining electric motor load and efficiency," U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, Jan.2023. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/10097517.pdf>.
- [62] K.-H. Chang and S.-K. Hung, "Design and implementation of a tether-powered hexacopter for long endurance missions," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 24, p. 11887, 2021.
- [63] I. Epazz, "Everything You Need to Know About Fixed Wing Drones," *ZenaDrone Homepage*, May.2023. [Online]. Available: <https://www.zenadrone.com>.
- [64] The Corona, "What Are Hybrid Fixed-Wing/VTOL Drones (UAVs)?", n.d. [Online]. Available: <https://www.thecoronawire.com/what-hybrid-fixed-wing-vtol-drones-uavs>.
- [65] Up-Caelivia "KUR-1000 | UP Caeli via,". [Online]. Available: <https://www.up-caelivia.it>.
- [66] ITU-R Resolution 145 (Rev.WRC-19), "Use of the frequency band 27.9-28.2 GHz by high-altitude platform stations in the fixed service," Sharm el-Sheikh, 2019.
- [67] D. Yuniarti, "Regulatory challenges of broadband communication services from High Altitude Platforms (HAPs)," 2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), Marc. 2018, pp. 919-922.

- [68] F. A. Dicandia, N. J. G. Fonseca, M. Bacco, S. Mugnaini, and S. Genovesi, "Space-air-ground integrated 6G wireless communication networks: A review of antenna technologies and application scenarios," *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3136, Apr. 2022.
- [69] A. Traspadini, M. Giordani, G. Giambene and M. Zorzi, "Real-Time HAP-Assisted Vehicular Edge Computing for Rural Areas," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 12, no. 4, pp. 674-678, April 2023, doi: 10.1109/LWC.2023.3238851.
- [70] Y. Zeng, R. Zhang and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, May 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.7470933.
- [71] M. Manikandan, E. Vaidya and Rajkumar S. Pant, "Design and analysis of hybrid electric multi-lobed airship for cargo transportation," *ScienceDirect*, June. 2022.
- [72] Wikipedia, "Στρατόσφαιρα," <https://el.wikipedia.org/wiki>.
- [73] Kozera, Cyprian. "Military use of unmanned aerial vehicles – a historical study." *Safety & Defense* (2018): 17-21. doi:10.37105/sd.
- [74] X, the moonshot factory, "Loon - X, the moonshot factory," X, the moonshot factory, 2020. [Online]. Available: <https://x.company/projects/loon/>.
- [75] Wikipedia, "Airbus Zephyr," Apr. 2023 [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus\\_Zephyr](https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_Zephyr).
- [76] Zephyr, "Zephyr The first stratospheric UAS of its kind," Zephyr, Airbus, Apr. 2023 [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/uas-solutions/zephyr>.
- [77] P. Skalski, "Design and Energy Systems of Stratospheric Airships," 2021 IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Naples, Italy, 2021, pp. 13-18, doi: 10.1109/MetroAeroSpace51421.2021.9511752.
- [78] E. Adorni, A. Rozhok, R. Revetria and S. Suhev, "Conceptual Design of the Emergency Energy Supply System for a New Generation of Airships," 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/REEPE53907.2022.9731406.
- [79] The Lyncean Group of San Diego, "Modern Airships – Part 1," *Lynceans*, Apr.2024 [Online]. Available:<https://lynceans.org>.
- [80] E. Adorni, A. Rozhok, R. Revetria and S. Suhev, "Conceptual Design of the Emergency Energy Supply System for a New Generation of Airships," 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/REEPE53907.2022.9731406.
- [81] W. Abderrahim, O. Amin and B. Shihada, "How to Leverage High Altitude Platforms in Green Computing?," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 7, pp. 134-140, July 2023, doi: 10.1109/MCOM.001.2200732.
- [82] E. Adorni, A. Rozhok, R. Revetria and S. Suhev, "Conceptual Design of the Emergency Energy Supply System for a New Generation of Airships," 2022 4th International Youth Conference on Radio

Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/REEPE53907.2022.9731406.

[83] J. Qiu, D. Grace, G. Ding, M. D. Zakaria and Q. Wu, "Air-Ground Heterogeneous Networks for 5G and Beyond via Integrating High and Low Altitude Platforms," in IEEE Wireless Communications, vol. 26, no. 6, pp. 140-148, December 2019, doi: 10.1109/MWC.0001.1800575.

[84] Share My Lesson, "The Aeronauts Lesson for Middle School: Hot Air Balloon Engineering Design Challenge," November 13, 2019. [Online]. Available: <https://sharemylesson.com>. April 30, 2024.

[85] AeroExpo, "Scientific Project: Gas Balloon," Online. [Online]. Available: <https://www.aeroexpo.online>.

[86] Airforce Technology, "Zephyr S High-Altitude Pseudo-Satellite (HAPS) - Airforce Technology," January 6, 2021. [Online]. Available: <https://www.airforce-technology.com>.

[87] Maguire, Y., & Waclawicz, K. "Aquila: What's next for high-altitude connectivity?" Engineering at Meta, June.2018. [Online]. Available: <https://engineering.fb.com>.

[88] Thales Group, "What's up with Stratobus?," March 17, 2017. [Online]. Available: <https://www.thalesgroup.com>.

[89] Dickerson, K. "High-Tech Airships Could Be NASA's Next Challenge," Space.com, Dec.2014. [Online]. Available: <https://www.space.com/28132-nasa-airship-challenge.html>.

[90] Z. Li, L. Zhao, Y. Liu, X. Chen, H. Chen, F. Zheng, Y. Zhang, D. Wang, J. Li, J. Liu, and S. Liu, "Autonomous mission planning method for optical imaging satellites based on real-time cloud cover information," Remote Sens., vol. 14, no. 11, p. 2635, May 2022, doi: 10.3390/rs14112635.

[91] T. K. Rodrigues and N. Kato, "Hybrid Centralized and Distributed Learning for MEC-Equipped Satellite 6G Networks," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 41, no. 4, pp. 1201-1211, April 2023, doi: 10.1109/JSAC.2023.3242700.

[92] C. Li, Y. Zhang, R. Xie, X. Hao and T. Huang, "Integrating Edge Computing into Low Earth Orbit Satellite Networks: Architecture and Prototype," in IEEE Access, Mar.2021 vol. 9, pp. 39126-39137, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3064397.

[93] J. Ssimbwa, B. Lim, J-H. Lee, and Ko Y-C. A survey on robust modulation requirements for the next generation personal satellite communications. Frontiers Communications Networks, 3:1–19, 2022.

[94] G. Karabulut Kurt et al., "A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 2, pp. 729-779, Secondquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3066905.

[95] M. A. Khan et al., "Swarm of UAVs for Network Management in 6G: A Technical Review," in IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 20, no. 1, pp. 741-761, March 2023, doi: 10.1109/TNSM.2022.3213370.

[96] M. A. Salas-Natera, G. L. Maceín and R. M. Rodriguez-Osorio, "On the design of HAPs High Throughput and flexible 5G Communication Payloads," 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Madrid, Spain, 2022, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9769360.

[97] Frontex, "Research study on High-Altitude Pseudo-Satellites," 2023 HAPS Market Report.

- [98] R. Stuhlfauth, "5G NTN Takes Flight: Technical Overview of 5G Non-Terrestrial Networks," White Paper, Rohde & Schwarz, Munich, Germany, 2022.
- [99] GSMA, "5G mmWave Deployment Best Practices Whitepaper," Nov.2022.
- [100] H. M. Hussien et al., "Bridging the urban-rural broadband connectivity gap using 5G enabled HAPs communication exploiting TVWS spectrum," JENRS, vol. 1, no. 1, pp. 24–32, 2022, doi: 10.55708/js0102003.
- [101] F. A. Almalki, "Comparative and QoS Performance Analysis of Terrestrial-aerial Platforms-satellites Systems for Temporary Events", International Journal of Computer Networks & Communications, vol. 11, no. 6, pp. 111-133, 2019.
- [102] Steel in the Air, "5G Cell Towers in 2023: Top Questions Answered," Jun.2023. [Online]. Available: <https://www.steelintheair.com>.
- [103] Janes, "Thai Navy Orders Hermes 900 UAVs," Sep.2022. [Online]. Available: <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/thai-navy-orders-hermes-900-uavs>.
- [104] J. Pelton, "High altitude platform systems (HAPS) and unmanned aerial vehicles (UAV) as an alternative to small satellites," in Handbook of Small Satellites: Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation. Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 1–16.
- [105] WarriorLodge, "AAI RQ-7 Shadow," Mar.2024. [Online]. Available: <https://warriorlodge.com/pages/aai-rq7-shadow>.
- [106] C. C. González, S. Pizzi, M. Murrioni, and G. Araniti, "Multicasting over 6G non-terrestrial networks: A softwarization-based approach," IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 18, no. 1, pp. 91–99, Mar. 2023, doi:10.1109/MVT.2022.3232919.
- [107] ITU-R P.525-2, "Calculation of Free-Space Attenuation," tech. rep., ITU-R, Aug.1994.
- [108] ITU-R P.838-3, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," tech. rep., ITUR, Mar.2005.
- [109] ITU-R P.837-7, "Characteristics of precipitation for propagation modelling," tech. rep., ITU-R, Jul.2017.
- [110] E. Regonesi, L. Luini and C. Riva, "Limitations of the ITU-R P.838-3 model for rain specific attenuation," 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, pp. 1-4.
- [111] ITU-R P.618-14, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems," tech. rep., ITU-R, Aug.2023.
- [112] ITU-R P.676-10, "Attenuation by atmospheric gases," tech. rep., ITU-R, Sep.2013.
- [113] Δ.Βουγιούκας, "Δορυφορικές Τροχιές," Ελλάδα (Copyright © ΣΕΑΒ), 2015, ISBN: 978-960-603-284-4, pp 57-108, Mar.2024.
- [114] Libretexts, "Gravity and Orbits," Physics LibreTexts, Mar.2023.
- [115] Δ. Μάργαρης, "Οι παγκόσμιοι χάρτες του σχολείου είναι λάθος!," Υλικό Φυσικής – Χημείας, 24 Apr. 2023. [Online]. Available: Διαθέσιμο: <https://ylikonet.gr>.
- [116] Elbit Systems - Istar, "Hermes 900 Maritime Patrol UAS" Datasheet.

- [117] I. Leyva-Mayorga et al., "LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 184955-184964, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029620.
- [118] C. F. Campbell, A. Balistreri, M. -Y. Kao, D. C. Dumka and J. Hitt, "GaN Takes the Lead," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 13, no. 6, pp. 44-53, Sept.-Oct. 2012, doi: 10.1109/MMM.2012.2205829.
- [119] Committed to connecting the world, "HAPS – High-altitude platform systems", April.2022.[Online]. Available: <https://www.itu.int>.
- [120] R. Stuhlfauth, "5G NTN Takes Flight: Technical Overview of 5G Non-Terrestrial Networks," White Paper, Rohde & Schwarz, Munich, Germany, 2022.
- [121] GSMA, "5G mmWave Deployment Best Practices," Nov.2020.
- [122] I. Leyva-Mayorga et al., "LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 184955-184964, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029620.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ

Απόσπασμα του κώδικα για την δημιουργία των αποτελεσμάτων.

```
% 0.1 Gbps/m^2--> 5G
```

```
% 1 Gbps/m^2 --> 6G
```

```
Area_Traffic_Capacity_all=0.1*10^9:0.1*10^9:1*10^9; %bps/m^2-->
```

```
Total_data_rate_min=0.05*1e9; % min actual needed, 0.05 Gbps/m^2
```

```
area_traffic_points=length(Area_Traffic_Capacity_all);
```

```
Studied_area=50*1e3; %m^2 (pi*126^2) % the surface we want to cover, radius  
r=126m
```

```
Studied_area_big_scale=10*1e6:10*1e6:100*1e6; %m^2 radius 100 km^2  
(pi*5641.9^2) r=5641.9 m
```

```
c=3*10^8;
```

```
availability=99.999;
```

```
k_Boltz=physconst('Boltzmann');
```

```
R_a=28.31; %mm\h
```

```
Ph=101.325e3; %hPa, temperature of 15? C
```

```
T_C=20;
```

```
T=T_C+273.15; %Kelvin
```

```
% T(K) = T(?C) + 273.15
```

```
ro=7.5; %g/m^3, water vapour concentration
```

```
lwd=0.5; %g/m^3, cloud liquid water density
```

```
tau=0; % polarization tilt angle relative to horizontal
```

```
% 45 deg for circular polarization [degree]
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% sollution only gNBs %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
cost_gNB=168*1e3;
```

```
coverage_gNB=500; %m
```

```
coverage_gNB_km=coverage_gNB/1000;
```

```
P_idle_gNB=[145,130];
```

```
Delta_p_AN_gNB=[4.2,4.7];
```

```
P_gNB=[46,43]; %dBm,
```

```
P_gNB_max_W=[(10^(P_gNB(1)/10))/1000,(10^(P_gNB(2)/10))/1000];
```

```
NF_gNB=[1.5,4.5]; %dB
```

```

GTx_dBi=[32,36];
GRx_dBi=[24,28]; %
L_cable_Rx=[1,2]; %dB
L_cable_Tx=[1,2]; %dB
N_TRX_AN_gNB=[128,256];
N_ant_Tx=[128,256];
N_ant_Rx=[64,128];
% FR1 (3.5 GHz, BW 50-100 MHz), FR2 (30 GHz, BW 100-1000 MHz)
f_gNB_Hz=[3.5*1e9,30*1e9]; %Hz
f_gNB_GHz=[f_gNB_Hz(1)/10^9,f_gNB_Hz(2)/10^9]; %GHz
BW_Hz_gNB=[100*10^6:30*10^6:400*10^6; 500*10^6:150*10^6:2000*10^6]; %Hz
BW_MHz_gNB=BW_Hz_gNB./1e6; %MHz
hT_gNB_m=25; %m, height of the transmitting antenna
hR_gNB_m=1.5; %m, height of the receiving antenna UE
Elevation_angle_gNB=height2e1(hT_gNB_m,hR_gNB_m,coverage_gNB); % trans,
receiv, R
real_coverage_gNB_km=coverage_gNB_km/cosd(Elevation_angle_gNB);
Nth_dBm=zeros(length(f_gNB_Hz),length(BW_Hz_gNB));
[SE, SNR_dB_min, SNR_min_W, max_capacity_gNB,
max_capacity_Gbps]=deal(Nth_dBm);
N_gNB=zeros(length(Area_Traffic_Capacity_all),length(f_gNB_Hz),length(BW_Hz
_gNB));
[EE_max_gNB, N_gNB_cover, P_gNB_max, P_gNB_max_cover, Euro_gNB,
Euro_gNB_cover,N_gNB_Area_cover,CE_max_gNB_pbs,CE_max_gNB_tot]=deal(N_gNB);
for fr=1:length(f_gNB_Hz)

    L_fsp1_gNB=fspl(real_coverage_gNB_km*1e3,physconst('LightSpeed')./(f_gNB
    B_GHz(fr)*1e9)); %dB

    L_rain_gNB=rainpl(real_coverage_gNB_km*1e3, f_gNB_GHz(fr)*1e9, R_a,
    Elevation_angle_gNB, tau); %dB

    L_gas_gNB=gaspl(real_coverage_gNB_km*1e3, f_gNB_GHz(fr)*1e9, T, Ph,
    ro); %dB

    if f_gNB_GHz(fr)<10
        L_fog_gNB=0;
    else

```

```

L_fog_gNb=fogpl(real_coverage_gNb_km*1e3, f_gNB_GHz(fr)*1e9, T, lwd);
%dB, needs more than 10 GHz freq
end

Lp_dB=L_fsp1_gNB+L_rain_gNB+L_gas_gNB+L_fog_gNb; %dB
for pp=1:length(BW_Hz_gNB)
    Nth_dBm(fr,pp)=10*log10(k_Boltz.*BW_Hz_gNB(fr,pp).*T);
    SNR_dB_min(fr,pp)=P_gNB(fr) + GTx_dBi(fr) - L_cable_Tx(fr) - Lp_dB +
    GRx_dBi(fr) - L_cable_Rx(fr) - Nth_dBm(fr,pp) - NF_gNB(fr);
    SNR_min_W(fr,pp)= 10^(SNR_dB_min(fr,pp)/10);
    SE(fr,pp)=min(N_ant_Tx(fr),N_ant_Rx(fr))*log2(1+(N_ant_Rx(fr)/min(N_a
    nt_Tx(fr), N_ant_Rx(fr)))*SNR_min_W(fr,pp));

    P_gNB_max_Watt=(N_TRX_AN_gNB(fr)*P_idle_gNB(fr))+N_TRX_AN_gNB(fr)*De1
    ta_p_AN_gNB(fr).*P_gNB_max_W(fr);
    max_capacity_gNB(fr,pp)=SE(fr,pp).*BW_Hz_gNB(fr,pp);
    max_capacity_Gbps(fr,pp)=max_capacity_gNB(fr,pp)./10^9;
for xx=1:area_traffic_points
    N_gNB(xx,fr,pp)=ceil(max(Total_data_rate(xx)/max_capacity_gNB(fr,pp
    ),Studied_area/(pi*coverage_gNB^2)));
    N_gNB_cover(xx,fr,pp)=ceil(max(Total_data_rate_new(xx)/max_capacity
    _gNB(fr,pp),Studied_area_big_scale(xx)/(pi*coverage_gNB^2))); %
    coverage drive
    N_gNB_Area=ceil(Studied_area/(pi*coverage_gNB^2));
    N_gNB_Area_cover(xx,fr,pp)=ceil(Studied_area_big_scale(xx)/(pi*cove
    rage_gNB^2));
    EE_max_gNB(xx,fr,pp)=Total_data_rate(xx)./(N_gNB(xx,fr,pp).*P_gNB_m
    ax_Watt);
    P_gNB_max(xx,fr,pp)=N_gNB(xx,fr,pp).*P_gNB_max_Watt; %Watt
    P_gNB_max_cover(xx,fr,pp)=N_gNB_Area_cover(xx,fr,pp).*P_gNB_max_Wat
    t;
    Euro_gNB(xx,fr,pp)=N_gNB(xx,fr,pp)*cost_gNB;
    Euro_gNB_cover(xx,fr,pp)=N_gNB_Area_cover(xx,fr,pp)*cost_gNB;
    CE_max_gNB_pbs(xx,fr,pp)=max_capacity_gNB(fr,pp)/cost_gNB;
    CE_max_gNB_tot(xx,fr,pp)=Total_data_rate(xx)./Euro_gNB(xx,fr,pp);
end
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%% sollution only Small Cells %%%%%%%%%%%%%%%
cost_SC=30*1e3; %EUR/station
coverage_SC=100; %m
coverage_km_SC=coverage_SC/1000;
Delta_p_AN_SC=[4,4.5];
P_idle_SC=[6.8,6];
P_max_SC=[38,36]; %dBm
P_SC_W_max=[(10^(P_max_SC(1)/10))/1000,(10^(P_max_SC(2)/10))/1000];
NF_SC=[2,4];
GTx_SC=[26,32];
GRx_SC=[20,24];
L_cable_Rx_SC=[0.5,0.5]; %dB
L_cable_Tx_SC=[0.5,0.5]; %dB
N_TRX_AN_SC=[32,64];
N_ant_Tx_SC=[32,64];
N_ant_Rx_SC=[16,32];
f_SC=[5*10^9,28*10^9];
f_GHz_SC=[f_SC(1)/10^9,f_SC(2)/10^9];
BW_Hz_SC=[100*10^6:50*10^6:600*10^6; 500*10^6:150*10^6:2000*10^6]; %Hz
BW_MHz_SC=BW_Hz_SC./1e6; %MHz
hT_SC_m=10; %m, height of the transmitting antenna
hR_SC_m=1.5; %m, height of the receving antenna UE
Elevation_angle_SC=height2el(hT_SC_m,hR_SC_m,coverage_SC);
real_coverage_SC_km=coverage_km_SC/cos(Elevation_angle_SC);
Nth_dBm_SC=zeros(length(f_SC),length(BW_Hz_SC));
[SNR_dB_min_SC, SNR_dB_min_W_SC, SE_SC,max_capacity_SC,
max_capacity_Gbps_SC]=deal(Nth_dBm_SC);
N_SC=zeros(area_traffic_points,length(f_SC),length(BW_Hz_SC));
[EE_max_SC, N_SC_cover, P_SC_max, P_SC_max_cover, Euro_SC, Euro_SC_cover,
N_SC_Area_cover, CE_max_SC_pbs, CE_max_SC_tot]=deal(N_SC);
for fr=1:length(f_SC)

P_SC_max_Watt=(N_TRX_AN_SC(fr)*P_idle_SC(fr))+N_TRX_AN_SC(fr)*Delta_p_AN_SC
(fr).*P_SC_W_max(fr);

```

```

L_fspl_SC=fspl(real_coverage_SC_k*1e3,physconst('LightSpeed')./(f_GHz_SC(fr)*1e9)); %dB
L_rain_SC=rainpl(real_coverage_SC_k*1e3, f_GHz_SC(fr)*1e9, R_a,
Elevation_angle_SC, tau); %dB
L_gas_SC=gaspl(real_coverage_SC_k*1e3, f_GHz_SC(fr)*1e9, T, Ph, ro); %dB
    if f_GHz_SC(fr)<10
        L_fog_SC=0;
    else
        L_fog_SC=fogpl(real_coverage_SC_k*1e3, f_GHz_SC(fr)*1e9, T, lwd);
    end

    Lp_dB_SC=L_fspl_SC+L_rain_SC+L_gas_SC+L_fog_SC; %dB
for aa=1:length(BW_Hz_SC)
    Nth_dBm_SC(fr,aa)=10*log10(k_Boltz*BW_Hz_SC(fr,aa)*T);
    SNR_dB_min_SC(fr,aa)=P_max_SC(fr) + GTx_SC(fr) - L_cable_Tx_SC(fr)
    - Lp_dB_SC + GRx_SC(fr) - L_cable_Rx_SC(fr) - Nth_dBm_SC(fr,aa) -
    NF_SC(fr);
    SNR_dB_min_W_SC(fr,aa)=10^(SNR_dB_min_SC(fr,aa)/10);

    SE_SC(fr,aa)=(min(N_ant_Tx_SC(fr),N_ant_Rx_SC(fr))*log2(1+(N_ant_Rx_SC(fr)*SNR_dB_min_W_SC(fr,aa))/min(N_ant_Tx_SC(fr),N_ant_Rx_SC(fr)))));
    max_capacity_SC(fr,aa)=SE_SC(fr,aa).*BW_Hz_SC(fr,aa);
    max_capacity_Gbps_SC(fr,aa)=max_capacity_SC(fr,aa)/10^9;
    for xx=1:area_traffic_points

        N_SC(xx,fr,aa)=ceil(max(Total_data_rate(xx)/max_capacity_SC(fr,aa),
        Studied_area/(pi*coverage_SC^2)));

        N_SC_cover(xx,fr,aa)=ceil(max(Total_data_rate_new(xx)/max_capacity_SC(fr,aa),Studied_area_big_scale(xx)/(pi*coverage_SC^2))); %
        coverage driven
        N_SC_Area=ceil(Studied_area/(pi*coverage_SC^2));

        N_SC_Area_cover(xx,fr,aa)=ceil(Studied_area_big_scale(xx)/(pi*coverage_SC^2));

```

```

EE_max_SC(xx,fr,aa)=Total_data_rate(xx)./(N_SC(xx,fr,aa).*P_SC_max_
Watt);
P_SC_max(xx,fr,aa)=N_SC(xx,fr,aa).*P_SC_max_Watt; % Watt
P_SC_max_cover(xx,fr,aa)=N_SC_Area_cover(xx,fr,aa).*P_SC_max_Watt;
Euro_SC(xx,fr,aa)=N_SC(xx,fr,aa)*cost_SC;
Euro_SC_cover(xx,fr,aa)=N_SC_Area_cover(xx,fr,aa)*cost_SC;

```

**Cost Efficiency per BS (bps/EUR/year)**

```

CE_max_SC_pbs(xx,fr,aa)=max_capacity_SC(fr,aa)/cost_SC;
end
end
end

```

%% solution only UAVs %%%

Coordinates of UAV

```

lat_UAV=40.63;
lon_UAV=22.94;
alt_UAV=10; %km
lat_user_UAV_max=[40.66, 40.63];
lon_user_UAV_max=[22.98, 22.95];
alt_user_UAV_max=1.5;
cost_UAV=200*1e3;
coverage_UAV=1000;
coverage_km_UAV=coverage_UAV/1000;
Delta_p_AN_UAV=[4,4.5];
P_idle_UAV=[2,1.5];
P_max_UAV=[32,28]; %dBm
P_UAV_W_max=[(10^(P_max_UAV(1)/10))/1000,(10^(P_max_UAV(2)/10))/1000];
NF_UAV=[2,4];
GTx_UAV=[26,32]; %dBi
GRx_UAV=[20,24]; %dBi
L_cable_Rx_UAV=[0.5,0.5]; %dB
L_cable_Tx_UAV=[0.5,0.5]; %dB

```

```

N_TRX_AN_UAV=[16,32];
N_ant_Tx_UAV=[16,32];
N_ant_Rx_UAV=[16,32];
f_UAV=[5*10^9,28*10^9];
f_GHz_UAV=[f_UAV(1)/10^9,f_UAV(2)/10^9];
BW_Hz_UAV=[100*10^6:50*10^6:600*10^6; 500*10^6:150*10^6:2000*10^6]; %Hz
BW_MHz_UAV=BW_Hz_UAV./1e6; %MHz
R_link_km=satcom.internal.linkbudgetApp.computeDistance(lat_user_UAV_max(2)
, lon_user_UAV_max(2), alt_user_UAV_max, lat_UAV, lon_UAV, alt_UAV*1e3);
%km
Elevation_angle_UAV=satcom.internal.linkbudgetApp.computeElevation(lat_user
_UAV_max(2), lon_user_UAV_max(2), alt_user_UAV_max, lat_UAV, lon_UAV,
alt_UAV*1e3);
real_coverage_UAV_km=coverage_km_UAV/cos(Elevation_angle_UAV);
Nth_dBm_UAV=zeros(length(f_UAV),length(BW_Hz_UAV));
[SNR_dB_min_UAV,SNR_dB_min_W_UAV,SE_UAV,max_capacity_UAV,max_capacity_Gbps_
UAV]=deal(Nth_dBm_UAV);
N_UAVs=zeros(area_traffic_points,length(f_UAV),length(BW_Hz_UAV));
[EE_max_UAV, N_UAV_cover, P_UAV_max, P_UAV_max_cover, Euro_UAV,
Euro_UAV_cover, N_UAV_Area_cover, CE_max_UAV_pbs,
CE_max_UAV_tot]=deal(N_UAVs);
for fr=1:length(f_UAV)

    L_fsp1_dB_UAV=fsp1(R_link_km*1e3,physconst('LightSpeed')./(f_GHz_UAV(fr)
*1e9)); %dB

    atmospheric_attenuation_UAV_dB=satcom.internal.linkbudgetApp.computeTo
talAtmLosses(availability, lat_user_UAV_max(1), lon_user_UAV_max(1),
alt_user_UAV_max, f_GHz_UAV(fr), Elevation_angle_UAV, GTx_UAV(fr));
    Lp_dB_UAV=L_fsp1_dB_UAV+atmospheric_attenuation_UAV_dB;
for bw=1:length(BW_Hz_UAV)
    Nth_dBm_UAV(fr,bw)=10*log10(k_Boltz*BW_Hz_UAV(fr,bw)*T);
        SNR_dB_min_UAV(fr,bw)=P_max_UAV(fr) + GTx_UAV(fr) -
        L_cable_Tx_UAV(fr) - Lp_dB_UAV + GRx_UAV(fr) - L_cable_Rx_UAV(fr) -
        Nth_dBm_UAV(bw) - NF_UAV(fr);
        SNR_dB_min_W_UAV(fr,bw)=10^(SNR_dB_min_UAV(fr,bw)/10);

```

```

SE_UAV(fr,bw)=(min(N_ant_Tx_UAV(fr),N_ant_Rx_UAV(fr))*log2(1+(N_ant
_Rx_UAV(fr)*SNR_dB_min_W_UAV(fr,bw))/min(N_ant_Tx_UAV(fr),N_ant_Rx_
UAV(fr))));

P_UAV_max_Watt=(N_TRX_AN_UAV(fr)*P_idle_UAV(fr))+N_TRX_AN_UAV(fr)*D
elta_p_AN_UAV(fr)*P_UAV_W_max(fr);
max_capacity_UAV(fr,bw)=SE_UAV(fr,bw).*BW_Hz_UAV(fr,bw);
max_capacity_Gbps_UAV(fr,bw)=max_capacity_UAV(fr,bw)/10^9;
for xx=1:area_traffic_points

N_UAVs(xx,fr,bw)=ceil(max(Total_data_rate(xx)/max_capacity_UAV(fr,b
w),Studied_area/(pi*coverage_UAV^2)));

N_UAV_cover(xx,fr,bw)=ceil(max(Total_data_rate_new(xx)/max_capacity
_UAV(fr,aa),Studied_area_big_scale(xx)/(pi*coverage_UAV^2))); %
coverage driven
N_UAV_Area=ceil(Studied_area/(pi*coverage_UAV^2));

N_UAV_Area_cover(xx,fr,bw)=ceil(Studied_area_big_scale(xx)/(pi*cove
rage_UAV^2));

EE_max_UAV(xx,fr,bw)=Total_data_rate(xx)./(N_UAVs(xx,fr,bw).*P_UAV_
max_Watt);
P_UAV_max(xx,fr,bw)=N_UAVs(xx,fr,bw).*P_UAV_max_Watt; %Watt

P_UAV_max_cover(xx,fr,bw)=N_UAV_Area_cover(xx,fr,bw).*P_UAV_max_Wat
t;
Euro_UAV(xx,fr,bw)=2*N_UAVs(xx,fr,bw)*cost_UAV;
Euro_UAV_cover(xx,fr,bw)=2*N_UAV_Area_cover(xx,fr,bw)*cost_UAV;
CE_max_UAV_pbs(xx,fr,bw)=max_capacity_UAV(fr,aa)/cost_UAV; % cost
eff per base station

    end
end
end

```

```

%%%%%%%%%% solution only LEO %%%%%%%%%%%
%%% Coordinates of LEO
lat_LEO=40.57;
lon_LEO=22.56;
alt_LEO=600;
%%% Coordinates of the furthest point within coverage
lat_user_max_LEO=[41.25, 40.58]; %20km %10km
lon_user_max_LEO=[22.48, 23.08];
alt_user_max=1.5;
freq_GHz_LEO=[20, 28]; %GHz %%% 28, 36
BW_Hz_LEO_all=[500*10^6:50*10^6:1000*10^6; 500*10^6:50*10^6:1000*10^6]; %
100-400
BW_MHz_LEO=BW_Hz_LEO_all./1e6;
cost_LEO=155*1e3; %EUR/station, if 150 kg per sat, if 1000 kg per sat -->
750k TCO
coverage_LEO_all=[20*10^3, 10*10^3]; % sel 27 pinaka
Delta_p_all_LEO=[1, 1];
P_idle_all_LEO=[1, 0.5];
NF_LEO=[7,9];
GTx_LEO_all=[38.5, 42];
GRx_LEO_all=[24, 32]; %
L_cable_Rx_LEO=[0.5,0.5]; %dB
L_cable_Tx_LEO=[0.5,0.5]; %dB
NTX_LEO_all=[128, 256]; %
N_ant_TX_LEO_all=[128, 256];
N_ant_RX_LEO_all=[64, 128];
R_gt_UE_LEO=[10, 15];
elev_angle_LEO=zeros(1, length(freq_GHz_LEO));
[R_link_km_LEO, rain_attenuation_dB_LEO, atmospheric_attenuation_dB_LEO,
PL_free_LEO,Lp_dB_LEO, Az_LEO, Azz_LEO,
L_az,N_LEO_Area]=deal(elev_angle_LEO);
SNR_AN_max_LEO=zeros(length(freq_GHz_LEO),length(BW_Hz_LEO_all) );
[CN0_LEO, SNR_AN_max_Watt_LEO, a_L_AN_W, a_L_AN, max_AN_cap_Gbps_LEO,
max_CN0_cap_Gbps,max_capacity_LEO_CN0_bps, max_capacity_LEO, SNR_LEO,
SNR_Watt_LEO, SE_LEO]=deal(SNR_AN_max_LEO);
P_AN_max_dBW=zeros(length(BW_Hz_LEO_all),length(freq_GHz_LEO));

```

```

[P_LEO_max_Watt, P_max_LEO_W, P_max_LEO_dBm]=deal(P_AN_max_dBW);
N_LEO=zeros(length(freq_GHz_LEO),length(BW_Hz_LEO_all),area_traffic_points;
[EE_max_LEO, N_LEO_cover, P_LEO_max, P_LEO_max_cover, Euro_LEO,
Euro_LEO_cover, N_LEO_Area_cover, CE_max_LEO_pbs,
CE_max_LEO_tot]=deal(N_LEO);
EIRP_actual_dBW=zeros(length(freq_GHz_LEO),length(BW_Hz_LEO_all));
[EIRP_actual_W, BW_Hz_LEO_all_MHz, Nth_dBm_LEO]=deal(EIRP_actual_dBW);
for mm=1:length(freq_GHz_LEO)
    L_az(mm)=lon_user_max_LEO(mm)-lon_LEO;
    Azz_LEO(mm)=atan(abs(L_az(mm)))./sind(lat_user_max_LEO(mm));
    Az_LEO(mm)=azimuth(lat_LEO, lon_LEO, lat_user_max_LEO(mm),
lon_user_max_LEO(mm));

R_link_km_LEO(mm)=satcom.internal.linkbudgetApp.computeDistance(lat_user_max_LEO(mm), lon_user_max_LEO(mm), alt_user_max, lat_LEO, lon_LEO, alt_LEO*1e3); %km,
elev_angle_LEO(mm)=satcom.internal.linkbudgetApp.computeElevation(lat_user_max_LEO(mm), lon_user_max_LEO(mm), alt_user_max, lat_LEO, lon_LEO, alt_LEO*1e3);
rain_attenuation_dB_LEO(mm)=satcom.internal.linkbudgetApp.computeRainAttenuation(availability, lat_user_max_LEO(mm), lon_user_max_LEO(mm), alt_user_max, freq_GHz_LEO(mm), elev_angle_LEO(mm), GTX_LEO_all(mm));

atmospheric_attenuation_dB_LEO(mm)=satcom.internal.linkbudgetApp.computeTotalAtmLosses(availability, lat_user_max_LEO(mm), lon_user_max_LEO(mm), alt_user_max, freq_GHz_LEO(mm), elev_angle_LEO(mm), GTX_LEO_all(mm));

PL_free_LEO(mm)=fspl(R_link_km_LEO(mm)*10^3,(physconst('LightSpeed')./(freq_GHz_LEO(mm)*10^9)));

Lp_dB_LEO(mm)=PL_free_LEO(mm)+atmospheric_attenuation_dB_LEO(mm)+rain_attenuation_dB_LEO(mm)
;
for mbb=1:length(BW_Hz_LEO_all)

    BW_Hz_LEO_all_MHz(mm,mbb)=BW_Hz_LEO_all(mm,mbb)./10^6;
    EIRP_actual_dBW_MHz=4;
    EIRP_actual_W_MHz=(10^(EIRP_actual_dBW_MHz/10)); %W/MHz

```

```

EIRP_actual_W(mm,mbb)=EIRP_actual_W_MHz*BW_Hz_LEO_all_MHz(mm,mbb);
    %dBW
EIRP_actual_dBW(mm,mbb)=10*log(EIRP_actual_W(mm,mbb));
P_AN_max_dBW(mbb,mm)=EIRP_actual_dBW(mm,mbb)+L_cable_Tx_LEO(mm)-GTx_LEO_all(mm); %dBW
P_max_LEO_W(mbb,mm)=(10^(P_AN_max_dBW(mbb,mm)/10));
P_max_LEO_dBm(mbb,mm)=P_AN_max_dBW(mbb,mm)+30;

CN0_LEO(mm,mbb)=EIRP_actual_dBW(mm,mbb)-10*log10(k_Boltz)+R_gt_UE_LEO(mm)-Lp_dB_LEO(mm);
SNR_LEO(mm,mbb)=CN0_LEO(mm,mbb)-10*log10(BW_MHz_LEO(mm,mbb))-60;
SNR_Watt_LEO(mm,mbb)=(10^(SNR_LEO(mm,mbb)/10));

NTX_LEO_all=[128, 256]; %
N_ant_TX_LEO_all=[128, 256]; %
N_ant_RX_LEO_all=[64, 128];

SE_LEO(mm,mbb)=(min(N_ant_TX_LEO_all(mm),N_ant_RX_LEO_all(mm))*log2(1+(N_ant_RX_LEO_all(mm)*SNR_Watt_LEO(mm,mbb))/min(N_ant_TX_LEO_all(mm),N_ant_RX_LEO_all(mm))));

max_AN_cap_Gbps_LEO(mm,mbb)=(SE_LEO(mm,mbb)*BW_Hz_LEO_all(mm,mbb))/10^9;
max_capacity_LEO(mm,mbb)=max_AN_cap_Gbps_LEO(mm,mbb).*10^9;

P_LEO_max_Watt(mbb,mm)=(NTX_LEO_all(mm)*P_idle_all_LEO(mm))+NTX_LEO_all(mm)*Delta_p_all_LEO(mm).*P_max_LEO_W(mbb,mm);
for xx=1:area_traffic_points

    N_LEO(mm,mbb,xx)=ceil(max(Total_data_rate(xx)./max_capacity_LEO(mm,mbb), Studied_area/(pi*(coverage_LEO_all(mm))^2)));

    N_LEO_cover(mm,mbb,xx)=ceil(max(Total_data_rate_new(xx)/max_capacity_LEO(mm,mbb),Studied_area_big_scale(xx)/(pi*coverage_LEO_all(mm)^2))); % coverage driven

    N_LEO_Area(mm)=ceil(Studied_area/(pi*(coverage_LEO_all(mm))^2));
;

```

```

N_LEO_Area_cover(mm,mbb,xx)=ceil(Studied_area_big_scale(xx)/(pi
*coverage_LEO_all(mm)^2));
P_LEO_max(mm,mbb,xx)=N_LEO(mm,mbb,xx).*P_LEO_max_Watt(mbb,mm);
% Watt

P_LEO_max_cover(mm,mbb,xx)=N_LEO_Area_cover(mm,mbb,xx).*P_LEO_m
ax_Watt(mbb,mm);
Euro_LEO(mm,mbb,xx)=N_LEO(mm,mbb,xx)*cost_LEO;

Euro_LEO_cover(mm,mbb,xx)=N_LEO_Area_cover(mm,mbb,xx)*cost_LEO;

CE_max_LEO_pbs(mm,mbb,xx)=max_capacity_LEO(mm,mbb)/cost_LEO;
end
end
end

```

%% solution only HAPS %%%

*Coordinates of HAPS*

lat\_HAPS=40.63;

lon\_HAPS=22.94;

alt\_HAPS=20; %km

%%% *Coordinates of the furthest point within coverage*

lat\_user\_max=[40.66, 40.64547599813346]; % 5km , 2km

lon\_user\_max=[22.98, 22.927670873528996];

alt\_user\_max=1.5;

freq\_GHz\_HAPS=[2.1, 28]; %GHz

BW\_Hz\_HAPS\_all=[40\*10^6:16\*10^6:200\*10^6; 500\*10^6:50\*10^6:1000\*10^6];

BW\_MHz\_HAPS=BW\_Hz\_HAPS\_all./1e6;

cost\_HAPS=500\*1e3; %EUR/station

coverage\_HAPS\_all=[5\*10^3,2\*10^3]; %m

GTx\_HAPS=[28,42]; %dBi

GRx\_HAPS=[24,36]; %dBi

P\_max\_HAPS\_all=[42, 40]; %

Delta\_p\_all\_HAPS=[2,2.5];

```

P_idle_all_HAPS=[1, 0.5];
NF_HAPS=[3,3]; %
L_cable_Rx_HAPS=[0.5,0.5]; %dB
L_cable_Tx_HAPS=[0.5,0.5]; %dB
NTxi_HAPS=[64,128];
N_ant_HAPS_Tx=[64,128];
N_ant_HAPS_Rx=[32,64];
R_gt_UE=[0,15]; %dB/K
CN0=zeros(1,length(freq_GHz_HAPS));
[elev_angle, Az_HAPS, R_link_km,rain_attenuation_dB_HAPS,
atmospheric_attenuation_dB, PL_free, P_HAPS_max_dBW,
P_max_HAPS_W,Lp_dB_HAPS, EIRP_actual, P_HAPS_max_Watt,
N_HAPS_Area]=deal(CN0);
SNR_AN_max=zeros(length(freq_GHz_HAPS), length(BW_Hz_HAPS_all) );
[SNR_AN_max_Watt, a_L_AN_W, a_L_AN, max_AN_cap_Gbps,
max_capacity_HAPS_CN0_bps, max_capacity_HAPS, SNR, SNR_Watt_HAPS,
SE_HAPS,max_capacity_HAPS_Gbps]=deal(SNR_AN_max);
N_HAPS=zeros(length(freq_GHz_HAPS),length(BW_Hz_HAPS_all),area_traffic_poin
ts);
[EE_max_HAPS, N_HAPS_cover, P_HAPS_max, P_HAPS_max_cover, Euro_HAPS,
Euro_HAPS_cover, N_HAPS_Area_cover, CE_max_HAPS_pbs,
CE_max_HAPS_tot]=deal(N_HAPS);

for ff=1:length(freq_GHz_HAPS)
    Nth_dBm_HAPS=zeros(1, length(BW_Hz_HAPS_all));
    Az_HAPS(ff)=azimuth(lat_HAPS,lon_HAPS,lat_user_max(ff),lon_user_max
(ff));

    R_link_km(ff)=satcom.internal.linkbudgetApp.computeDistance(lat_use
r_max(ff), lon_user_max(ff), alt_user_max, lat_HAPS, lon_HAPS,
alt_HAPS*1e3); %km,
    elev_angle(ff)=satcom.internal.linkbudgetApp.computeElevation(lat_u
ser_max(ff), lon_user_max(ff), alt_user_max, lat_HAPS, lon_HAPS,
alt_HAPS*1e3); %
    rain_attenuation_dB_HAPS(ff)=satcom.internal.linkbudgetApp.computeR
ainAttenuation(availability, lat_user_max(ff), lon_user_max(ff),
alt_user_max, freq_GHz_HAPS(ff), elev_angle(ff), GTx_HAPS(ff));

```

```

atmospheric_attenuation_dB(ff)=satcom.internal.linkbudgetApp.comput
eTotalAtmLosses(availability, lat_user_max(ff), lon_user_max(ff),
alt_user_max, freq_GHz_HAPS(ff), elev_angle(ff), GTx_HAPS(ff));
PL_free(ff)=fsp1(R_link_km(ff)*10^3,physconst('LightSpeed')./(freq_
GHz_HAPS(ff)*10^9));

Lp_dB_HAPS(ff)=PL_free(ff)+atmospheric_attenuation_dB(ff)+
rain_attenuation_dB_HAPS(ff);

for bb=1:length(BW_Hz_HAPS_all)

Nth_dBm_HAPS(bb)=10*log10(k_Boltz.*BW_Hz_HAPS_all(ff,bb).*T);
a_L_AN(ff,bb)=-GTx_HAPS(ff) - GRx_HAPS(ff) + Lp_dB_HAPS(ff) +
L_cable_Tx_HAPS(ff) + L_cable_Rx_HAPS(ff) + Nth_dBm_HAPS(bb) +
NF_HAPS(ff); %dBm
a_L_AN_W(ff,bb)=(10^(a_L_AN(ff,bb)/10))/1000; %W
P_max_HAPS_W(ff)=(10.^(P_max_HAPS_all(ff)/10))/1000; %W
P_HAPS_max_dBW(ff)=10*log(P_max_HAPS_W(ff)); %Watts to dBW
SNR_AN_max(ff,bb)=P_HAPS_max_dBW(ff)-a_L_AN(ff,bb);
SNR_AN_max_Watt(ff,bb)=(10^(SNR_AN_max(ff,bb)/10));
EIRP_actual(ff)=P_HAPS_max_dBW(ff)+GTx_HAPS(ff)-L_cable_Tx_HAPS(ff);
CN0(ff)=EIRP_actual(ff)-10*log10(k_Boltz)+R_gt_UE(ff)-Lp_dB_HAPS(ff);
SNR(ff,bb)=CN0(ff)-10*log10(BW_MHz_HAPS(ff,bb))-60; %dB
SNR_Watt_HAPS(ff,bb)=(10^(SNR(ff,bb)/10));
SE_HAPS(ff,bb)=(min(N_ant_HAPS_Tx(ff),N_ant_HAPS_Rx(ff))*log2(1+(N_an
t_HAP_Rx(ff)*SNR_Watt_HAPS(ff,bb))/min(N_ant_HAPS_Tx(ff),N_ant_HAPS_R
x(ff))));

max_capacity_HAPS(ff,bb)= SE_HAPS(ff,bb)*BW_Hz_HAPS_all(ff,bb);
max_capacity_HAPS_Gbps(ff,bb)=max_capacity_HAPS(ff,bb)/10^9;

P_HAPS_max_Watt(ff)=(NTxi_HAPS(ff)*P_idle_all_HAPS(ff))+NTxi_HAPS(ff)
*Delta_p_all_HAPS(ff)*P_max_HAPS_W(ff);

for xx=1:area_traffic_points

```

**Number of BSs**

```

    N_HAPS(ff,bb,xx)=ceil(max(Total_data_rate(xx)./max_capacity_HAPS(
    ff,bb), Studied_area/(pi*(coverage_HAPS_all(ff))^2)));
    N_HAPS_Area_cover(ff,bb,xx)=ceil(Studied_area_big_scale(xx)/(pi*co
    verage_HAPS_all(ff)^2));
Total Network Power consumption (kW)
    P_HAPS_max(ff,bb,xx)=N_HAPS(ff,bb,xx).*P_HAPS_max_Watt(ff); % Watt
    P_HAPS_max_cover(ff,bb,xx)=N_HAPS_Area_cover(ff,bb,xx).*P_HAPS_max
    _Watt(ff);
TCO Cost EUR Per year
    Euro_HAPS(ff,bb,xx)=N_HAPS(ff,bb,xx)*cost_HAPS;
    Euro_HAPS_cover(ff,bb,xx)=N_HAPS_Area_cover(ff,bb,xx)*cost_HAPS;
Cost Efficiency per BS (bps/EUR/year)
    CE_max_HAPS_pbs(ff,bb,xx)=max_capacity_HAPS(ff,bb)/cost_HAPS;
    end
    end
end

```