



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη επίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής
ακτινοβολίας των δικτύων επόμενης γενιάς (6G) στον
άνθρωπο.



Του φοιτητή
Κετικίδη Κωνσταντίνου
Αρ. Μητρώου: 517057

Επιβλέπουσα
Δρ. Μεσοδιακάκη Αγάπη
Έκτακτο Διδακτικό Προσωπικό

26 Μαΐου 2024

Τίτλος Π.Ε.: Μελέτη επίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας των δικτύων επόμενης γενιάς (6G) στον άνθρωπο.

Κωδικός Π.Ε.: 23114

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Κετικίδης Κωνσταντίνος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Μεσοδιακάκη Αγάπη

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε.: 23/2/2023

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε.: 19/06/2024

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 πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

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

Η έγκριση της πτυχιακής 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.

««Στην Οικογένεια μου»»

Πρόλογος

Σε μια εποχή που κυριαρχούν οι τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών καθώς παρατηρείται πανταχού παρουσία ηλεκτρονικών συσκευών, έχουν αυξηθεί ραγδαία οι ανησυχίες για τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία, ωθώντας τη διερεύνηση της έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο προσκήνιο των επιστημονικών ερευνών. Η ανάπτυξη της κινητής τεχνολογίας 5ης γενιάς (5G) πυροδότησε μια παγκόσμια αντιπαράθεση σχετικά με την ασφάλειά της (και των δικτύων τηλεπικοινωνίας γενικότερα) και έφερε στην επιφάνεια για ακόμη μια φορά τους πιθανούς κινδύνους για την υγεία που μπορεί να προκαλέσει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, συντελώντας έτσι στην εμφάνιση μιας ευρείας κοινής ανάγκης για επιστημονικό έλεγχο. Ο εμπρησμός των πύργων 5G στην Βρετανία έχει συσχετιστεί με διάφορους παράγοντες, ο επικρατέστερος των οποίων ήταν οι ανησυχίες για πιθανούς κινδύνους για την υγεία από την ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων. Παράλληλα, και πάλι λόγω του Covid-19 και της ανάγκης που δημιούργησε για κοινωνική αποστασιοποίηση και κατά συνέπεια τηλεργασία παρατηρήθηκε ραγδαία εξάπλωση της ανάγκης των τεχνολογιών τηλεπικοινωνίας. Προς αυτή την κατεύθυνση, η δομή και οι τεχνολογίες που θα απαρτίζουν την έκτη γενιά κινητής τηλεφωνίας, το 6G, έχουν ήδη αρχίσει να αναπτύσσονται. Στα πλαίσια των παραπάνω θεωρήθηκε εύλογη η μελέτη της επίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας γενικότερα, καθώς και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του 5G και συγκεκριμένα των κυμάτων χιλιοστόμετρου (mmWaves) που χρησιμοποιεί. Η εργασία θα εστιάσει στο ανερχόμενο 6G που θα περιλαμβάνει συχνότητες TerraHertz (THz) αναλύοντας επιπρόσθετα τις επιπτώσεις που μπορεί να έχουν αυτές (τόσο μέσω των σταθμών βάσης όσο και μέσω των συσκευών των χρηστών) στο ανθρώπινο σώμα, με την βοήθειά μεγεθών όπως ο ρυθμός ειδικής απορρόφησης και η πυκνότητα ισχύος. Ξετυλίγοντας την πολυπλοκότητα των συχνοτήτων THz, επιδιώκουμε όχι μόνο να βελτιώσουμε την κατανόησή μας για τους πιθανούς κινδύνους που συνδέονται με την ηλεκτρομαγνητική έκθεση, αλλά και να προσφερθούν πολύτιμες γνώσεις που μπορούν να διαμορφώσουν ρυθμιστικά πλαίσια και κατευθυντήριες γραμμές, ενισχύοντας μια αρμονική συνύπαρξη τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας και ανθρώπινης υγείας.

Περίληψη

Η επικινδυνότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπουν οι σταθμοί βάσης και τα κινητά τηλέφωνα αποτελούσαν ανέκαθεν φλέγον ζήτημα για την ανθρωπότητα. Στην παρούσα εργασία, μετά από εκτενή ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με χρήση κατάλληλων μεγεθών όπως ο ρυθμός ειδικής απορρόφησης ακτινοβολίας (SAR), της πυκνότητας ισχύος (P_D) και της απόσβεσης της ακτινοβολουμένης ισχύος, καθώς και τα χαρακτηριστικά των κεραιών, εξετάστηκε κατά πόσο θα διαφέρει ως αναφορά την επικινδυνότητα η ακτινοβολία της 6ης γενιάς σε σύγκριση με τους προκατόχους της. Με την χρήση της ακτινοβολουμένης ισχύος και της πυκνότητας ισχύος για μακρινή απόσταση (σε σενάρια κεραιών σταθμού βάσης) συμπεραίνουμε πως δεν υπάρχει κάποιος κίνδυνος από τους σταθμούς βάσης, καθώς η πυκνότητα ισχύος που λαμβάνει το ανθρώπινο σώμα ήταν πολύ χαμηλότερη από το μέγιστο επιτρεπτό όριο, εξαιτίας της μεγάλης απόσβεσης της πυκνότητας ισχύος λόγω της απόστασης. Για την μέτρηση στον κοντινό πεδίο (κινητά τηλέφωνα) αξιοποιήθηκε το SAR και το P_D . Παρόλο που το SAR δεν έχει οριοθετηθεί και δεν μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί με βεβαιότητα για μετρήσεις συχνοτήτων άνω των 10 GHz, μετρήθηκε σε όλο το αναμενόμενο φάσμα του 6G με σκοπό αξιοποίησης των μετρήσεων αυτών στο μέλλον, όταν το SAR αναπόφευκτα οριοθετηθεί για το 6G. Οι μετρήσεις του P_D για το 6G για τα κινητά τηλέφωνα, παρόλο που ήταν υψηλότερες από το 4G και το 5G, όχι μόνο ήταν κάτω από τα μέγιστα όρια αλλά ήταν και χαμηλότερα από ορισμένες προηγούμενες γενιές (2G, 3G), οι οποίες έχουν πλέον ευρέως αποδειχτεί πως είναι ασφαλείς.

Study on the effect of electromagnetic radiation of the next generation (6G) networks on humans.

KETIKIDIS KONSTANTINOS

Abstract

The threat of electromagnetic radiation that are emitted by cell towers and cellphones have always been a cause for concern for many people. In this thesis, following extensive research on the electromagnetic spectrum and utilizing models such as the Specific Absorption Rate (SAR), Power density (P_D) and emitted power damping as well as the characteristics of antennas, the difference in electromagnetic radiation emitted by 6G and previous cellular generations was calculated and compared. In far-field scenarios, P_D and Power damping were used to conclude that emissions from base stations do not pose any threat to human health, as the P_D is much lower than the upper limits, due to the high amount of damping caused by the distance of the aforementioned stations. As for the near-field communications (cell phones) both SAR and P_D were utilized. Although SAR is not yet regulated to be measured accurately in frequencies above 10 GHz yet, it will definitely be useful in the near future when such regulations are inevitably put in place. Hence, in this thesis we leveraged SAR to drive useful conclusions with the derived measurements for the THz band shown to be positive. P_D near-field results of 6G cellphones were surprising as, even though higher than 4G and 5G cellphones, they were not only much lower than the upper limit but also much lower than 3G and 2G, which have been widely accepted as safe.

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας ήταν ένα μεταμορφωτικό ταξίδι και είμαι πολύ ευγνώμων στα άτομα που συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της. Η υποστήριξή τους, η καθοδήγηση και η ενθάρρυνσή τους συνέβαλαν καθοριστικά στη διαμόρφωση αυτής της εργασίας και θα ήθελα συγκεκριμένα να εκφράσω την εγκάρδια εκτίμησή μου στους παρακάτω:

Την σύμβουλο της πτυχιακής εργασίας μου κα Μεσοδιακάκη Αγάπη η οποία με την αμέριστη υποστήριξή της, την ανεκτίμητη τεχνογνωσία και τα εποικοδομητικά σχόλια βοήθησε αλόγιστα να βγει εις πέρας αυτή η ερευνητική προσπάθεια.

Ευχαριστώ όλους τους καθηγητές μου στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων στην Θεσσαλονίκη και ιδιαίτερα τα μέλη της τριμελούς επιτροπής.

Την οικογένειά μου: Τους γονείς και την αδερφή μου, αλλά και την ευρύτερη οικογένειά μου, σας ευχαριστώ για την ακλόνητη πίστη σας σε μένα και που είστε πάντα οι πυλώνες της δύναμής μου. Η άνευ όρων αγάπη, η ενθάρρυνση και η στήριξη σας, συναισθηματικά και οικονομικά καθ'όλην την διάρκεια των σπουδών μου, ήταν η κινητήριος δύναμή μου, που με παρακίνησαν να επιμείνω ακόμα και στις πιο δύσκολες στιγμές.

Ευχαριστώ όλους τους φίλους μου για τα ανεκτίμητα φοιτητικά χρόνια που πέρασα μαζί τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανώνυμους κριτές και μελετητές των οποίων τα έργα υπήρξαν καθοδηγητικό φως στη διαμόρφωση της κατανόησής μου και στη διαμόρφωση του πλαισίου αυτής της εργασίας.

Σε όλους όσους αναφέρθηκαν παραπάνω και οποιοδήποτε άθελά μου μπορεί να ξέχασα, παρακαλώ δεχθείτε την εγκάρδια εκτίμησή μου που συμμετείχατε σε αυτό το απίστευτο ταξίδι. Οι συνεισφορές σας έκαναν αυτή την εργασία πραγματικότητα και είμαι για πάντα υπόχρεος στην υποστήριξή σας.

Ευχαριστώ.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων	x
Κατάλογος Πινάκων	xi
Συντομογραφίες	xiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Γενιές κινητής τηλεφωνίας από το 0G στο 5G	1
1.3 Κινητή τηλεφωνία έκτης γενιάς (6G)	20
1.3.1 Κριτήρια ποιότητας	25
1.3.2 Τεχνολογίες κλειδιά	26
1.3.3 Ανοικτά προβλήματα	33
1.4 Δομή πτυχιακής και μεθοδολογία	37
1.5 Επίλογος	37
2 Έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	38
2.1 Εισαγωγή	38
2.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	38
2.3 Βιβλιογραφική έρευνα και προσεγγίσεις	53
2.3.1 Ιοντίζουσες και μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες	56
2.3.2 Όρια ακτινοβολίας	58
2.4 Κριτήρια υπολογισμού έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	68
2.5 Επίλογος	75
3 Ανάλυση επίδρασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον άνθρωπο	76
3.1 Εισαγωγή	76
3.2 Συλλογή δεδομένων προσομοίωσης	76
3.2.1 Πυκνότητα ισχύος μακρινής ζώνης	76
3.2.2 Ακτινοβολούμενη ισχύς σταθμών βάσης	78
3.2.3 Υπολογισμός του SAR μέσω της απορροφούμενης ισχύος	78
3.2.4 Υπολογισμός του SAR μέσω αγωγιμότητας και πυκνότητας μάζας	79
3.2.5 Πυκνότητα ισχύος για μικρές αποστάσεις	87
3.3 Αποτελέσματα	89
3.3.1 Πυκνότητα ισχύος μακρινής ζώνης	89
3.3.2 Ακτινοβολούμενη ισχύς	93
3.3.3 Υπολογισμός του SAR μέσω της απορροφούμενης ισχύος	96
3.3.4 Υπολογισμός του SAR μέσω αγωγιμότητας και πυκνότητας μάζας	97
3.3.5 Πυκνότητα Ισχύος για μικρές αποστάσεις	113
3.4 Επίλογος	115
4 Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης	117
4.1 Εισαγωγή	117
4.2 Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης	117
4.3 Επίλογος	118
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	120
Α □ Κώδικας υπολογισμού πυκνότητας ισχύος μακρινής ζώνης	133
Β □ Κώδικας υπολογισμού ακτινοβολούμενης ισχύος	134
Γ □ Κώδικας SAR για κεφάλι και δέρμα	136
Δ □ Κώδικας υπολογισμού SAR με την βοήθεια της αγωγιμότητας	137

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Η τεχνική half duplex [5].	2
1.2	Reginald Blevins, Γενικός Διευθυντής Ταχυδρομείου του Ηνωμένου Βασιλείου [6].	3
1.3	Motorola DynaTAC 8000X, το πρώτο κινητό τηλέφωνο [11].	4
1.4	Προπληρωμένη κάρτα SIM από την “1Pmobile” [13].	5
1.5	Παράδειγμα CDMA [16].	6
1.6	Το πρώτο SMS που εστάλη [15].	7
1.7	Επικοινωνία μέσω ελέγχου ταυτότητας και συμφωνίας κλειδιού [20].	8
1.8	Γραφικό παράδειγμα συνάθροισης φορέων [21].	9
1.9	Το IoT και οι έξυπνες συσκευές [23].	10
1.10	OFDMA με τεχνολογία LTE [29].	12
1.11	Απλή λειτουργία ενός 4x4 MIMO [30].	13
1.12	Μια 4G 4x4 κεραία MIMO [38].	14
1.13	Παραδοσιακή τοπολογία δικτύου με macrocell σταθμό βάσης [44].	15
1.14	Μια επίθεση τύπου man-in-the-middle σε δίκτυο 4G [46].	16
1.15	Οι απαιτήσεις του IMT advanced σε σύγκριση με του IMT 2020 [49].	17
1.16	Το διαθέσιμο φάσμα του 5G σε σύγκριση με το 4G [50].	18
1.17	Τεμαχισμός 5G Δικτύου ανάλογα με την ανάγκη συνάφειας [56].	19
1.18	Σενάρια και προϋποθέσεις δυνατοτήτων του 6G [61].	21
1.19	Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών ανά τα χρόνια [63].	22
1.20	Πιθανές μπάντες συχνοτήτων του 6G [62].	23
1.21	Τα mmWaves και Terahertz waves στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [70].	25
1.22	Σενάριο χρήσης των RIS [73].	27
1.23	UAVs ως σταθμοί βάσης [77].	28
1.24	Ενσωματωμένο επίγειο-δορυφόρου δίκτυο με χρήση RIS [86].	30
1.25	Η μελλοντική αγορά ως αναφορά το Edge computing με κλίμακα τα δισεκατομμύρια δολάρια [87].	32
1.26	Σύστημα Σημαιολογικής Επικοινωνίας για αναγνώριση εικόνας [91].	33
2.1	Χρήση ραδιοεπικοινωνίας στον Β’ Παγκόσμιο πόλεμο [96].	39
2.2	Ο πρώτος οικιακός φούρνος μικροκυμάτων της Panasonic που κυκλοφόρησε το 1966 [98].	41
2.3	Χημικός αντιδραστήρας μικροκυμάτων της “Stonylab” [101].	42
2.4	Τρόποι επικοινωνίας υπέρυθρων ακτίνων [102].	44
2.5	Επικοινωνία μεταξύ 2 κινητών συσκευών με χρήση υπέρυθρων [104].	45
2.6	Το ορατό φως στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.	45
2.7	Οι πρώτες δίοδοι ορατού φωτός [107].	46
2.8	Τα 3 είδη υπεριώδους ακτινοβολίας.	48
2.9	Φορητός αποστειρωτής κυμάτων UVC για κινητά τηλέφωνα [115].	49
2.10	Απεικόνισή θώρακα μέσω ακτίνων x-ray [118].	50
2.11	Απεικόνιση έκρηξης ακτίνων τύπου γάμμα στο διάστημα [123].	52
2.12	εξοπλισμός ραδιοθεραπείας [125].	53
2.13	Το φάσμα συχνοτήτων, μη ιοντίζουσες και ιοντίζουσες [148].	59
2.14	Πυκνότητα Ισχύος μιας κεραίας [150].	61
2.15	Αναπαράσταση του SAR στο ανθρώπινο σώμα [157].	65
2.16	Σενάριο στο οποίο ένα άτομο βρίσκεται σε ίση απόσταση από τρεις κυψελοειδείς σταθμούς βάσης [145].	72
2.17	Σενάριο στο οποίο άνθρωπος βρίσκεται ακριβώς ανάμεσα από 2 πόλους-πομπούς [145].	73
3.1	Αγωγιμότητά και επιτρεπτικότητα του δέρματος σε συχνότητες από 100 MHz μέχρι 100 GHz [158].	80
3.2	Αγωγιμότητά και επιτρεπτικότητα του δέρματος σε συχνότητες 100 MHz με 175 GHz [158].	83
3.3	Αγωγιμότητά και η επιτρεπτικότητα του εγκεφάλου σε συχνότητες 100 MHz με 100 GHz [158].	83
3.4	Αγωγιμότητά και η επιτρεπτικότητα των οστών σε συχνότητες 100 MHz με 175 GHz [158].	85
3.5	Αγωγιμότητά και η επιτρεπτικότητα του κερατοειδή σε συχνότητες 100 MHz με 100 GHz [158].	87
3.6	Πυκνότητα Ισχύος μακρινής ζώνης ορίων FFC.	89
3.7	Πυκνότητα Ισχύος μακρινής ζώνης ορίων FFC για εργαζομένους.	90
3.8	Πυκνότητα ισχύος με όρια Ρωσίας.	91
3.9	Πυκνότητα ισχύος πυλώνα φωτισμού.	92
3.10	Λαμβανόμενη ισχύς σε συχνότητες MHz με σταθερή απόσταση 10 μέτρων.	93
3.11	Λαμβανόμενη ισχύς σε συχνότητες GHz με σταθερή απόσταση 10 μέτρων.	94

3.12	Λαμβανόμενη ισχύς για διαφορετικές πηγές ισχύς σε συχνότητες THz με σταθερή απόσταση 10 μέτρων.	95
3.13	Ακτινοβολούμενη ισχύς για διάφορες συχνότητες για απόσταση 200 με 600 μέτρα.	96
3.14	Ακτινοβολούμενη ισχύς για διάφορες αποστάσεις.	97
3.15	SAR σε κάθε γενιά για κύβο 1g δέρματος.	98
3.16	SAR σε κάθε γενιά για κύβο 10g δέρματος.	98
3.17	SAR σε κάθε γενιά για 1g ιστού του κεφαλιού.	99
3.18	SAR σε κάθε γενιά για 10g ιστού του κεφαλιού.	99
3.19	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για το δέρμα σε συχνότητες 2G.	101
3.20	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για το δέρμα σε συχνότητες 3G.	101
3.21	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για το δέρμα σε συχνότητες 4G.	102
3.22	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για το δέρμα σε συχνότητες 5G.	102
3.23	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για το δέρμα σε συχνότητες 6G.	103
3.24	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 2G.	103
3.25	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 3G.	104
3.26	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 4G.	104
3.27	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 5G.	105
3.28	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 6G.	105
3.29	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 6G σε απόσταση 2-6 cm.	106
3.30	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τα οστά σε συχνότητες 2G.	106
3.31	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τα οστά σε συχνότητες 3G.	107
3.32	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τα οστά σε συχνότητες 4G.	107
3.33	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τα οστά σε συχνότητες 5G.	108
3.34	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τα οστά σε συχνότητες 6G.	108
3.35	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 2G.	109
3.36	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 3G.	109
3.37	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 4G.	110
3.38	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 5G.	110
3.39	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 5G σε απόσταση 2 με 6 cm.	111
3.40	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 6G.	111
3.41	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 6G σε απόσταση 2 με 6 cm.	112
3.42	Πυκνότητα Ισχύος για μικρές αποστάσεις με όρια της FCC.	114
3.43	Πυκνότητα Ισχύος για μικρές αποστάσεις με όρια της Ρωσίας.	114
3.44	Πυκνότητα Ισχύος για απόσταση 2 cm με όρια της Ρωσίας.	115

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Χαρακτηριστικά τύπων σταθμών βάσεων. [45].	15
1.2	Βασικά χαρακτηριστικά γενιών δικτύου [9].	34
2.1	Υποκατηγορίες υπέρυθρων [105].	44
2.2	Τομείς ερευνών που έχουν γίνει σχετικά με τις επιπτώσεις της terahertz ακτινοβολίας.	55
2.3	Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.	58
2.4	Όριο πυκνότητας ισχύος ανά χώρα [152, 153].	62
2.5	Μέγιστο όριο SAR της FCC σε συχνότητα 100 KHz-6 GHz ανά 1g [152].	68
2.6	Μέγιστο όριο SAR της ICNIRP σε συχνότητα 100 KHz-6 GHz ανά 10g [152].	68
2.7	Συντελεστής απόσβεσης ισχύος για διάφορες τιμές συχνότητας και απόστασης. [145].	73
2.8	Κριτήριο FCC υπολογισμού έκθεσης ανά περίπτωση [152].	74
3.1	Στοιχεία προσομοίωσης Πυκνότητας Ισχύος μακρινής ζώνης [168, 170, 171].	77
3.2	Επιφάνεια κύβου (cm ²).	79
3.3	Στοιχεία υπολογισμού SAR.	79
3.4	Στοιχεία συχνοτήτων 2G για τον υπολογισμό του SAR στο δέρμα.	80
3.5	Στοιχεία συχνοτήτων 3G για τον υπολογισμό του SAR στο δέρμα.	81
3.6	Στοιχεία συχνοτήτων 4G για τον υπολογισμό του SAR στο δέρμα.	81
3.7	Στοιχεία συχνοτήτων 5G για τον υπολογισμό του SAR στο δέρμα.	82
3.8	Στοιχεία συχνοτήτων 6G για τον υπολογισμό του SAR στο δέρμα.	82
3.9	Στοιχεία συχνοτήτων 2G για τον υπολογισμό του SAR στον εγκέφαλο.	84

3.10	Στοιχεία συχνοτήτων 3G για τον υπολογισμό του SAR στον εγκέφαλο.	84
3.11	Στοιχεία συχνοτήτων 4G για τον υπολογισμό του SAR στον εγκέφαλο.	84
3.12	Στοιχεία συχνοτήτων 5G για τον υπολογισμό του SAR στον εγκέφαλο.	85
3.13	Στοιχεία συχνοτήτων 6G για τον υπολογισμό του SAR στον εγκέφαλο.	85
3.14	Στοιχεία συχνοτήτων 2G για τον υπολογισμό του SAR στα οστά.	85
3.15	Στοιχεία συχνοτήτων 3G για τον υπολογισμό του SAR στα οστά.	86
3.16	Στοιχεία συχνοτήτων 4G για τον υπολογισμό του SAR στα οστά.	86
3.17	Στοιχεία συχνοτήτων 5G για τον υπολογισμό του SAR στα οστά.	86
3.18	Στοιχεία συχνοτήτων 6G για τον υπολογισμό του SAR στα οστά.	86
3.19	Στοιχεία συχνοτήτων 2G για τον υπολογισμό του SAR στον κερατοειδή του ματιού.	87
3.20	Στοιχεία συχνοτήτων 3G για τον υπολογισμό του SAR στον κερατοειδή του ματιού.	87
3.21	Στοιχεία συχνοτήτων 4G για τον υπολογισμό του SAR στον κερατοειδή του ματιού.	88
3.22	Στοιχεία συχνοτήτων 5G για τον υπολογισμό του SAR στον κερατοειδή του ματιού.	88
3.23	Στοιχεία συχνοτήτων 6G για τον υπολογισμό του SAR στον κερατοειδή του μάτιου	88
3.24	Αποτελέσματα P_D για τα όρια FFC για κοινούς ανθρώπους.	90
3.25	Αποτελέσματα P_D για όρια FFC για εργαζόμενους.	91
3.26	Ελάχιστη απόσταση συμμόρφωσής με όρια Ρωσίας για τον απλό πολίτη.	92
3.27	Πυκνότητα ισχύος για τα σενάρια με τους πυλώνες φωτισμού.	92
3.28	Λαμβανόμενη ισχύς σε συχνότητες MHz.	94
3.29	Λαμβανόμενη ισχύς σε συχνότητες GHz.	94
3.30	Λαμβανόμενη ισχύς σε συχνότητες THz.	95
3.31	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης για δέρμα και κεφάλι για απόσταση 2 cm.	97
3.32	Ρυθμός ειδικής απορρόφησης για δέρμα και κεφάλι για απόσταση 6 cm.	97
3.33	Ελάχιστη ισχύς/απόσταση για να είναι εντός των ορίων οι συχνότητες του 6G για τον εγκέφαλο.	101
3.34	Ελάχιστη ισχύς/απόσταση για να είναι εντός των ορίων οι συχνότητες του 6G για τον κερατοειδή.	102
3.35	Μέγιστος ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για διάφορα μέρη τους σώματος.	103
3.36	Ελάχιστη απόσταση/ισχύς για συμμόρφωσή με τα όρια της FCC.	113
3.37	Ελάχιστη απόσταση/ισχύς για συμμόρφωση με τα όρια Ρωσίας.	114

Συνομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Η.Π.Α.	Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής
ΚΝΣ	Κεντρικό Νευρικό Σύστημα
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
3GPP	3rd Generation Partnership Project
AI	Artificial Intelligence
AKA	Authantication and key Agreement
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AP	Access Point
ARP	Autoradiopuhelin
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
CA	Carrier Aggregation
CDMA	Code Division Multiple access
CIE	Commision on Illumination
CS	Circuit Switching
DNA	Deoxyribonucleic Acid
EMF	Electromagnetic Field
EMS	Enhanced Messaging Service
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Dublex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HAPS	High Altitude Platform Stations
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HZ	Herz
IARC	international agency for research on cancer
IBFD	In-Band Fullduplex
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
ICOH	International Commision on Occupational Health
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIoT	Intergraded Internet of things
ILO	International Labour Organization
IMPS	Improved Mobile Phone System
IMT	International Mobile Telecommunications
IOE	Internet Of Everything
IoT	Internet Of things
IRPA	International Radiation Protection Association
IRS	Intelligent Reflecting Surfaces
ITU	International Telecommunication Union
LDPC	Low-density parity-check code
LAT	Large Area Teleschope
LOS	Line-Of-sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
ML	Machine Learning
MMIMO	Massive Multiple INput Multiple Output
MMS	Multimedia Messaging Service
MMW	Millimeter Wave(s)
MR	Mixed Reality
NAMPS	Narrowband Advanced Mobile Phone Service

NIR	Non-ionising Radiation
NR	New Radio
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
P_D	Power Density
PS	Packet Switching
PTT	Push-To-Talk
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technologies
RF	Radiofrequency
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces
RMS	Root Mean Square
RRU	Remote Radio Unit
SA	Specific Absorption
SAR	Specific Absorption Rate
SMS	Short Message Service
SDN	(Software Defined Networking
SP	Service Provider
STIN	Surface Triangular Irregular Network
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TMSI	Temporary Mobile Subscriber Identity
UAV	Unmanned Aerial Vehicleless
UGV	Unity-Gain Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
UV	Ultraviolet
UVA	Ultraviolet-A
UVB	Ultraviolet-B
UVC	Ultraviolet-C
UVR	Ultraviolet Radiation
VLC	Visible light communication
VOLTE	Voice Over Long Term Evolution
VR	Virtual Reality
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
W.H.O.	World health organization
WI-FI	Wireless Fidelity
XR	Extended Reality
ZT	Zero Trust

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

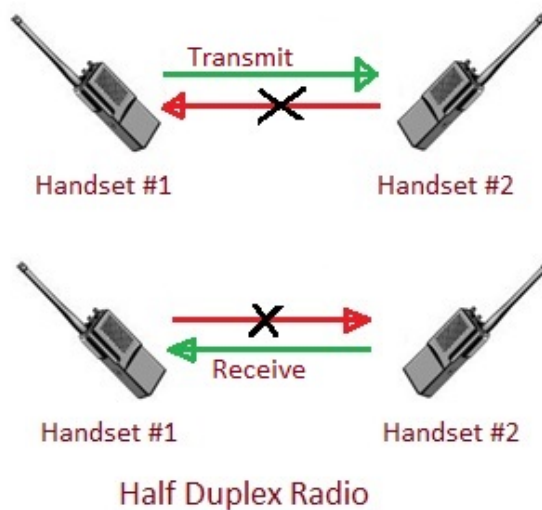
1.1 Εισαγωγή

Ανέκαθεν η ανθρωπότητα είχε την ανάγκη απομακρυσμένης επικοινωνίας. Αγγελιοφόροι, πρέσβεις, εκπρόσωποι, χελιδόνια και ταχυδρόμοι ήταν κάποιοι από αυτούς που εκπλήρωναν την ανάγκη αυτή. Ωστόσο, με την ανακάλυψη των ραδιοκυμάτων και την χρήση τους στους δύο παγκόσμιους πολέμους στην μορφή ασυρμάτων, άλλαξαν τα δεδομένα. Πλέον, υπήρχε τρόπος άμεσης φωνητικής επικοινωνίας μεταξύ δύο ατόμων εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για μεσάζοντα και την εμμесότητα των γραπτών μηνυμάτων. Ως αποτέλεσμα, δεν άργησε να εγκαθιδρυθεί η ιδέα ενός παγκόσμιου ασύρματου δικτύου κινητής τηλεφωνίας, κάτι το οποίο έγινε το 1952 [1], 7 περίπου χρόνια από την έλαση του δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου. Από την κυκλοφορία της πρώτης γενιάς κινητής τηλεφωνίας (1G) και μετά, νέα γενιά τηλεπικοινωνιών κυκλοφορεί κάθε 10 περίπου χρόνια. Κάθε γενιά απαρτίζεται από διάφορες τεχνολογίες και δημιουργήθηκε με σκοπό την ικανοποίηση συγκεκριμένων ολοένα και αυξανόμενων αναγκών και στόχων. Οι γενιές των ασύρματων δικτύων δεν διαχωρίζονται μόνο από τις τεχνολογίες που τις απαρτίζουν, αλλά από τις ανάγκες και τις προαπαιτήσεις που τίθενται να καλύψουν. Για αυτόν τον λόγο, πολλά χαρακτηριστικά που αποδίδονται σε μια συγκεκριμένη γενιά μπορεί να εμφανίζονται σε μια άλλη, καθιστώντας έτσι την διαφοροποίηση μεταξύ τους θέμα σύγχυσης. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα βασικά χαρακτηριστικά και η εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών, καθώς και τα ανοιχτά προβλήματα και ανησυχίες που προκαλεί η πέμπτη γενιά και πιθανώς να προκαλέσει η έκτη γενιά κινητής τηλεφωνίας.

1.2 Γενιές κινητής τηλεφωνίας από το 0G στο 5G

- Κινητή τηλεφωνία μηδενικής γενιάς (0G)

Η τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας μηδενικής γενιάς (0G) αναφέρεται σε τεχνολογίες πριν από την κλασική κυψελωτή κινητή τηλεφωνία, όπως το ραδιοτηλέφωνο, και χρησιμοποιούνταν κυρίως σε αυτοκίνητα καθώς και σε ορισμένους χαρτοφύλακες. Η τεχνολογία αναπτύχθηκε με το πέρας του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου και χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε στρατιωτικές υπηρεσίες. Δεν έκανε την εμφάνιση της για εμπορικούς σκοπούς μέχρι την δεκαετία του 1970. Υποστήριζε περιορισμένο αριθμό καναλιών για τη μετάδοση πληροφοριών και βασιζόνταν σε αναλογικά σήματα που χρησιμοποιούνταν ως πομποί επικοινωνίας μεταξύ δύο τελικών σημείων για την πραγματοποίηση φωνητικών κλήσεων σε πραγματικό χρόνο. Στα αυτοκίνητα ο πομποδέκτης ήταν συνήθως τοποθετημένος στο πορτμπαγκάζ του οχήματος και προσαρτημένος στην «κεφαλή» (καντράν, οθόνη και ακουστικό) που ήταν τοποθετημένη κοντά στο κάθισμα του οδηγού. Στο σχήμα 1.2 φαίνεται ένα από τα πρώτα τηλέφωνα σε αυτοκίνητο. Οι κύριοι χρήστες ήταν ξυλοκόποι, εργοδηγοί κατασκευών, μεσίτες και διασημότητες. Το “Autoradiopuhelin” (ARP), τηλέφωνο ραδιοφώνου αυτοκινήτου, ήταν το πρώτο εμπορικά λειτουργικό δημόσιο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και αναπτύχθηκε στην Φινλανδία [2]. Η τεχνολογία θεωρείται μηδενικής γενιάς (0G), αφού παρόλο που είχε κυψέλες, η μετακίνηση στοιχείων κλήσεως μεταξύ τους δεν ήταν απρόσκοπτη. Το δίκτυο προτάθηκε το 1968 και η κατασκευή του ξεκίνησε το 1969 [2]. Η χρήση του δικτύου ξεκίνησε το 1971 και μέχρι το 1978 έφτασε να έχει πλήρη επίγεια κάλυψη. Το ARP δεν υποστήριζε μεταπομπή κλήσης (Call Handover), επομένως οι κλήσεις αποσυνδέονταν όταν ο χρήστης μετακινούνταν σε μια νέα περιοχή την οποία κάλυπτε διαφορετική κυψέλη. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε μια τεχνική ημιαμφίδρομης



Σχήμα 1.1: Η τεχνική half duplex [5].

επικοινωνίας (half duplex), η λεγόμενη Push-To-Talk (PTT), η οποία θυμίζει τη χρήση χειροπομποδέκτων (walkie-talkie) [3]. Ο πομπός έπρεπε να πατήσει ένα κουμπί για να στείλει ένα φωνητικό μήνυμα στον δέκτη και ο δέκτης έπρεπε, αφού πρώτα αφήσει το κουμπί ο πομπός, να πατήσει ένα αντίστοιχο κουμπί για να απαντήσει [4]. Το παραπάνω παριστάνεται στο σχήμα 1.1. Αργότερα, αναπτύχθηκε το πλέον διαδεδομένο βελτιωμένο σύστημα κινητής τηλεφωνίας γνωστό και ως Improved Mobile Phone System (IMPS). Αυτή η πλήρως αμφίδρομη (full-duplex) μέθοδος επέτρεπε τόσο στον ομιλητή όσο και στον δέκτη να ακούνε και να μιλάνε ταυτόχρονα. Η συσκευή θα συνδεόταν σε τοπικό τηλεφωνικό δίκτυο μόνο αν ήταν στην εμβέλεια των 20 χιλιομέτρων. Κάθε πόλη, που βρισκόταν στο δίκτυο, είχε έναν κεντρικό πύργο κεραίας με 25 κανάλια το πολύ. Η περιαγωγή δικτύου, δηλαδή η δυνατότητα που έχει σήμερα ένας χρηστής, όταν και αν βρεθεί εκτός εμβέλειας του δικτύου του παρόχου του, να συνδεθεί σε έναν δευτερεύον πάροχο δεν ήταν διαθέσιμη σε αυτό το σημείο καθώς δεν υπήρχε συγκεντρωτικό πλάνο για την εγκαθίδρυση ενός ενιαίου υπερ-δικτύου [3].

- Κινητή τηλεφωνία πρώτης γενιάς (1G)

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, ιδιωτικές εταιρείες στην Ιαπωνία, Ευρώπη και Αμερική, άρχισαν, ανεξάρτητα η κάθε μια, να δημιουργούν τα δικά τους δίκτυα τα οποία χαρακτηρίζονται πλέον ως η πρώτη γενιά τηλεπικοινωνιών [7]. Η ιαπωνική εταιρία “Nippon Telephone and Telegraph” ήταν η πρώτη που ανέπτυξε λειτουργικό κυψελωτό δίκτυο στον κόσμο. Το 1G, γνωστό και ως προηγμένες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας (Advanced Mobile Phone System-AMPS), είχε παραπλήσιο βασικό σκοπό με το 0G: Να επιτρέπει στους ανθρώπους να πραγματοποιούν φωνητικές κλήσεις σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας αναλογικά σήματα. Στο σχήμα 1.3 παριστάνεται το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο κινητό τηλέφωνο πρώτης γενιάς, το Motorola DynaTAC 8000X, το οποίο έκανε την εμφάνισή του στα ράφια των καταναλωτών το 1984 και είχε την δυνατότητα πραγματοποίησης κλήσης μισής ώρας σε διάρκεια, με ανάγκη φόρτισης κάθε 10 ώρες [8].

Αυτό που διαφοροποίησε το 1G από το 0G ήταν η προσέγγιση και η κλίμακα της τεχνολογίας. Το 1G



Σχήμα 1.2: Reginald Blevins, Γενικός Διευθυντής Ταχυδρομείου του Ηνωμένου Βασιλείου [6].

ήταν η πρώτη προσπάθεια υλοποίησης ενός παγκόσμιου ασυρμάτου δικτύου. Όλα τα συστήματα πρόσφεραν δυνατότητα μεταγωγής και περιαγωγής δικτύου, αλλά τα δίκτυα της πρώτης γενιάς δεν ήταν σε θέση να λειτουργήσουν μεταξύ των χωρών. Αυτό αποτελούσε και το κύριο μειονέκτημα των δικτύων κινητής τηλεφωνίας πρώτης γενιάς. Το 1G λειτουργούσε κυρίως στην συχνότητα των 800 MHz [9]. Χάρης του αυξημένου αριθμού σταθμών βάσης (base stations), σε σύγκριση με το 0G, το 1G ήταν σε θέση να υποστηρίξει φωνητικές κλήσεις σε πραγματικό χρόνο σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα και με ταχύτητες που έφταναν μέχρι και τα 2.4 Kbps συμβάλλοντας σημαντικά στην μείωση του χρόνου αδράνειας. Η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access-FDMA) συντέλεσε στην αύξηση του πλήθους ταυτοχρόνων χρηστών [3]. Το φάσμα τμηματοποιήθηκε σε τμήματα συχνοτήτων των 30 KHz, τα οποία ονομάζονται κανάλια [9]. Κάθε χρήστης σε μια κλήση καταλάμβανε ένα ολόκληρο κανάλι. Όλοι οι σταθμοί βάσης επαναχρησιμοποιούσαν συχνότητες, πράγμα που σήμαινε ότι ανάλογα με την τοποθεσία του σταθμού βάσης, ορισμένες περιοχές είχαν τις ίδιες ραδιοσυχνότητες μέσω των οποίων ήταν δυνατή η επικοινωνία μεταξύ σταθμών [10]. Η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας σαφώς επέκτεινε τον αριθμό των χρηστών, αναπόφευκτα ωστόσο οδήγησε σε ορισμένα ζητήματα ασφάλειας. Μια νέα τεχνολογία γνωστή ως “προηγμένη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας στενής ζώνης” (Narrowband Advanced Mobile Phone Service-NAMPS) κυκλοφόρησε σε μια προσπάθεια να ενισχύσει την συνολική χωρητικότητα του συστήματος. Η απόσταση των καναλιών μειώθηκε στα 10 KHz [9]. Στο 1G, υπήρχαν τρία πρότυπα κινητής τηλεφωνίας: AMPS στις ΗΠΑ, “σκανδιναβική κινητή τηλεφωνία” (Nordic Mobile Telephony) στις σκανδιναβικές χώρες και “σύστημα επικοινωνίας ολικής πρόσβασης” (Total Access Communication System) στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ως πλεονέκτημα, το 1G είχε απλή υποδομή και απαιτούσε λιγότερα στοιχεία δικτύου και κατά συνέπεια μικρότερο κόστος για την ανάπτυξη του. Όπως αναφέρθηκε, το 1G βασίστηκε σε αναλογικά σήματα που σημαίνει ότι οι πληροφορίες των μηνυμάτων δεν ήταν κρυπτογραφημένες με κανέναν τρόπο [7]. Έτσι, εάν το κινητό ενός χρήστη είχε



Σχήμα 1.3: Motorola DynaTAC 8000X, το πρώτο κινητό τηλέφωνο [11].

την ίδια συχνότητα με τη συσκευή επικοινωνίας κάποιου άλλου κακόβουλου χρήστη, όλες οι προσωπικές συνομιλίες του θα μπορούσαν εύκολα να εντοπιστούν από τρίτους [10]. Με μια αναδρομική μιάτσια, διαπιστώνουμε εύκολα την κακή ποιότητα ήχου και την χαμηλή ενεργειακή αποδοτικότητα που παρέχει το 1G σε σύγκριση με τις μεταγενέστερες γενιές.

- Κινητή τηλεφωνία δεύτερης γενιάς (2G)

Η δεύτερη γενιά ασύρματης κυψελοειδούς τεχνολογίας 2G πρωτοεμφανίστηκε το 1991 στην Φινλανδία [9]. Το 2G βασίστηκε εξ' ολοκλήρου στο Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (Global System for Mobile Communications-GSM), το οποίο είναι ένα σύνολο προτύπων και πρωτοκόλλων κινητών επικοινωνιών και είχε στόχο την δημιουργία ενός κοινού ευρωπαϊκού πρότυπου κινητής τηλεφωνίας. Η ιδέα του GSM προέκυψε από ένα κινητό κυψελοειδές ραδιοσύστημα το οποίο έλαβε χώρα στα εργαστήρια της Bell στις αρχές της δεκαετίας του 1970 [12]. Κύριο χαρακτηριστικό του GSM είναι η ψηφιοποίηση του σήματος κάτι το οποίο προσφέρει υπηρεσίες ασφάλειας όπως έλεγχο ταυτότητας, προστασία απορρήτου, προστασία μετάδοσης και προστασία προσωπικών πληροφοριών. Τα δίκτυα GSM λειτουργούν σε τέσσερις διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων, οι οποίες είναι οι 800, 900, 1800, 1900 MHz και χρησιμοποιούν φάσμα της τάξεως των 25 MHz. Τα πρότυπα GSM 900 και GSM 1800 είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πρότυπα. Η ζώνη των 850 MHz και η ζώνη των 1900 MHz εισήχθηκαν επειδή οι ζώνες συχνοτήτων 900 MHz και 1800 MHz χρησιμοποιούνταν ήδη από πολλούς χρήστες και παρατηρούνταν πρόβλήματα συμφόρησης. Το πρότυπο GSM 1800 παρέχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ελαττώνει την απαίτηση ισχύος σε σχέση με το GSM 900 MHz. Η μέγιστη ισχύς μετάδοσης της κεραίας στο κινητό τηλέφωνο περιορίζεται στα 2 Watt σε GSM 850 και GSM 900 ενώ η μέγιστη ισχύς είναι μόλις 1 Watt σε GSM 1800 και GSM 1900. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης αυξήθηκε κατά 15 φορές (από 30 KHz στο 1G) στα 200 KHz [7]. Το υποσύστημα σταθμού βάσης (base station subsystem) αποτελείται από δύο στοιχεία: τους σταθμούς πομποδέκτη βάσης (base transceiver stations) και τον ελεγκτή σταθμού βάσης (base station controller). Το πλήρες δίκτυο GSM ελέγχεται και παρακολουθείται από το υποσύστημα λειτουργίας και υποστήριξης (Operation and support subsystem). Η εγγραφή, ο έλεγχος ταυτότητας, η δρομολόγηση κλήσεων, η

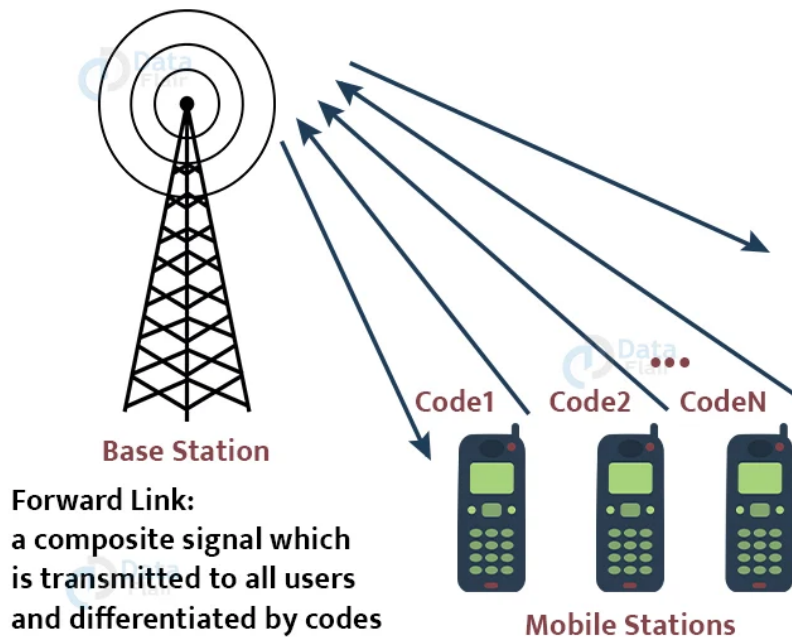


Σχήμα 1.4: Προπληρωμένη κάρτα SIM από την “1Pmobile” [13].

τοποθεσία κλήσης και άλλες υπηρεσίες παρέχονται από το κινητό κέντρο μεταγωγής (mobile switching center). Οι πάροχοι δικτύου χρησιμοποιούν έλεγχο ταυτότητας για τον εντοπισμό και την εξουσιοδότηση χρηστών. Η κρυπτογράφηση προστατεύει τα δεδομένα χρήστη και τη σηματοδότηση, ενώ η Μονάδα Ταυτότητας Συνδρομητή (Subscriber Identity Module-SIM) δημιουργεί τα κλειδιά κρυπτογράφησης. Οι χρήστες αποθηκεύουν το απόρρητο τους χρησιμοποιώντας την Προσωρινή Ταυτότητα Συνδρομητή κινητής τηλεφωνίας (Temporary Mobile Subscriber Identity-TMSI). Όλες οι τηλεφωνικές συνομιλίες ήταν πλέον κρυπτογραφημένες και ασφαλέστερες από ποτέ λόγω της ψηφιοποίησης του σήματος. Στο σχήμα 1.4 παριστάνεται μια SIM τύπου 2G.

Το GSM χρησιμοποιούσε μεταγωγή κυκλώματος (Circuit Switching-CS) για κλήσεις και αποστολή SMS. Η μεταγωγή κυκλώματος είναι μια μέθοδος επικοινωνίας στην οποία δημιουργείται μια αποκλειστική διαδρομή επικοινωνίας ή αλλιώς κύκλωμα μεταξύ δύο συσκευών πριν ξεκινήσει η μετάδοση δεδομένων. Το κύκλωμα παραμένει αφιερωμένο στην επικοινωνία για όλη τη διάρκεια της συνεδρίας και καμία άλλη συσκευή δεν μπορεί να το χρησιμοποιήσει ενώ η συνεδρία βρίσκεται σε εξέλιξη. Εντούτοις, εξασφαλίζεται μια ομαλή επικοινωνία, δίχως παρεμβολές, κακόβουλες ή μη, σε πραγματικό χρόνο [14]. Οι τεχνολογίες κωδικοποίησης του GSM ήταν είτε πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access-TDMA) είτε πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access-CDMA [3]). Το TDMA επιτρέπει τη διαίρεση του σήματος σε χρονοθυρίδες. Με άλλα λόγια κάθε χρήστης δεσμεύει ένα φάσμα συχνότητας για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα [10]. Τα κυβελωτά συστήματα CDMA χρησιμοποιούν έναν μοναδικό διαφορετικό για κάθε χρήστη κωδικό για να κωδικοποιούν τα δεδομένα κάθε κλήσης και στη συνέχεια να μεταδίδουν όλες αυτές τις κλήσεις ταυτόχρονα. Το παραπάνω διακρίνεται στο σχήμα 1.5. Ακόμα, πέρα από τις τηλεφωνικές κλήσεις, επέτρεπε την χρήση βασικών υπηρεσιών δεδομένων όπως η υπηρεσία σύντομων μηνυμάτων (Short Message Service-SMS), η βελτιωμένη υπηρεσία ανταλλαγής μηνυμάτων (Enhanced Messaging Service-EMS) και η υπηρεσία ανταλλαγής μηνυμάτων πολυμέσων (Multimedia Messaging Service-MMS). Τον Δεκέμβριο του 1992 πραγματοποιήθηκε η αποστολή του πρώτου SMS (όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.6 και πολύ σύντομα ακολούθησαν τα EMS και τα MMS [15]. Άλλες λειτουργίες που χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα,

What is CDMA?



Σχήμα 1.5: Παράδειγμα CDMA [16].

όπως οι κλήσεις συνδιάσκεψης, η αναμονή κλήσεων και η περιαγωγή εκτός μιας χώρας εμφανίστηκαν με το 2G. Στο 2G εμφανίστηκε μια πρωταρχική μορφή σύνδεσης του κινητού τηλεφώνου στο διαδίκτυο. Μια άλλη αξιοσημείωτη αναφορά πρέπει να γίνει στις υποκατηγορίες των δικτύων 2G και συγκεκριμένα στα δίκτυα 2.5G και 2.75G, γνωστά και ως “Γενική υπηρεσία ραδιοφώνου πακέτων” (General Packet Radio Service-GPRS) και “Ενισχυμένοι ρυθμοί δεδομένων για την παγκόσμια εξέλιξη” (Enhanced Data Rates for Global Evolution-EDGE), αντίστοιχα. Αυτές ήταν εκδόσεις του αρχικού 2G με βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας και ταχύτερες δυνατότητες μετάδοσης δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα το 2.5G είχε θεωρητικό μέγιστο ρυθμό δεδομένων 115 Kbps και το EDGE ρυθμό δεδομένων 385 Kbps.

Δυστυχώς, παρά τις σημαντικές προόδους ασφαλείας σε σχέση με την προηγούμενη γενιά, εξακολουθούν να υπάρχουν μεγάλα κενά ασφαλείας. Το δίκτυο μπορεί να ελέγξει την ταυτότητα του χρήστη, ωστόσο ο χρήστης δεν μπορεί να ελέγξει το δίκτυο ως προς την αυθεντικότητά του [17]. Έτσι, θα μπορούσε εύκολα ένας μη εξουσιοδοτημένος και κακόβουλος σταθμός βάσης να παριστάνει τον νόμιμο πάροχο με σκοπό να υποκλέψει στοιχεία και προσωπικά δεδομένα του χρήστη. Επιπλέον, το πρόβλημα κρυπτογράφησης από άκρη σε άκρη παρουσιάζεται όταν κρυπτογραφείται ένα μεμονωμένο τμήμα του καναλιού επικοινωνίας. Ταυτόχρονα, τα άλλα μέρη του δικτύου είναι μη κρυπτογραφημένα, γεγονός που εκθέτει το κανάλι σε επιθέσεις. Επομένως, οι αναφερόμενες λύσεις απορρήτου TMSI και η κρυπτογράφηση της διαδρομής των ραδιοπύλων δεν επαρκούν για την προστασία των δικτύων 2G, τα οποία είναι επιρρεπή σε διάφορες επιθέσεις, συμπεριλαμβανομένης της υποκλοπής [10].

Το GSM στην Ευρώπη, το IS-54 (γνωστό και ως IS-136 στις Ηνωμένες Πολιτείες και το IS-95 (γνωστό και ως CDMA-One) στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Κορέα ήταν τα τρία κυριώδη πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν στο 2G [9]. Παρά τα πλέον αρχαιωμένα χαρακτηριστικά του 2G, τα περισσότερα

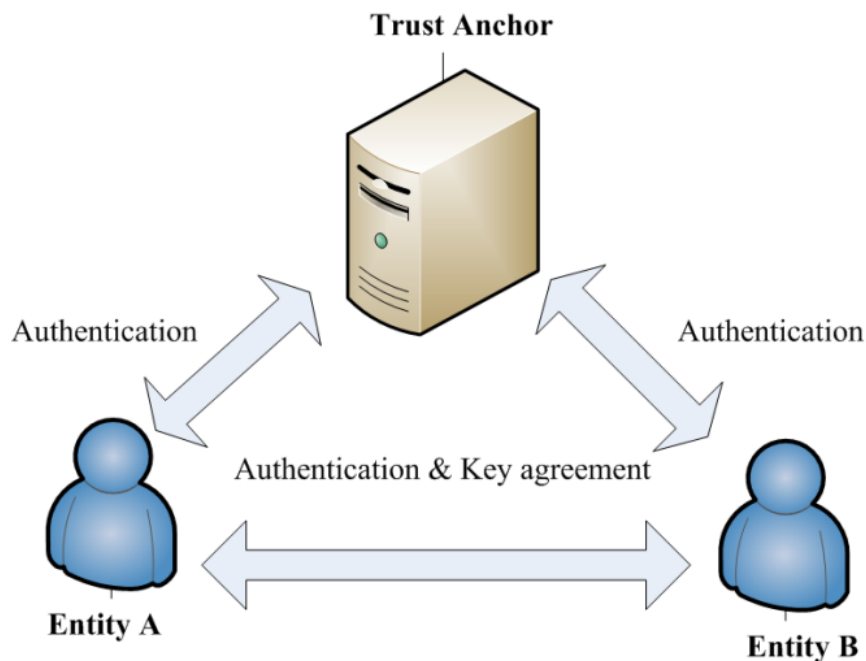


Σχήμα 1.6: Το πρώτο SMS που εστάλη [15].

2G δίκτυα παραμένουν ενεργά ως εναλλακτική λύση σε περίπτωση βλάβης των επομένων γενιών καθώς και σε δύσβατες περιοχές όπου δεν υπάρχει κάλυψη των μεταγενέστερων γενιών. Το παραπάνω είναι εφικτό λόγω της εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης του δικτύου 2G. Υπάρχει ακόμα σε πολλές μοντέρνες συσκευές η δυνατότητα περιορισμού του δικτύου σε δίκτυο 2G, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική ελάττωση κατανάλωσης ενέργειάς της συσκευής αυξάνοντας έτσι την αυτονομία της μπαταρίας της συσκευής.

- Κινητή τηλεφωνία τρίτης γενιάς (3G)

Η τρίτη γενιά κινητής τηλεφωνίας, η οποία πρωτοκυκλοφόρησε στην αρχή της δεκαετίας του 2000, σχεδιάστηκε για να επεκτείνει τη χωρητικότητα των συνδρομητών του συστήματος και να καλύψει την αυξανόμενη ζήτηση για ολοένα και μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων [14]. Έφερε ραγδαίες αλλαγές στον τεχνολογικό κόσμο, καθώς έδωσε πρόσβαση σε πολλές υπηρεσίες δεδομένων μέσω κινητών συσκευών, που προηγουμένως ήταν διαθέσιμες μόνο μέσω υπολογιστή. Πέρα από την ήδη διαθέσιμη φωνητική επικοινωνία, προσφέρονται υπηρεσίες δεδομένων όπως η περιήγηση στο διαδίκτυο, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, οι τηλεδιασκέψεις και οι χάρτες πλοήγησης. Επέτρεπε ακόμα και την δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο ενώ οι χρήστες εξακολουθούσαν να λαμβάνουν ειδοποιήσεις τηλεφώνου και δεδομένων. Το 1998 ιδρύθηκε η “3rd Generation Partnership Project” (3GPP) με αρχικό σκοπό τη δημιουργία του 3G [14]. Πήρε τα νιά στη συντήρηση και υποστήριξη του 2G και στην ανάπτυξη του 3G. Παράλληλα, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union-ITU), μια από τις σημαντικότερες πολυεθνικές ενώσεις σχετικά με τις τηλεπικοινωνίες που έχει ιστορία από την εποχή του τηλέγραφου, κυκλοφόρησε το παγκόσμιο πρωτόκολλο Διεθνών Κινητών Τηλεπικοινωνιών 2000 (International Mobile Telecommunication 2000-IMT 2000) [18]. Μεταξύ άλλων οι προϋποθέσεις που έθεσε το IMT 2000 ήταν:

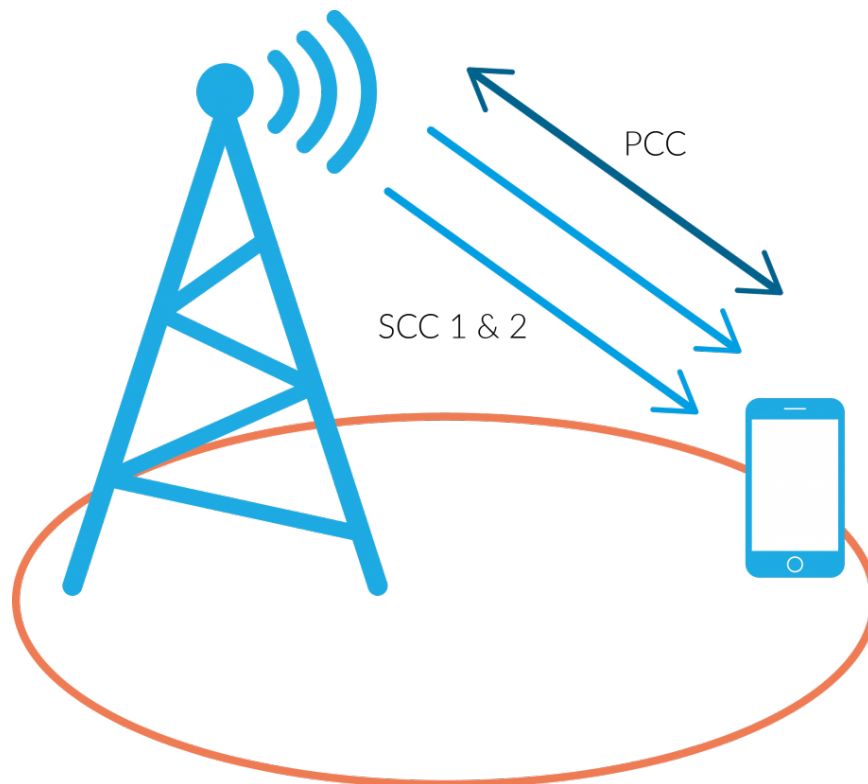


Σχήμα 1.7: Επικοινωνία μέσω ελέγχου ταυτότητας και συμφωνίας κλειδιού [20].

- Υψηλής ποιότητας υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας.
- Εξοπλισμός χρήστη κατάλληλος για παγκόσμια χρήση.
- Φιλικές προς το χρήστη εφαρμογές, υπηρεσίες και εξοπλισμός.
- Δυνατότητα περιαγωγής σε όλο τον κόσμο.
- Βελτιωμένοι ρυθμοί αιχμής δεδομένων.

Η τεχνολογία 3G προσφέρει βελτιωμένα χαρακτηριστικά και υπηρεσίες ασφαλείας. Κύριο μέρισμα της αρχιτεκτονικής του 3G ήταν η κατασκευή ενός συστήματος με δυνατότητα ευέλικτης προσαρμογής σε πιθανές μελλοντικές αλλαγές. Δεδομένου ότι οι άνθρωποι μπορούσαν πλέον να συνδεθούν στο διαδίκτυο μέσω των τηλεφώνων τους, το 3G συνέδεσε για πρώτη φορά τους καταναλωτές με υπηρεσίες νέφους (cloud) για να αποθηκεύουν ασύρματα όλα τα δεδομένα τους χωρίς να υπάρχει η ανάγκη σύνδεσης τους σε κάποια άλλη συσκευή αποθήκευσης δεδομένων [19]. Βέβαια οι περιορισμένες ταχύτητες του 3G δεν το βοήθησαν να εξελιχθεί περαιτέρω. Ο ελεγκτής ραδιοδικτύου (radio network controller) αντικατέστησε τις λειτουργίες ελεγκτή σταθμού βάσης (base station controller-BSC), ενώ ο «κόμβος B» (Node B) (που παρείχε τη σύνδεση μεταξύ κινητών τηλεφώνων και του ευρύτερου τηλεφωνικού δικτύου) αντικατέστησε τις λειτουργίες σταθμού πομποδέκτη βάσης (Base Transceiver Station-BTS). Το 3G, όπως και το 2.75G, χρησιμοποιεί μεταγωγή κυκλώματος για την πραγματοποίηση κλήσεων και αποστολής SMS και μεταγωγή πακέτων (Packet Switching-PS) για την αποστολή δεδομένων (Mail, πρόσβαση στο δίκτυο.).

Το 3G μεταδίδεται στις ίδιες συχνότητες με το 2G (800 MHz, 850 MHz, 900 MHz) καθώς και στα 1700 MHz, 1900 MHz και 2100 MHz και έφερε μεγαλύτερη ανάπτυξη του διαθέσιμου εύρους ζώνης που άγγιξε μέχρι και τα 200 MHz [3].



Σχήμα 1.8: Γραφικό παράδειγμα συνάθροισης φορέων [21].

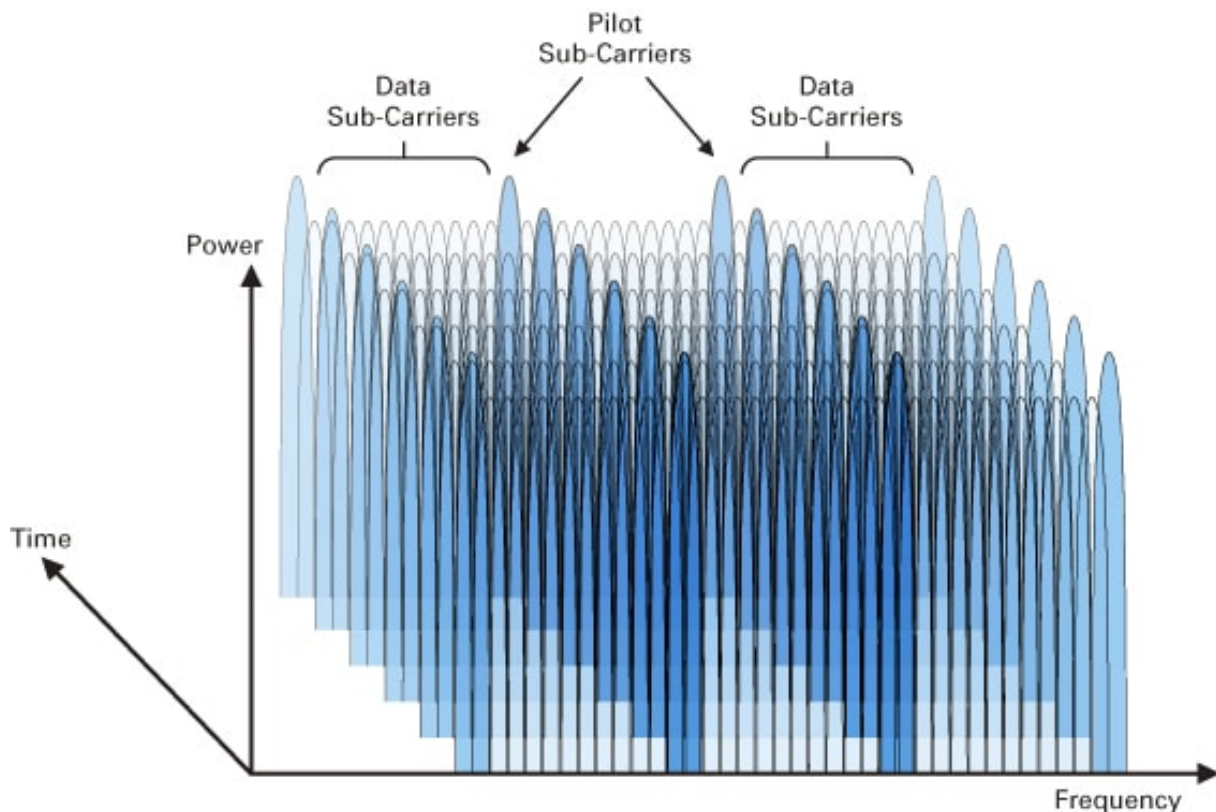
Ίσως μια από τις σημαντικότερες τεχνικές που ανέπτυξε ήταν η συνάθροιση φορέων (carrier aggregation-CA). Η συνάθροιση φορέων (σχήμα 1.8 επιτρέπει σε μια συσκευή να συνδεθεί σε πολλούς φορείς ταυτόχρονα δημιουργώντας έτσι ένα ευρύτερο κανάλι. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της συνάθροισης φάσματος είναι ότι επιτρέπει στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας να κάνουν την βέλτιστη χρήση του υπό άλλες συνθήκες υποχρησιμοποιούμενου φάσματος, το οποίο διαφορετικά θα έμενε αχρησιμοποίητο. Αυτό βοηθά στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου, επιτρέποντας αυξημένη χωρητικότητα, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η συνάθροιση φορέων μπορεί επίσης να βοηθήσει στη βελτίωση της κάλυψης σε περιοχές όπου υπάρχει αδύναμο ή ασταθές σήμα. Με τη χρήση πολλαπλών φορέων, αυξάνονται ραγδαία οι πιθανότητες να βρεθεί ένα αξιοπρεπές σήμα, κάτι που μπορεί να είναι σωτήριο για όσους ζουν σε αγροτικές περιοχές ή ταξιδεύουν συχνά. Για περιπτώσεις ασθενούς σήματος πρωτοεμφανίστηκαν ακόμα και οι κλήσεις ασύρματης πιστότητας (Wifi calling) που επέτρεπαν τους χρήστες να χρησιμοποιήσουν το σταθερό δίκτυο του σπιτιού ή του χώρου εργασίας τους (το οποίο στην συνέχεια συνδέονταν με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας του παρόχου), έναντι του ασύρματου.

Πολλές τεχνολογίες ασφάλειας του 2G επαναχρησιμοποιήθηκαν στο 3G με την 3GPP να επιτυγχάνει σημαντικές βελτιώσεις στα ψεγάδια ασφαλείας του 2G. Συγκεκριμένα, το 3G περιλαμβάνει τον αμφίδρομο έλεγχο ταυτότητας και τον έλεγχο ταυτότητας και συμφωνίας κλειδιού (Authentication and Key Agreement-AKA). Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7, στην επικοινωνία μεταξύ 2 χρηστών, οι χρήστες χρησιμοποιούν έναν τοπικό διακομιστή (server) ως πυλώνα εμπιστοσύνης εφαρμόζοντάς έτσι μια αρχαϊκή μορφή της σημερινής επαλήθευσής με 2 βήματά (2-factor authentication). Επιπρόσθετα, καθιερώθηκε ένα πλήρες σύστημα ασφαλείας ελέγχου πρόσβασης, συμπεριλαμβανομένης της ασφαλείας διεπαφής αέρα και του ελέγχου ταυτότητας χρήστη. Η ασφάλεια της διεπαφής αέρα χρησιμοποιείται για την προστασία των επικοινωνιών μέσω ασύρματων συνδέσεων και χρηστών. Ταυτόχρονα, παρέχει μια αμφίδρο-

τον κόσμο βρίσκονται στη διαδικασία τερματισμού των 3G δικτύων τους. Το 4G είναι σήμερα η πιο κοινώς χρησιμοποιούμενη γενιά τηλεφωνίας. Ο όρος 4G χρησιμοποιείται ευρέως για να συμπεριλάβει διάφορους τύπους ευρυζωνικών συστημάτων επικοινωνίας ασύρματης πρόσβασης, όχι μόνο συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Το 4G βασίζεται σε τεχνολογίες, όπως το προαναφερόμενο LTE και το WiMAX, μια τεχνολογία παρομοιότυπη με το “Wireless Fidelity” (Wifi), αλλά διαμορφωμένη για πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια [24]. Το 2003 η ITU κυκλοφόρησε το MTU-advanced, τις προ-απαιτήσεις για την τέταρτη γενιά τηλεπικοινωνιών. Η ITU οραματίστηκε τις ανάγκες των χρηστών που θα προέκυπταν τα επόμενα χρόνια και διαμόρφωσε τις απαιτήσεις της ανάλογα. Κύρια προϋπόθεση ήταν η ικανοποίηση της αυξανόμενης ανάγκης για περισσότερες εφαρμογές προσανατολισμένες σε δεδομένα και βίντεο. Το παραπάνω προϋποθέτει σαφώς μια ραγδαία αύξηση του ρυθμού δεδομένων (100 Mbps ανά χρήστη) [25]. Επιπρόσθετα το δίκτυο θα πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκρίνεται σε χρήστες που έχουν κινητικότητα μέχρι και 350 km/h. Η μέγιστη καθυστέρηση στο επίπεδο ελέγχου (μεταβολή από την αδράνεια στην ενεργή κατάσταση) πρέπει να είναι 100 ms [26]. Με γνώμονα τα παραπάνω, αναπτύχθηκε για πρώτη φορά για μαζική χρήση το 2009 στην Νορβηγία και την Σουηδία και γρήγορα εξαπλώθηκε στον υπόλοιπο κόσμο. Με την έλευση του 4G εισήχθηκε η ιδέα του διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of things-IoT). Το IoT αναφέρεται σε ένα δίκτυο φυσικών συσκευών, οχημάτων και άλλων φυσικών αντικειμένων που είναι ενσωματωμένα με αισθητήρες, έξυπνο λογισμικό και συνδεσιμότητα δικτύου που τους επιτρέπει να συλλέγουν και να μοιράζονται δεδομένα. Αυτές οι συσκευές (γνωστές και ως έξυπνες συσκευές) μπορούν να κυμαίνονται από απλές οικιακές συσκευές “έξυπνου σπιτιού” (Smart Home) όπως έξυπνοι θερμοστάτες, φορητές συσκευές όπως, έξυπνα ρολόγια και ρούχα έως και πολύπλοκα βιομηχανικά μηχανήματα και συστήματα μεταφοράς και ασφάλειας. Οι τεχνολόγοι οραματίζονται ακόμη και ολόκληρες «έξυπνες πόλεις» βασισμένες στις τεχνολογίες IoT. Το IoT επιτρέπει σε αυτές τις έξυπνες συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους (όπως παριστάνεται και στο σχήμα 1.9) και με άλλες συσκευές με δυνατότητα σύνδεσης στο Διαδίκτυο, όπως έξυπνα τηλέφωνα και πύλες, δημιουργώντας ένα τεράστιο δίκτυο διασυνδεδεμένων συσκευών που μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα και να εκτελούν μια ποικιλία εργασιών αυτόνομα.

Με μέγιστη θεωρητική ταχύτητα ανά χρήστη 1 Gbps σε αραιοκατοικημένες περιοχές και μέση ταχύτητα 100 Mbps σε περιοχές υψηλής συμφόρησης, η χρήση του υπολογιστικού νέφους γίνεται ακόμη περισσότερο προσιτή [27]. Η προτεραιότητα κατά την δημιουργία του 4G ήταν το καλύτερο σήμα και ο περιορισμός των πληροφοριών και δεδομένων που χάνονται κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας καθώς και των εσφαλμένων bit. Έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων που επί του παρόντος κυμαίνονται από 450 MHz έως 5.8 GHz (sub 6GHz) και έχει μέγιστο εύρος ζώνης 150 MHz. Το 4G, σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές, είναι πλήρως βασισμένο σε “διευθύνσεις διαδικτυακού πρωτοκόλλου” (Ip based) και χρησιμοποιεί εξ’ ολοκλήρου μεταγωγή πακέτου. Ο κύριος λόγος μετάβασης σε Ip Based δίκτυο ήταν η ανάγκη ύπαρξης μιας κοινής πλατφόρμας για όλες τις τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα και όλες όσες επρόκειτο να αναπτυχθούν.

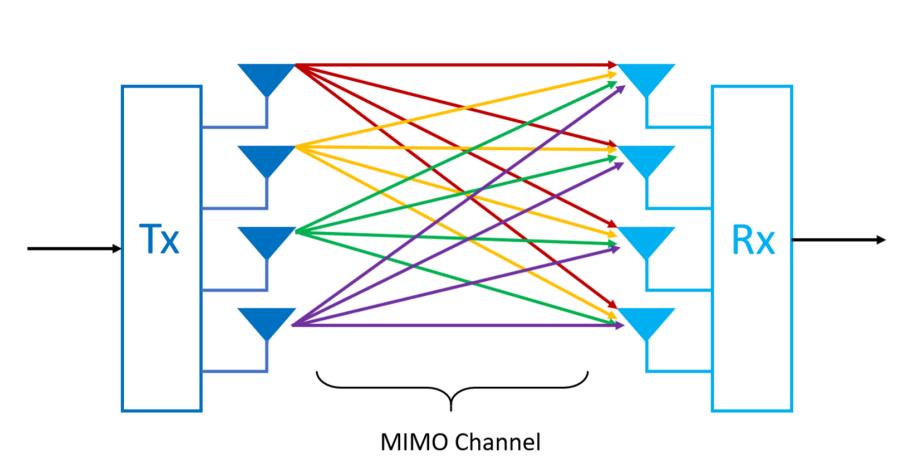
Η μεταγωγή πακέτου (Packet Switching) είναι μια μέθοδος επικοινωνίας όπου τα δεδομένα χωρίζονται σε μικρότερες μονάδες οι οποίες ονομάζονται πακέτα και μεταδίδονται μέσω του δικτύου. Κάθε πακέτο περιέχει τις διευθύνσεις προέλευσης και προορισμού, καθώς και άλλες πληροφορίες, όπως τον αριθμό πακέτου (segment number) που απαιτούνται για τη δρομολόγηση. Τα πακέτα ενδέχεται να ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές για να φτάσουν στον προορισμό τους ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Έτσι, εξαλείφεται η ανάγκη δημιουργίας αποκλειστικής διαδρομής για την επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του κόστους και την βελτιστοποίηση χρήσης του διαθέσιμου εύρους



Σχήμα 1.10: OFDMA με τεχνολογία LTE [29].

ζώνης [19]. Λόγο της μεταγωγής πακέτου, όταν μια συσκευή συνδεδεμένη στο 4G πραγματοποιούσε ή λάμβανε κάποια κλήση ή μήνυμα, αναγκαζόταν να συνδεθεί σε δίκτυο 3ης ή 2ης γενιάς για την διάρκεια την κλήσης. Το παραπάνω αντιμετωπίστηκε με την χρήση της φωνής μέσω LTE (Voice over LTE-VoLTE) [9]. Για την διαμόρφωση της συχνότητας χρησιμοποιείται κυρίως η τεχνική Ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDMA), μια ενημερωμένη έκδοση της τεχνολογίας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (FDMA) που χρησιμοποιείται για τη διαίρεση των πακέτων σε ξεχωριστές ζώνες που μεταφέρονται από ξεχωριστά σήματα. Το OFDMA (μέσω αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier) επιλέχθηκε για να χειριστεί αποτελεσματικά την πολλαπλή πρόσβαση χρηστών, η οποία χωρίζει το φάσμα σε υποκανάλια με απόσταση 15 KHz. Η χρήση OFDMA είναι αυτό που χαρακτηρίζει και αναδεικνύει περισσότερο ένα δίκτυο 4ης γενιάς από τα δίκτυα των προηγούμενων γενιών. Αντί για την παραδοσιακή αναλογική διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στην πολυπλεξία, το OFDMA χρησιμοποιεί κύματα σήματος φέροντος, που ονομάζονται υποφορείς, για να μετακινήσει μικρά κομμάτια πληροφοριών με πιο βελτιωμένο τρόπο, επιτυγχάνοντας υψηλότερη απόδοση συχνότητας [28]. Το OFDMA διαμορφώνει τα σήματα έτσι ώστε οι φορείς ίδιου πλάτους να διαχωρίζονται σε συχνότητα ελάχιστα, ώστε τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης που προκύπτουν από τη μία συχνότητα να είναι αμελητέα στις συχνότητες των άλλων φορέων, αποφεύγοντας έτσι την παρεμβολή διασυμβόλων. Το 4G επωφεληθήκε σε τεράστιο βαθμό από την συνάθροιση φορέων καλύπτοντας έτσι τις καινούργιες ανάγκες ταχύτητας. Μια τυπική απόκριση συχνότητας του OFDMA σε δίκτυο 4G φαίνεται στο σχήμα 1.10.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του 4G είναι η ενσωμάτωση κεραιών τύπου πολλών εισόδων και πολλών εξόδων (Multiple Input Multiple Output-MIMO). Το MIMO είναι μια ραδιοφωνική τεχνολογία για ασύρματες επικοινωνίες όπου χρησιμοποιούνται πολλές κεραιές στο άκρο του πομπού και πολλαπλές κεραιές



Σχήμα 1.11: Απλή λειτουργία ενός 4x4 MIMO [30].

στο άκρο του δέκτη (όποτε αυτό είναι διαθέσιμο) για να αυξηθεί η ποιότητα, η απόδοση και η χωρητικότητα της ραδιοζεύξης. Το MIMO πολλαπλών χρηστών (Multiple-MIMO) αυξάνει τη χωρητικότητα του δικτύου στέλνοντας πολλαπλές ροές σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα στον ίδιο χρόνο καθώς και στην ίδια συχνότητα [27]. Η 3GPP, καθόρισε για πρώτη φορά το MIMO για LTE το 2008, όταν το MIMO βρισκόταν στην όγδοη έκδοσή του. Αυτή η αρχική παραλλαγή χρησιμοποιούσε δύο πομπούς και δύο δέκτες 2x2 (MIMO), ωστόσο μεταγενέστερες αυξήσεις στην επεξεργαστική ισχύ επέτρεψαν τη χρήση περισσότερων ταυτόχρονων ροών δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα με τα τρέχοντα δίκτυα 4G LTE να χρησιμοποιούν μέχρι και 4x4 MIMO (σχήμα 1.11) [9]. Οι κεραιές του σταθμού βάσης είναι συνήθως εξοπλισμένες με περίπου 12 θύρες μικροκεραίας που εκπέμπουν πληροφορίες προς κάθε κατεύθυνση ταυτόχρονα. Τεχνολογίες όπως το 802.11n (πρωτόκολλο Wireless Fidelity-Wi-Fi 2.4GHz και 5GHz) και το 802.16 (Worldwide Inter-operability for Microwave Access-Wi-Max) χρησιμοποιούν MIMO [27].

Στα MIMO δίκτυα τέταρτης γενιάς αξιοποιήθηκε σε ευρύ κλίμακα η τεχνική σχηματισμού ακτίνων (beamforming). Ο σχηματισμός ακτίνων είναι μια τεχνολογία MIMO που εστιάζει το μεταδιδόμενο σήμα σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις, βελτιώνοντας την ισχύ και την ποιότητα του σήματος στον δέκτη [31]. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω αναλογικών και ψηφιακών τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης, επιτρέποντας καλύτερη κάλυψη, μειωμένες παρεμβολές και αυξημένη χωρητικότητα δικτύου [32]. Στα πλαίσια του σχηματισμού ακτίνων χρησιμοποιείται επίσης προ-κωδικοποίηση (pre-coding) από την μεριά του πομπού και μετα-κωδικοποίηση (post-coding) από την μεριά του δέκτη με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης της σύνδεσης μετριάζοντας τις παρεμβολές και βελτιώνοντας την ποιότητα του σήματος [33,34]. Ο προ-κωδικοποιητής συγκεκριμένα, καθίσταται αναπόσπαστο κομμάτι τον MIMO σε περιβάλλον πολλών χρηστών καθώς είναι αναγκαίος για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των χρηστών [35]. Χρησιμοποιήθηκε ακόμα η χωρική διαμόρφωση (Spatial Modulation) που είναι μια τεχνική MIMO η οποία χρησιμοποιεί τον χωρικό τομέα για να μεταφέρει πληροφορίες ενεργοποιώντας επιλεκτικά συγκεκριμένες κεραιές [36]. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματικότερη χρήση των διαθέσιμων χωρικών πόρων και βελτιστοποιεί τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων [37]. Στο σχήμα 1.12 παριστάνεται μια τυπική κεραιά MIMO 4G.

Στο 4G τέθηκαν για πρώτη φορά σε χρήση μικροκυψέλες (small cells). Αρχικά, τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιούσαν κυρίως μακροκυψέλες (macrocells) Όταν μιλάμε για μικροκυψέλες και



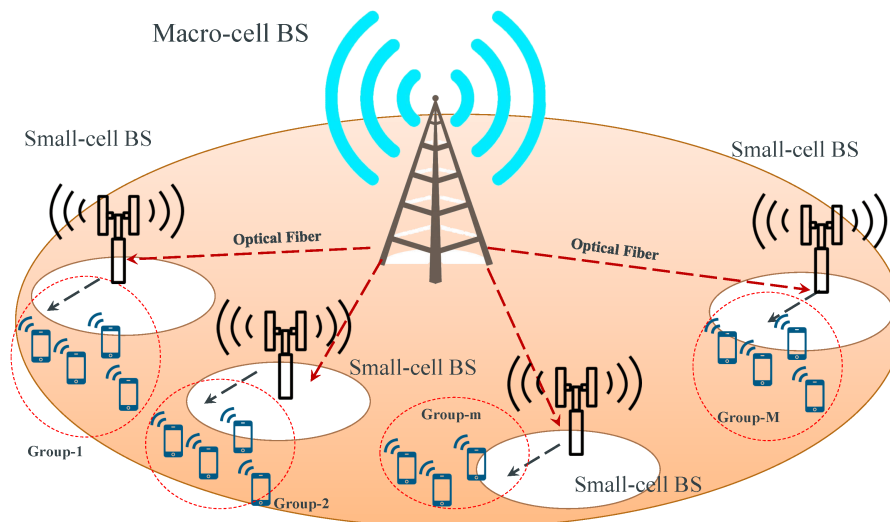
Σχήμα 1.12: Μια 4G 4x4 κεραία MIMO [38].

μακροκυψέλες, ουσιαστικά μιλάμε για διαφορετικούς τύπους σταθμών βάσης.

Ένα macrocell είναι μέρος του δικτύου ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network-RAN) και παρέχει ραδιοκάλυψη για το δίκτυο. Εκπέμπει και λαμβάνει σήματα χρησιμοποιώντας MIMO. Λειτουργεί μέσω μιας κεραίας που είναι τοποθετημένη σε έναν πύργο 4G, συνήθως ύψους 15 έως 60 μέτρα. Οι δυνατότητές του του επιτρέπουν να συνδέει δισεκατομμύρια συσκευές μειώνοντας παράλληλα την καθυστέρηση (latency) και τον χρόνο απόκρισης (responce time). Τα Macrocells χρησιμοποιούνται εδώ και χρόνια ως μέρος του δικτύου ραδιοπρόσβασης, επιτρέποντας την υπηρεσία 4G LTE και παρέχοντας ραδιοκάλυψη για το δίκτυο. Αυτές οι θέσεις κυψελών αναπτύσσονται συνήθως ψηλότερα από τα γύρω κτίρια ή το έδαφος για να αποφευχθεί οποιοδήποτε εμπόδιο στο σήμα, όπως οι στέγες.

Τα small cells ανάλογα με το είδος τους, έχουν μέγιστη εμβέλεια από 20 μέχρι 3000 μέτρα στο 4G και από 10 μέχρι 1600 μέτρα στο 5G. Οι σταθμοί βάσης μικρών κυψελών, γνωστοί ως πομποδέκτες, τείνουν να έχουν εξαιρετικά χαμηλή ισχύ και υλοποιούνται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και είναι φθηνότεροι και πολύ πιο γρήγοροι στην ανάπτυξη από τα μεγαλύτερα macrocells. Αυτοί οι κόμβοι 4G προσφέρουν πολλές από τις ίδιες δυνατότητες των παραδοσιακών σταθμών βάσης. Είναι περίπου το μέγεθος ενός κουτιού πίτσας και παρέχουν υψηλή ταχύτητας και χειρισμό υψηλών ρυθμών δεδομένων. Η ανάπτυξη μικρών κυψελών 4G γίνεται σε τοπική κλίμακα, μεταδίδοντας ραδιοσήματα για την παροχή υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας και διαδικτύου σε μικρές γεωγραφικές περιοχές. Οι μικρές κυψέλες μεταδίδουν σήματα χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές MIMO και beamforming. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο μικρής κυψέλης, μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν σταθμοί εκπομπής χαμηλής ισχύος. Μπορούν να τοποθετηθούν σε τοίχους για εφαρμογές εσωτερικού χώρου ή σε λαμπτήρες σε εξωτερικούς χώρους [39].

Οι μικρές κυψέλες είναι η ραχοκοκαλιά του 4G και μετέπειτα και του 5G δικτύου και συμπληρώνουν τα μακροκύτταρα. Ανάλογα με τον σκοπό χρήσης η ισχύς μετάδοσης και ο μέγιστος αριθμός χρηστών τους κυμαίνονται από 20 dBm και 8 ταυτόχρονους χρήστες μέχρι 40 dBm και 400 χρήστες [40]. Μι-



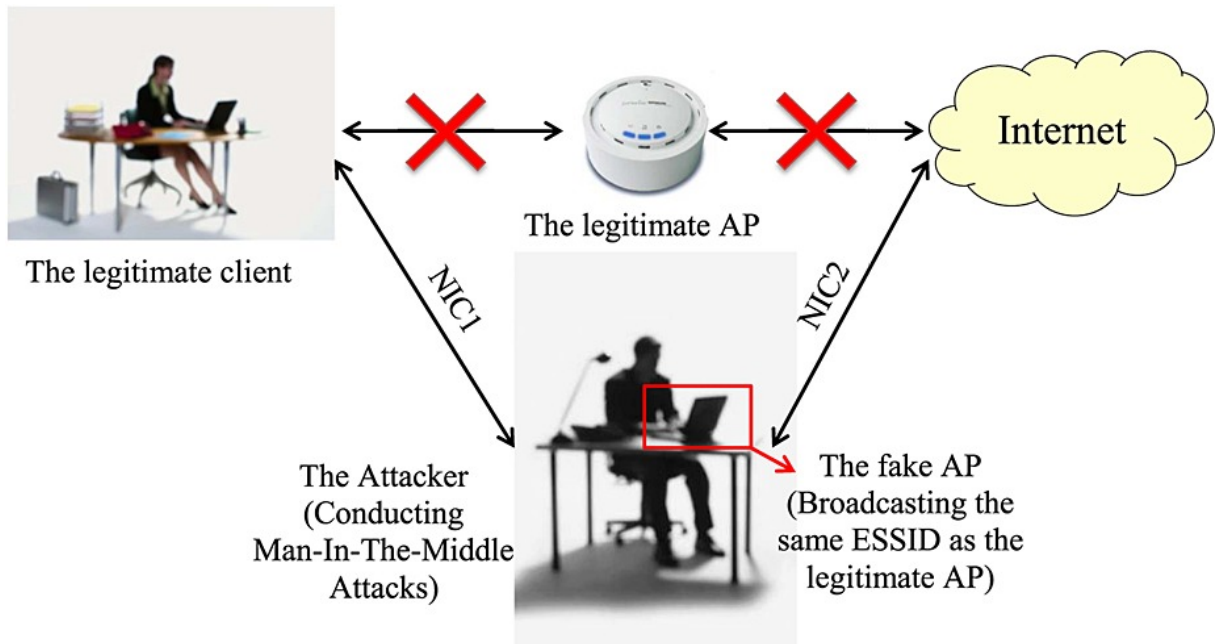
Σχήμα 1.13: Παραδοσιακή τοπολογία δικτύου με macrocell σταθμό βάσης [44].

Προδιαγραφές	Small Cell	Macrocell
Ισχύς μετάδοσης	20-40 dBm	45dBm
Απόσταση κάλυψης	0.03-3 km	32 km
Χώρος εφαρμογής	Εσωτερικός-Εξωτερικό	Εξωτερικός
Μεγίστη ποσότητα χρηστών	8-400	2000+
Εγκατάσταση από	Χρήστη-Πάροχο	Πάροχο
Κατανάλωση ενέργειας	Χαμηλή-Μέτρια	Υψηλή

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά τύπων σταθμών βάσεων. [45].

κρές κυψέλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ιδιωτικούς σκοπούς (γραφεία εργασίας, σπίτια) καθώς και για δημόσια χρήση (αεροπλάνα, νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα) [41]. Εκτός από τη βελτίωση της χωρητικότητας του δικτύου για πυκνοκατοικημένες περιοχές, είναι ιδανικά για περιοχές όπου τα σήμα μακροκεραίας είναι αδύναμο ή δεν είναι καθόλου διαθέσιμο. Και τα δύο είδη κυψελών απαιτούνται για τη δημιουργία ενός ετερογενούς δικτύου. Δηλαδή, ένα δίκτυο όπου όλες οι κυψέλες, από μικρο έως μακρο, μπορούν να λειτουργήσουν συνεργατικά (σχήμα 1.13) [42]. Αυτό σημαίνει ότι τα μικρά κελιά μπορούν να λάβουν τη σύνδεσή τους μέσω macrocells, πριν στείλουν δεδομένα σε ένα άλλο μικρό κελί [43]. Αυτό επιτρέπει στα μικρά κύτταρα να μεταφέρουν σήματα σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Στον πίνακά 1.1 παρατίθενται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των small cells και macrocells.

Τα κύρια προβλήματα ασφάλειας 4G είναι απειλές ασύρματης ραδιοεπικοινωνίας, υποκλοπής, αλλαγής δεδομένων και ελέγχου ταυτότητας δικτύου. Λόγω της αυξημένης έμμεσης αλληλεπίδρασης μεταξύ χρηστών και τερματικών κινητής τηλεφωνίας, το δίκτυο 4G είναι πιο ευάλωτο σε ζητήματα ασφάλειας από τις προηγούμενες γενιές δικτύων. Συγκεκριμένα, (καθώς ο χρήστης πολλές φορές συνδέεται σε αναμεταδότες (Access Points-AP) αντί για απευθείας ζεύξη με τον τερματικό σταθμό) επιθέσεις τύπου “man in the middle” γίνονται ολοένα και πιο συχνές. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.14 το κακόβουλο άτομο μπορεί εύκολα να προσποιηθεί ότι είναι το AP και να υποκλέψει δεδομένα και προσωπικά στοιχεία [46]. Τα πρότυπα 4G και τα κρίσιμα πρωτόκολλα διαχείρισης αντιμετωπίζουν διαφορετικές ευπάθειες στο επίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσου (Media Access Control-MAC), συμπεριλαμβανομένων των επιθέσεων υποκλοπής. Τα δίκτυα 4G είναι επίσης ευάλωτα σε επιθέσεις ακεραιότητας δεδομένων και



Σχήμα 1.14: Μια επίθεση τύπου man-in-the-middle σε δίκτυο 4G [46].

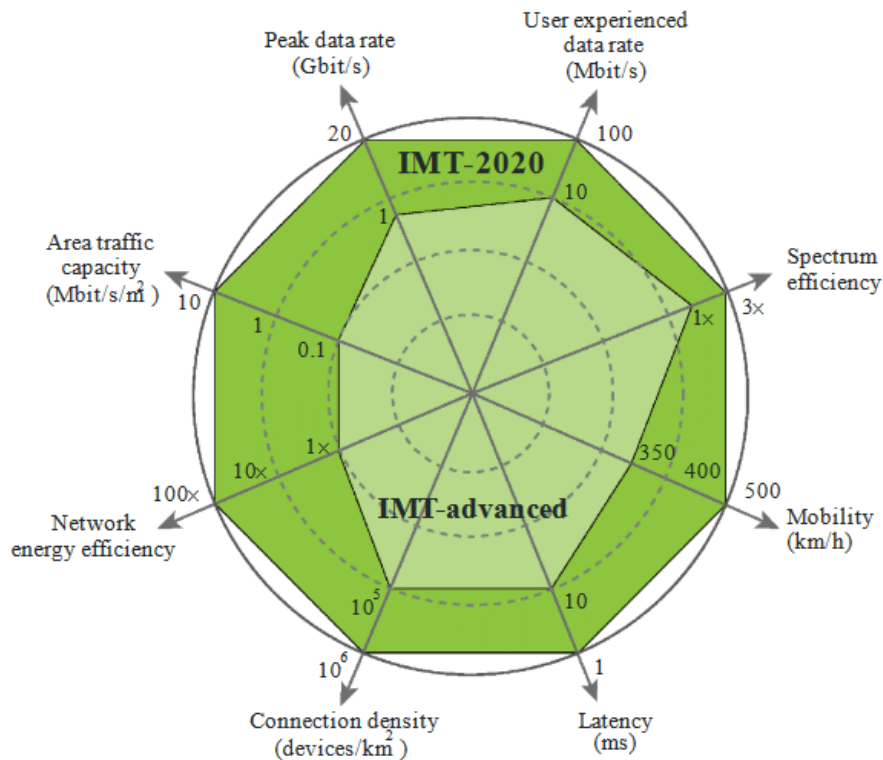
παρακολούθησης τοποθεσίας χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα του επιπέδου MAC [10].

- Κινητή τηλεφωνία πέμπτης γενιάς (5G).

Οι προσδοκίες που τέθηκαν για το 3G και το 4G αντίστοιχα, δεν ικανοποιήθηκαν στην πράξη από τα χαρακτηριστικά τους, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί η ανάγκη σχεδιασμού ενός νέου δικτύου βασιζόμενου στην αρχιτεκτονική του δικτύου 5ης γενιάς (5G) [24]. Το 2010 υπολογίζεται ότι υπήρχαν τέσσερις φορές περισσότεροι συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας σε σύγκριση με σταθερές τηλεφωνικές γραμμές [47] κάνοντας έτσι φανερή την ανάγκη ενός υπερσύγχρονου δικτύου ικανό να αντεπεξέλθει σε αυτήν την αυξανόμενη ζήτησή (σχήμα 1.15).

Οι απαιτήσεις συστήματος της ITU, IMT-2020 για τις τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (Radio Access Technologies-RAT) οριστικοποιήθηκαν και υιοθετήθηκαν στην έκθεση ITU-R M.2410-0 το 2017 [48]. Μετά από αυτό, οι προγραμματιστές των RAT, μαζί με την 3GPP ανέπτυξαν τεχνολογίες 5G για να πληρούν αυτές τις απαιτήσεις. Στο σχήμα 1.15 παριστάνονται οι απαιτήσεις αυτές.

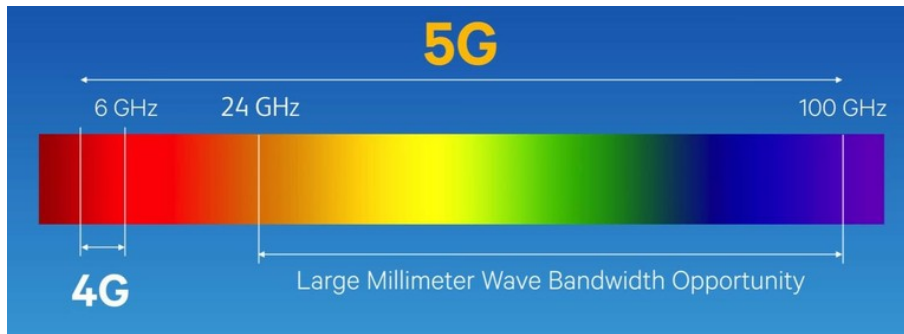
Στο 5G εφαρμόζεται το μαζικό multiple input-multiple output (massive mimo) που δεν είναι παρά μια μεγενθυμένη μορφή του MIMO [24]. Για να χαρακτηριστεί το MIMO μαζικό, ο αριθμός των κεραιών πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 64. Ο κανόνας των μεγάλων αριθμών χρησιμοποιείται στα μαζικά MIMO για να διασφαλιστεί ότι όταν τα σήματα από πολλές κεραιές συγχωνεύονται στον αέρα, τα ελαττώματα του καναλιού και του υλικού (όπως θόρυβος, εξασθένιση και θέματα εξοπλισμού) μπορούν να υπολογίζονται κατά μέσο όρο [9]. Τα μαζικά MIMO βασίζονται σε τρεις βασικές έννοιες: την χωρική ποικιλομορφία, την χωρική πολυπλεξία (spacial multiplexing) και την διαμόρφωση δέσμης. Τα διάφορα ανακλώμενα σήματα θα φτάσουν στην κεραία λήψης σε διαφορετική χρονική στιγμή, με διαφορετικά επίπεδα εξασθένισης λόγω διαφορετικών εμποδίων που έχουν εφόσον διανύουν πολλαπλές διαδρομές. Όταν υπάρχουν πολλαπλές κεραιές λήψης, κάθε κεραία λαμβάνει μια ελαφρώς διαφορετική έκδοση του



Σχήμα 1.15: Οι απαιτήσεις του IMT advanced σε σύγκριση με του IMT 2020 [49].

σήματος, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν μαθηματικά για τη βελτίωση της ποιότητας του ολικού μεταδιδόμενου σήματος. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως χωρική ποικιλομορφία, καθώς οι κεραιές των δεκτών είναι χωρικά διαχωρισμένες μεταξύ τους. Η χωρική ποικιλομορφία επιτυγχάνεται επίσης με τη μετάδοση του ραδιοφωνικού σήματος σε πολλαπλές κεραιές, με κάθε κεραιά, σε ορισμένες περιπτώσεις, να στέλνει τροποποιημένες εκδόσεις του σήματος. Ενώ η χωρική ποικιλομορφία αυξάνει την αξιοπιστία της ραδιοζεύξης, η χωρική πολυπλεξία αυξάνει τη χωρητικότητα της ραδιοζεύξης χρησιμοποιώντας τις πολλαπλές διαδρομές μετάβασης ως πρόσθετα κανάλια για τη μεταφορά δεδομένων. Η χωρική πολυπλεξία επιτρέπει την αποστολή πολλαπλών, μοναδικών ροών δεδομένων μεταξύ του πομπού και του δέκτη, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση και επίσης επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες του δικτύου να υποστηρίζονται από έναν μόνο πομπό, εξού και ο όρος Multiple-MIMO [33]. Ο τεράστιος αριθμός κεραιών ενός μαζικού συστήματος MIMO επιτρέπει τη διαμόρφωση τρισδιάστατης δέσμης, η οποία παράγει τόσο οριζόντιες όσο και κάθετες δέσμες προς τους συνδρομητές, βελτιώνοντας τις ταχύτητες (και τη χωρητικότητα) δεδομένων για όλους τους συνδρομητές, κάτι το οποίο χρήζει ιδιαίτερα χρήσιμο σε μητροπολιτικά περιβάλλοντα με υψηλές οροφές [9].

Το 5G χρησιμοποιεί κύματα χιλιοστών. Τα κύματα χιλιοστών γνωστά και ως mmWaves είναι ένα συγκεκριμένο κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιείται για τον αυξημένο ρυθμό δεδομένων που παρέχουν. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές ασύρματης τεχνολογίας όπου η συχνότητα δεν ξεπερνούσε τα 6 GHz (sub 6 GHz bands), το 5G χρησιμοποιεί ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων, το οποίο δεν χρησιμοποιείται από άλλες συσκευές, για να παρέχει μεγαλύτερες ταχύτητες, χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο και μεγαλύτερη χωρητικότητα για μετάδοση δεδομένων. Το εύρος ζώνης έχει μέγιστη τιμή τα 4 GHz. Τα κύματα χιλιοστού αναφέρονται στα ραδιοκύματα που εμπίπτουν στην περιοχή συχνοτήτων από 30 έως 300 GHz, που αντιστοιχεί σε μήκη κύματος από 1 έως 10 χιλιοστά. Το

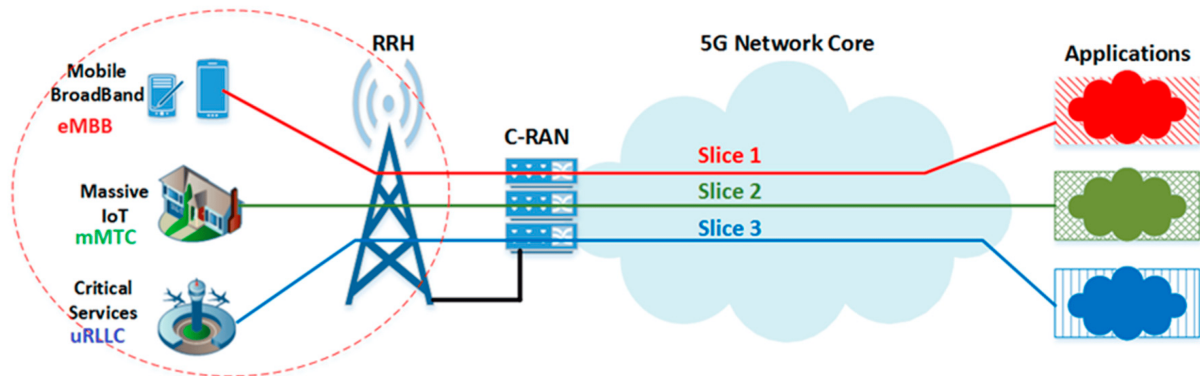


Σχήμα 1.16: Το διαθέσιμο φάσμα του 5G σε σύγκριση με το 4G [50].

διαθέσιμο φάσμα του 5G σε σύγκριση με το 4G διακρίνεται στο σχήμα 1.16. Αυτά τα κύματα έχουν μικρότερα μήκη κύματος σε σύγκριση με τις ζώνες χαμηλότερης συχνότητας που χρησιμοποιούνται σε παλαιότερες ασύρματες τεχνολογίες όπως το 4G LTE.

Όπως προαναφέρθηκε το 5G φτάνει σε πολύ υψηλότερες συχνότητες που επιτρέπουν μεγαλύτερες ταχύτητες επικοινωνίας. Επιπρόσθετα, διευρύνθηκε ραγδαία το διαθέσιμο εύρος ζώνης, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να υποστηριχτεί μεγαλύτερος αριθμός συσκευών ταυτόχρονα, συγκεκριμένα έως και 1 εκατομμύριο συσκευές [51]. Το IoT είναι ένα κολοσσιαίο μέρος του 5G και θα αναπτύξει όχι μόνο συνδεδεμένες συσκευές στο σπίτι, αλλά συσκευές από όλο τον κόσμο από όλους τους διαφορετικούς τομείς και βιομηχανίες [24]. Το 5G εκπέμπει και σε παρόμοιες συχνότητες με το 4G στην αρχιτεκτονική Sub 6 GHz. Το 5G βελτιώνει την αρχιτεκτονική ασφάλειας και τις μεθόδους ελέγχου ταυτότητας, ενώ αντιμετωπίζει πολλά ελαττώματα του 4G. Το 5G είναι το πρώτο πρότυπο που χρησιμοποιεί ενοποιημένο έλεγχο ταυτότητας. Υποστηρίζονται όλα τα δίκτυα WiFi, καλωδιακά και 3GPP δίκτυα. Το 5G χρησιμοποιεί το κρυφό αναγνωριστικό συνδρομητή (Subscriber Concealed Identifier-SUCI) κατά τον έλεγχο ταυτότητας, μια κρυπτογραφημένη παραλλαγή του Μόνιμου Αναγνωριστικού Συνδρομητή (Subscription Permanent Identifier-SUPI) [52]. Κατά συνέπεια, μη κρυπτογραφημένα δεδομένα δεν αποστέλλονται σε δίκτυα 5G αυξάνοντάς την ασφάλεια του δικτύου. Τα ελαττώματα του 5G και η πολυπλοκότητα του 5G δημιουργούν προβλήματα ασφάλειας. Το AKA αποτυγχάνει φέρει εις πέρας κρίσιμους στόχους στο 5G. Για παράδειγμα, το κανάλι μεταξύ του δικτύου εξυπηρέτησης και του οικιακού δικτύου δεν περιορίζεται. Ένας εισβολέας μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτό το ψεγάδι για να χρεώσει έναν άλλο χρήστη για πρόσβαση στο δίκτυο [10].

Το 5G εισάγει ακόμα την έννοια του τεμαχισμού δικτύου (σχήμα 1.17), η οποία επιτρέπει στους χρήστες δικτύου να διαιρούν την υποδομή τους σε πολλαπλά εικονικά δίκτυα. Η ροή βίντεο, η απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση και η έξυπνη μέτρηση έχουν όλες διαφορετικές ανάγκες όσον αφορά την ποιότητα της υπηρεσίας και την ποιότητα της εμπειρίας. Ως εκ τούτου, το δίκτυο πρέπει να ανταποκρίνεται σε μια ποικιλία υπηρεσιών. Μέχρι και το 4G, ο κεντρικός στόχος του κυψελοειδούς δικτύου ήταν να κάνει το δίκτυο να φαίνεται αποφασιστικό, δηλαδή να περιορίζεται σε ορισμένες συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης, παρέχοντας συνδεδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας [53]. Αντιθέτως, κάθε τμήμα του δικτύου 5G μπορεί να προσαρμοστεί, όπως το εύρος ζώνης, η ταχύτητα και η μέγιστη επιθυμητή καθυστέρηση, ώστε να πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις και να καλύψει διαφορετικές εφαρμογές [54]. Οι υπηρεσίες διαχωρίζονται ανάλογα με την σημαντικότητά τους όπως αναπαριστάται και στο σχήμα 1.17. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη υποστήριξη διαφορετικών υπηρεσιών, που κυμαίνονται από αυτόνομα οχήματα



Σχήμα 1.17: Τεμαχισμός 5G Δικτύου ανάλογα με την ανάγκη συνάφειας [56].

έως βιομηχανικούς αυτοματισμούς [24]. Επιπρόσθετα, στο 5G εμφανίστηκε ο Δυναμικός τεμαχισμός δικτύου (Dynamic network slicing). Ο δυναμικός τεμαχισμός δικτύου δίνει την δυνατότητα σε έναν χειριστή δικτύου να επιτρέψει σε αποκλειστικά εικονικά δίκτυα να υποστηρίξουν τη βελτιστοποιημένη παροχή οποιασδήποτε υπηρεσίας σε ένα ευρύ φάσμα χρηστών, οχημάτων, μηχανών και βιομηχανιών. Ο δυναμικός τεμαχισμός δικτύου είναι εφικτός χάρις την δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό καθώς και εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου (network function virtualization) [55].

Η υπολογιστική νέφος (cloud computing) έχει κερδίσει αξιοσημείωτη αναγνώριση καθώς παρέχει πανταχού παρούσα πρόσβαση σε έναν κοινόχρηστο σωρό προσαρμόσιμων υπολογιστικών πόρων με τη σημαντικά μικρότερη ανάγκη συντήρησης. Καθώς τα δίκτυα γίνονται ολοένα και πιο πυκνά, λόγω της αύξησης των χρηστών και κατά συνέπεια των συσκευών, τα σενάρια παρεμβολών αυξάνονται ραγδαία [53]. Το οικοσύστημα υπολογιστικού νέφους βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στους Παρόχους Υπηρεσιών (Service Providers-SP) και στους Παρόχους Υποδομής (Infrastructure Providers) [57]. Το Cloud computing θεωρείται ως λύση για έξυπνες συσκευές που δεν μπορούν να χειριστούν μεγάλους όγκους δεδομένων, καθώς αντιμετωπίζει τη δυσκολία υπολογισμού. Στο 5G, το υπολογιστικό νέφος μπορεί να βοηθήσει στην περίπλοκη συντήρηση των πυκνών δικτύων. Με κεντρικό τρόπο, διαχειρίζεται στοιχεία δικτύου, συλλέγει δεδομένα και συνθέτει τις απαραίτητες προδιαγραφές.

Επιπρόσθετα, το 5G εισήγαγε την Δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (Software Defined Networking-SDN), η οποία είναι μια μοναδική έξυπνη αρχιτεκτονική για δίκτυα με σκοπό την μείωση των περιορισμών υλικού. Τα παραδοσιακά δίκτυα IP, παρά την ευρεία υιοθέτησή τους, είναι απίστευτα πολύπλοκα και απαιτητικά στη λειτουργία τους από άποψη διαχείρισης. Διάφορα ζητήματα, όπως η υψηλή συνδεσιμότητα, η ανοχή σφαλμάτων, η πολύπλοκη απομόνωση της κυκλοφορίας, η δρομολόγηση με επίγνωση του χρήστη, έχουν οδηγήσει στη δημιουργία επικαλυπτόμενων μηχανισμών σε διάφορα επίπεδα δικτύου, κάνοντας διαχείριση πιο περίπλοκη και δυνητικά αποκαλύπτοντας κενά ασφαλείας [58]. Το SDN είναι μια προσέγγιση δικτύωσης όπου ο έλεγχος του δικτύου διαχωρίζεται από τη φυσική υποδομή. Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία και αποτελεσματική διαχείριση της κίνησης δεδομένων, καθώς το λογισμικό μπορεί να προσαρμόσει δυναμικά τις διαδρομές και τους κανόνες επικοινωνίας με βάση τις τρέχουσες ανάγκες του δικτύου [59]. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να συντηρούν τον εξοπλισμό δικτύου χρησιμοποιώντας λογισμικό που μπορεί να εκτελεστεί σε μη αναβαθμισμένο ή κάπως αλλιώς τροποποιημένο υλικό. Λόγω της συμβατής δομής του, η συμπεριφορά δικτύου του SDN είναι πιο ευέλικτη και προσαρμόσιμη στις ανάγκες κάθε επιχείρησης, πανεπιστημίου ή ομάδας χρηστών [58].

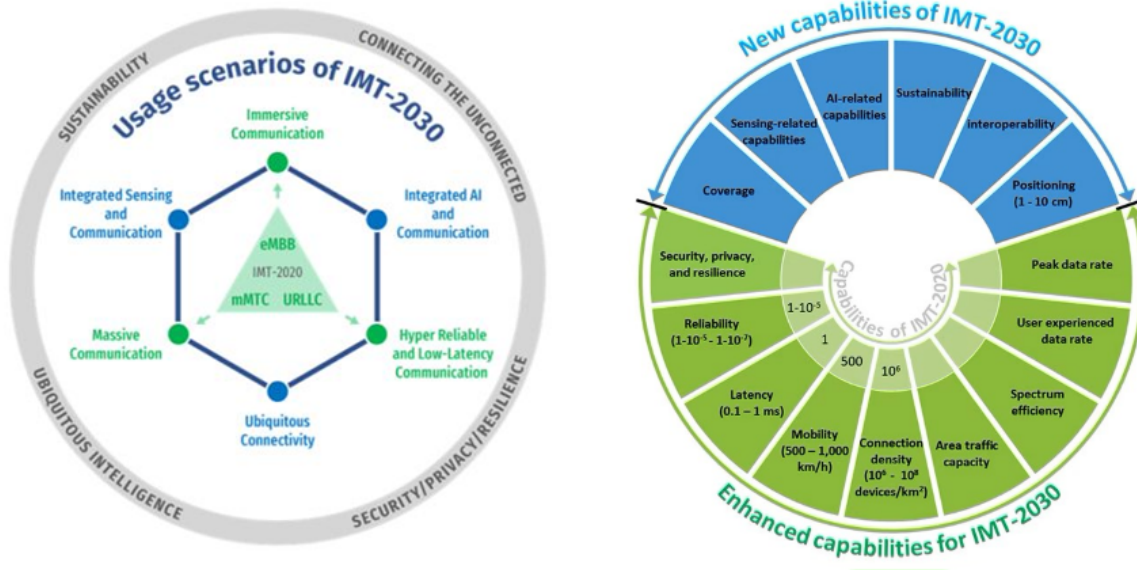
Στο δίκτυο 5G, το SDN είναι υπεύθυνο για τη ρύθμιση και τη διαχείριση των εφαρμογών σε όλο το δίκτυο. Μειώνει το κόστος κατασκευής και εκπαίδευσης της ευφυΐας του δικτύου, ελαχιστοποιώντας κατά συνέπεια την πολυπλοκότητα του δικτύου [53].

Η ανάπτυξη του 5G έχει προκαλέσει ανησυχίες σχετικά με πιθανές επιπτώσεις στην υγεία που σχετίζονται με την ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα δίκτυα του. Το 5G δέχτηκε πολλές ενστάσεις και αντιδράσεις όσον αφορά την επικινδυνότητα και τις επιπτώσεις των mmW στο ανθρώπινο οργανισμό. Σημαντικό παράδειγμα αποτελεί ο βανδαλισμός πάνω από 50 πύργων κινητής τηλεφωνίας 5G στην Αγγλία, λόγω αβάσιμου φόβου πως διαδίδουν τον covid-19. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το 5G χρησιμοποιεί κύματα ραδιοσυχνότητας, παρόμοια με προηγούμενες γενιές ασύρματης τεχνολογίας, όπως το 4G και το 3G. Τα δίκτυα 5G έχουν σημαντικά μειωμένη καθυστέρηση σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές. Η καθυστέρηση αναφέρεται στο χρόνο που χρειάζεται για να ταξιδέψουν τα δεδομένα μεταξύ μιας πηγής και του προορισμού τους. Το 5G στοχεύει στην επίτευξη εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης περίπου 1 χιλιοστού του δευτερολέπτου (ms), η οποία είναι σχεδόν στιγμιαία. Αυτή η χαμηλή καθυστέρηση είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές όπως αυτόνομα οχήματα, χειρουργεία από απόσταση και παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο υπάρχουν και μερικά αρνητικά όπως η περιορισμένη εμβέλεια που έχουν τα mmWaves καθώς απαιτείται ένας συνδρομητής να βρίσκεται σε εμβέλεια ενός τετράγωνου από τον πύργο 5G για να χρησιμοποιήσει την τεχνολογία 5G και η αυξημένη τους ευαισθησία και κατά συνέπεια εξασθένιση από εμπόδια όπως τοίχους, δέντρα, παράθυρα, πόρτες και από ατμοσφαιρικές συνθήκες όπως η βροχή, ο άνεμος. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω απαιτείται χρήση πυκνής υποδομής δικτύου με περισσότερους σταθμούς βάσης τοποθετημένους κοντά ο ένας στον άλλον για να διατηρηθεί μια αξιόπιστη σύνδεση. Η χρήση μικροκυψέλλων, δηλαδή μικρών κεραιών συμβάλει σημαντικά σε αυτό. Επιπρόσθετα τα mmWave απαιτούν μετάδοση από γραμμή όρασης (Line-of-sight-transmission-LOS). Τα κύματα χιλιοστών γενικά απαιτούν μια σαφή οπτική γραμμή μεταξύ των συσκευών εκπομπής και λήψης. Τα εμπόδια στη διαδρομή του σήματος μπορεί να προκαλέσουν υποβάθμιση του σήματος ή πλήρη απώλεια. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, τα δίκτυα κυμάτων χιλιοστών 5G χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης, όπως κεραιές με συστοιχία φάσης, για να εστιάζουν το σήμα σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και να παρακολουθούν τις συσκευές των χρηστών καθώς κινούνται. Ακόμα, το κόστος δημιουργίας και συντήρησης ενός δικτύου 5G είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τις προηγούμενες γενιές [60].

Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ τα κύματα χιλιοστών 5G προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ταχύτητα και τη χωρητικότητα, αποτελούν μόνο ένα στοιχείο του συνολικού δικτύου 5G. Ζώνες χαμηλότερης συχνότητας, όπως αυτές κάτω των 6 GHz που χρησιμοποιούνται στο 4G, εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με κύματα χιλιοστών για να παρέχουν μια ισορροπία μεταξύ κάλυψης και χωρητικότητας. Η στρατηγική ανάπτυξης για δίκτυα 5G περιλαμβάνει συνήθως έναν συνδυασμό διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της κάλυψης σε διάφορα σενάρια.

1.3 Κινητή τηλεφωνία έκκτης γενιάς (6G)

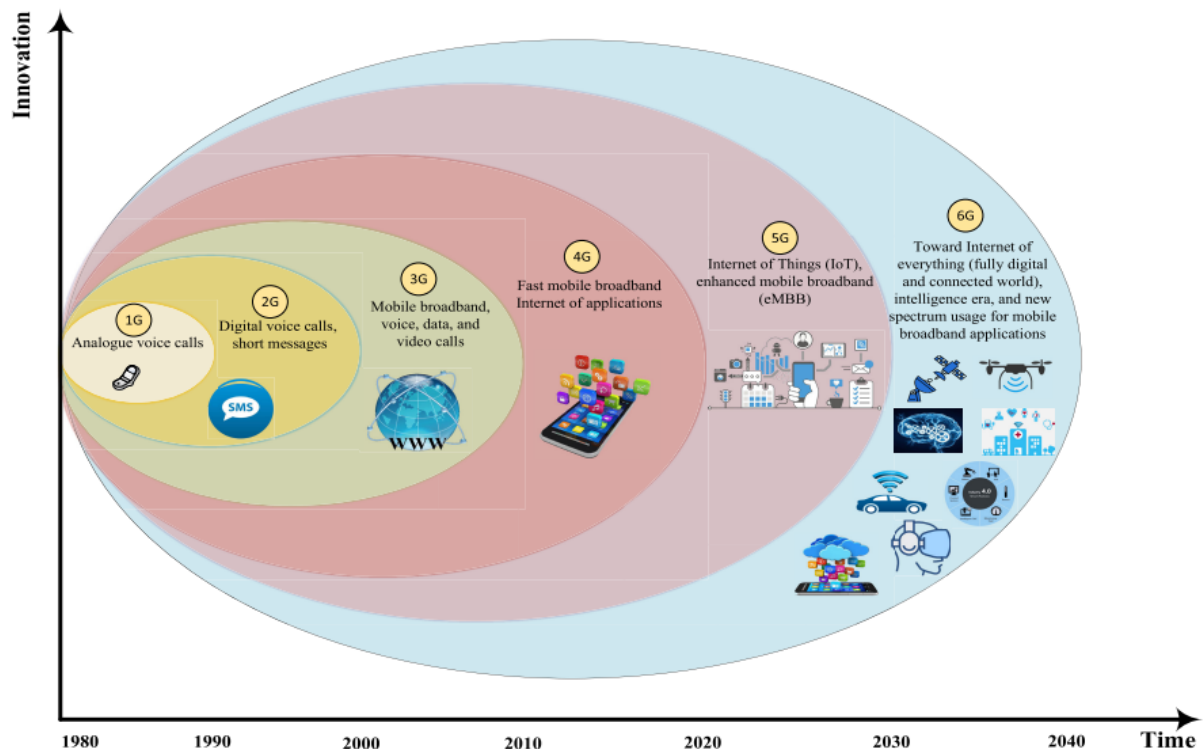
Οδεύουμε προς μια κοινωνία πλήρως αυτοματοποιημένων συστημάτων απομακρυσμένης διαχείρισης. Τα αυτόνομα συστήματα γίνονται δημοφιλή σε όλους τους τομείς της κοινωνίας, συμπεριλαμβανομένης της βιομηχανίας, της υγείας, των δρόμων, των ωκεανών και του διαστήματος. Εκατομμύρια αισθητή-



Σχήμα 1.18: Σενάρια και προϋποθέσεις δυνατοτήτων του 6G [61].

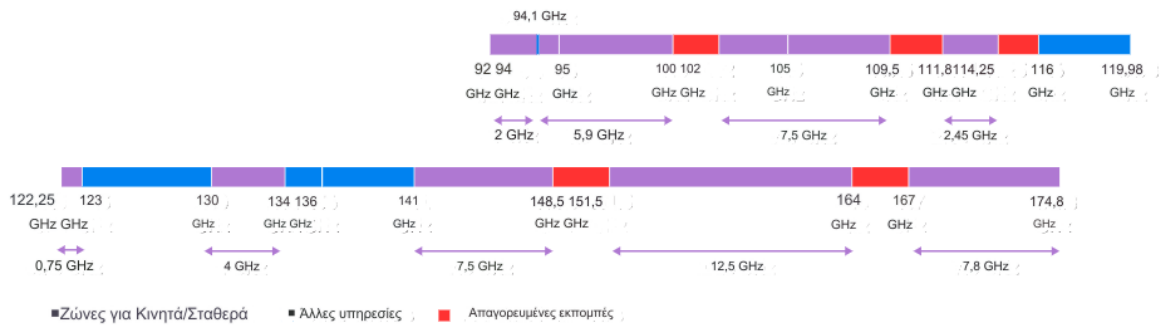
ρες θα είναι ενσωματωμένοι σε πόλεις, οχήματα, σπίτια, βιομηχανίες, συσκευασίες τροφίμων, παιχνίδια και άλλα για να παρέχουν έξυπνη ζωή και αυτοματοποιημένα συστήματα. Ως εκ τούτου, θα απαιτηθεί υψηλός ρυθμός δεδομένων με αξιόπιστη συνδεσιμότητα για την υποστήριξη αυτών των εφαρμογών. Τα δίκτυα 5G δεν έχουν την ικανότητα να παρέχουν ένα πλήρως αυτοματοποιημένο και έξυπνο δίκτυο που να παρέχει τα πάντα ως υπηρεσία. Παρόλο που τα συστήματα επικοινωνίας 5G προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές, δεν είναι σε θέση να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των μελλοντικών αναδυόμενων ευφυών συστημάτων αυτοματισμού μετά από δέκα χρόνια. Όπως και στις προηγούμενες γενιές κινητών επικοινωνιών, η ITU έχει θεμελιώδη ηγετικό ρόλο στον καθορισμό του πλαισίου και των συνολικών στόχων της νέας γενιάς κινητών επικοινωνιών, που ονομάζεται IMT 2030. Έχοντας αποκτήσει ευρεία συναίνεση, το IMT-2030 θα χρησιμεύσει ως οδικός χάρτης και θα παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για την έρευνα και την ανάπτυξη 6G [61]. Το IMT-2030 αναμένεται να παρέχει βελτιωμένες δυνατότητες σε σύγκριση με αυτές του IMT-2020, καθώς και νέες δυνατότητες για την υποστήριξη της διευρυμένης χρήσης του IMT-2030. Επικεντρώνεται σε πτυχές επικοινωνίας, όπως ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων από τον χρήστη, η αποτελεσματικότητα του φάσματος, η πυκνότητα σύνδεσης (connection density), η κινητικότητα, η καθυστέρηση, η αξιοπιστία, καθώς και η ασφάλεια και η ανθεκτικότητα. Οι απαιτήσεις του IMT-2030 είναι 5 με 10 φορές μεγαλύτερες από το IMT-2020. Για παράδειγμα, η ITU συνέστησε 20 Gbit/s ως ερευνητικό στόχο για τον μέγιστο ρυθμό δεδομένων του IMT-2020 το 2015, ενώ για το IMT-2030, οι προτεινόμενες τιμές παραδείγματος περιλαμβάνουν 50, 100 και 200 Gbit/s, με δυνατότητα διερεύνησης και μεγαλύτερων απαιτήσεων. Η βελτίωση της απόδοσης του φάσματος αναμένεται στο εύρος από 1,5 έως 3 φορές σε σχέση με το IMT-2020, επίσης με δυνατότητα μεγαλύτερων τιμών. Στο σχήμα 1.18 φαίνονται τα σενάρια και οι προϋποθέσεις που έθεσε η ITU για το 6G.

Το 6G, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.19, αναμένεται να φέρει την επανάσταση σε πάρα πολλούς τομείς της καθημερινότητας, όπως στην γραμμή παραγωγής, στον τουρισμό, στην γεωργία και στην παρακολούθηση της προσωπικής υγείας, χάρη στην πανταχού παρόν κάλυψη και τις τεράστιες ταχύτητες που υπόσχεται [62].



Σχήμα 1.19: Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών ανά τα χρόνια [63].

Σήμερα, τα σχέδια για την δημιουργία των έξυπνων πόλεων (Smart cities) έχουν ήδη αρχίσει να θέτονται σε εφαρμογή. Μια έξυπνη πόλη είναι στην ουσία ένα ευρύ εννοιολογικό πλαίσιο όπου μια σειρά από νέες αναδυόμενες τεχνολογίες όπως το Internet of Things (IoT), το 5G, το Cloud Computing, το Fog / Edge Computing και πολλά άλλα, σε συνδυασμό με μια σύγχρονη φυσική υποδομή, λειτουργούν μαζί και παρέχουν υψηλής ποιότητας υπηρεσίες στους πολίτες για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής τους. Ένα παράδειγμα τέτοιου έργου είναι το έργο της SideWalk Labs στο Τορόντο (αδελφή εταιρεία της Google), όπου υπόσχεται να χτίσει μια πόλη του μέλλοντος με υποσχέσεις βιωσιμότητας, οικονομικής ανάπτυξης, λιγότερα αέρια θερμοκηπίου, προσιτή διαβίωση και πολλά άλλα πλεονεκτήματα [64]. Υπάρχουν ορισμένες βασικές απαιτήσεις για να θεωρείται μια πόλη ως έξυπνη πόλη, όπως η απρόσκοπτη, γρήγορη και αξιόπιστη ασύρματη σύνδεση καθώς και διαθεσιμότητα υπολογιστικών δυνατοτήτων σε πραγματικό χρόνο τόσο από την πλευρά του χρήστη όσο και από την πλευρά της υποδομής της πόλης ώστε να ικανοποιείται ασφαλή αξιόπιστη ασύρματη τεχνολογία για κοινή χρήση δεδομένων. Για να λειτουργήσει μια έξυπνη πόλη σωστά θα πρέπει να τοποθετηθούν αισθητήριες τόσο σε επιφάνειες τόσο και σε μορφή μη επανδρωμένων αεροσκαφών τα οποία θα ελέγχουν και θα αναλύουν δεδομένα και φυσικά θα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός δικτύου (του δικτύου έκτης γενιάς), ώστε να μπορούν να σχηματίσουν μία πλήρη εικόνα των πραγμάτων. Μια έξυπνη πόλη αποτελείται από έξυπνα σπίτια (Smart Homes). Το έξυπνο σπίτι έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί το περιβάλλον του σπιτιού, να διευκολύνει τις αλληλεπιδράσεις των απομακρυσμένων κατοίκων και να παρέχει απομακρυσμένη ανάγνωση του μετρητή διαφορετικών υπηρεσιών κοινής ωφέλειας όπως ηλεκτρική ενέργεια, φυσικό αέριο και νερό. Το σύστημα έξυπνου σπιτιού έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την ασφάλεια στο σπίτι, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πολλαπλών αισθητήρων και για έξυπνη παρακολούθηση και ανάπτυξη έξυπνης παρακολούθησης βίντεο. Επιπλέον, το έξυπνο σπίτι έχει τη δυνατότητα να παρέχει χρήσιμες πληρο-



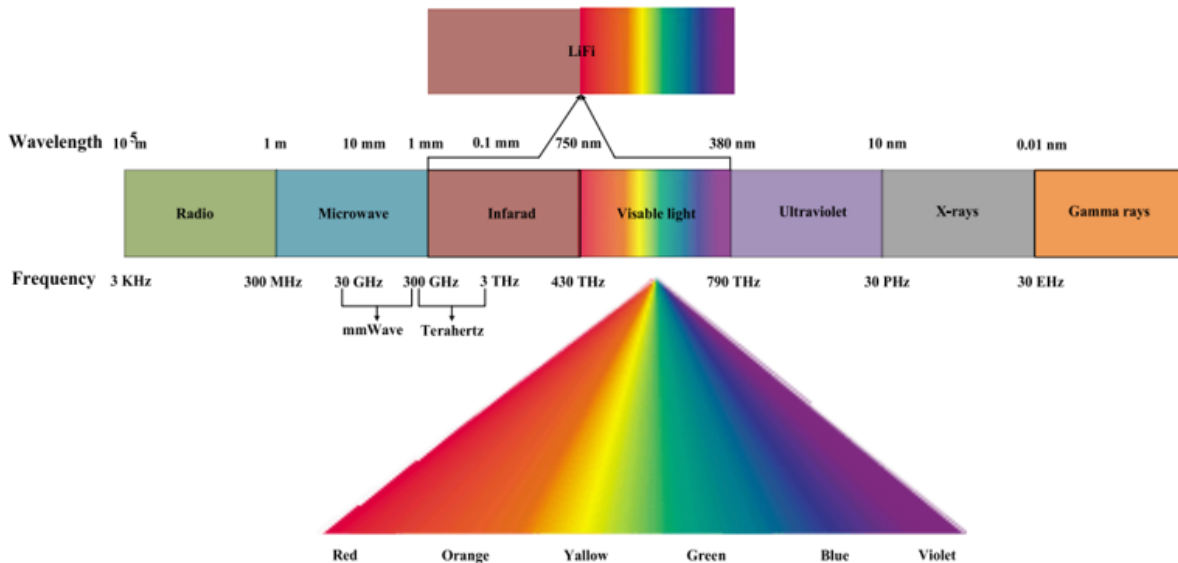
Σχήμα 1.20: Πιθανές μπάντες συχνοτήτων του 6G [62].

φορίες και βοηθητικές υπηρεσίες ανά πάσα στιγμή και οπουδήποτε [65]. Μέρος μιας έξυπνης πόλης θα είναι επίσης και ο τομέας της έξυπνης γεωργίας. Η εφαρμογή τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας στην γεωργία επιτρέπει την επίτευξη μεγάλης ποικιλίας υπηρεσιών με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου κόπου και την αύξηση της παραγωγικότητας και του κέρδους. Η έξυπνη γεωργία θα επιτρέπει ένα έξυπνο σύστημα υδροδότησης νερού αυτοματισμό και ακρίβεια, παρακολούθηση φυτών, καλλιέργεια και κτηνοτροφία, πρόγνωση καιρού και παρακολούθηση και ανίχνευση φυτικών ασθενειών. Η έξυπνη γεωργία μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί για να εξασφαλιστεί ο σωστός φωτισμός και η υγρασία των φυτών για βέλτιστη ανάπτυξη, βελτιώνοντας την παραγωγή φυτών θερμοκηπίου. Σε αυτή την εξέλιξη αναμένεται να χρησιμοποιηθούν νέες τεχνολογίες όπως το cloud computing και η τεχνητή νοημοσύνη. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση ασθενειών από τις εικόνες φυτών/φύλλων. Η τεχνολογία μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles-UAVs) μπορεί επίσης να διαδραματίσει ουσιαστικό ρόλο σε ένα έξυπνο σύστημα γεωργίας. Για παράδειγμα, τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρακτικά από τους αγρότες για την παρακολούθηση της κατάστασης του αγροκτήματος στην αρχή οποιουδήποτε καλλιεργητικού έτους. Επιπλέον, τα UAV μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν στην παρακολούθηση του εδάφους, στην ανάλυση πεδίου, στην άρδευση και στη διαχείριση του επιπέδου αζώτου για την επίτευξη καλύτερης ανάπτυξης των καλλιεργειών. Ως εκ τούτου, η έξυπνη γεωργία μπορεί να επωφεληθεί ιδιαίτερα από την ενοποίηση μεταξύ αερομεταφερόμενων, επίγειων και δορυφορικών δικτύων επικοινωνιών [66].

Η εκτεταμένη πραγματικότητα (Extended Reality-XR) είναι ένας νέος όρος-ομπρέλα που περιλαμβάνει την Εικονική Πραγματικότητα (Virtual Reality-VR), την Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality-AR) και τη Μικτή Πραγματικότητα (Mixed Reality-MR) [67]. Το VR είναι μια εμπειρία πραγματικότητας προσομοιωμένης μέσω υπολογιστή χρησιμοποιώντας ένα ακουστικό και έναν φακό που παράγει ήχους και εικόνες δημιουργώντας, έτσι έναν φανταστικό κόσμο [68]. Το AR χρησιμοποιεί τον πραγματικό κόσμο και προσθέτει σε αυτόν χρησιμοποιώντας συσκευές όπως το κινητό τηλέφωνο. Ήχοι, βίντεο, καθώς και το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System-GPS) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός διαδραστικού περιβάλλοντος. Το 6G θα είναι πολύ χρήσιμο για αυτό το χαρακτηριστικό λόγω της ισχυρής συνδεσιμότητας, του υψηλού ρυθμού δεδομένων, της υψηλής ανάλυσης και της χαμηλής καθυστέρησης.

Κατά τη μετάβαση στο σύστημα επικοινωνίας 5G, εξακολουθούν να υπάρχουν τα συστήματα επικοινωνίας 3G/4G/WiFi. Παρομοίως, η επικοινωνία με συχνότητες κάτω των 6 GHz θα συνεχίσει να λειτουργεί και θα αποτελεί μέρος της επικοινωνίας 6G [69] όπου αυτό είναι απαραίτητο. Το 6G σχεδιάζεται με σκο-

πό να φτάνει συχνότητες μέχρι και της τάξεως των Terahertz (0,1-10 THz) και ταχύτητες μέχρι και το 1Tbps. Με άλλα λόγια το 6G θα κάνει χρήση κυμάτων συχνότητας Terahertz (THz waves), όπου αυτό είναι εφικτό. Σε σύγκριση με τα κύματα χιλιοστών, τα κύματα Terahertz έχουν μικρότερο μήκος κύματος και μπορούν να μεταφέρουν περισσότερα δεδομένα σε μικρότερο χρόνο. Η χρήση του τεράστιου φάσματος των κυμάτων Terahertz θα ελαττώσει σημαντικά τις ελλείψεις φάσματος που παρατηρούνται σήμερα. Η επικοινωνία THz περιλαμβάνει τις ζώνες φάσματος συχνοτήτων μεταξύ (0,1-10 THz) και τα αντίστοιχα μήκη κύματος κυμαίνονται μεταξύ (0,03 mm-3 mm). Η ζώνη συχνοτήτων THz, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.21, βρίσκεται μεταξύ των ζωνών μικροκυμάτων και υπέρυθρων. Η επικοινωνία σε συχνότητες THz θα απαιτεί τη χρήση μικροσκοπικών κυψελών όπου η ακτίνα τέτοιων κυψελών θα μπορούσε να είναι μερικές δεκάδες μέτρα. Επιπλέον, λόγω της υψηλότερης φέρουσας συχνότητας και του μικρότερου μήκους κύματος, η επικοινωνία THz μπορεί να κάνει χρήση υπερμεγέθων συστοιχιών κεραιών για να επιτρέψει την αποτελεσματική διαμόρφωση δέσμης. Ως εκ τούτου, εκατοντάδες στενές δέσμες μπορούν να δημιουργηθούν από υπερμεγέθης συστοιχίες κεραιών, οι οποίες είναι αποτελεσματικές στην αύξηση της ισχύος του σήματος, στη βελτίωση των ρυθμών δεδομένων και στη μείωση των παρεμβολών. Το κύμα Terahertz μπορεί να αποδειχθεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για συστήματα επικοινωνίας πόλεων όπου μεγάλος όγκος δεδομένων πρόκειται να μεταφερθεί σε μικρή απόσταση αλλά με πολύ γρήγορη ταχύτητα. Για παράδειγμα σε ένα εργοστάσιο όπου χρησιμοποιείται αριθμός ρομπότ και πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους καθώς και με κάποιο κεντρικό διακομιστή υπάρχει ανάγκη για μεγάλες ταχύτητες. Επιπρόσθετα, ας υποθέσουμε ότι υπάρχει μια εφαρμογή AR όπου ένας μεγάλος αριθμός χρηστών είναι συγκεντρωμένος σε μια μικρή περιοχή με μεγάλες απαιτήσεις ροής δεδομένων. Όλα αυτά είναι πέρα από τις περιοχές εξυπηρέτησης 5G το οποίο δεν θα μπορεί να υποστηρίξει τέτοιες υπηρεσίες. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του 6G θα είναι η εξατομικευμένη εμπειρία επικοινωνίας με τους χρήστες. Εάν το φάσμα συχνοτήτων Terahertz χρησιμοποιείται στο 6G, τότε θα υπάρχει τεράστιο φάσμα διαθέσιμο για τους τηλεπικοινωνιακούς φορείς για χρήση ως εύρος ζώνης για το σύστημά τους. Μπορούν να παρέχουν προσωποποιημένες υπηρεσίες σε κάθε πελάτη, εκχωρώντας μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων σε κάθε χρήστη. Τα THz Waves ανήκουν στον τομέα των υπέρυθρων ακτίνων στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.21, οι οποίες θα αναλυθούν περαιτέρω στο κεφάλαιο 2.2. Από την άλλη πλευρά, όσον αφορά τη χωρητικότητα, σε σύγκριση με το 5G, το 6G θα μπορεί να συνδέει ευέλικτα και αποτελεσματικά τρισεκατομμύρια συσκευές σε σύγκριση με τις τρέχουσες κινητές συσκευές επιπέδου δισεκατομμυρίων. Ως αποτέλεσμα, το δίκτυο 6G γίνεται εξαιρετικά πυκνό και η χωρητικότητά του μπορεί να είναι από 10 μέχρι 1000 φορές υψηλότερη από αυτή των συστημάτων των δικτύων 5G. Επιπρόσθετα, όσον αφορά την καθυστέρηση μεταφοράς, από το 2G μέχρι και το 5G τα δίκτυα αποσκοπούσαν κυρίως ανθρώπους οπότε ο στόχος ήταν πάντοτε η καθυστέρηση να είναι περίπου ίση με την μέση ανθρώπινη αντίδραση δηλαδή 150 ms για ακουστική αντίδραση και 200 ms για οπτική αντίδραση. Για την εφαρμογή του απτικού Διαδικτύου, η τεχνολογία 5G θα επιτρέψει χρόνο καθυστέρησης 1 ms. Ωστόσο, αυτό είναι πολύ μεγάλο για το Industrial IoT (IIoT) και ορισμένες άλλες ευαίσθητες σε καθυστέρηση εφαρμογές. Για παράδειγμα, ένας ελάχιστος χρόνος καθυστέρησης είναι απαραίτητος για τη μείωση των ποσοστών σύγκρουσης και τη βελτίωση της ασφάλειας στα αυτόνομα οχήματα. Για το σκοπό αυτό, το 6G στοχεύει σε μη ανιχνεύσιμο χρόνο απόκρισης (<1 ms) ή ακόμα και ανύπαρκτη καθυστέρηση, καθώς μπορεί να βελτιώσει την εφαρμογή αυτόνομων οχημάτων, επαυξημένης πραγματικότητας και ιατρικής απεικόνισης. Πράγματι, με την εμφάνιση περισσότερων νέων μη επανδρωμένων και αυτόνομων εφαρμογών, ο χρόνος καθυστέρησης δεν εξαρτάται πλέον αποκλειστικά από τους χρόνους ανθρώπινης αντίδρασης, αλλά από αυτούς των μηχανών.



Σχήμα 1.21: Τα mmWaves και Terahertz waves στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [70].

1.3.1 Κριτήρια ποιότητας

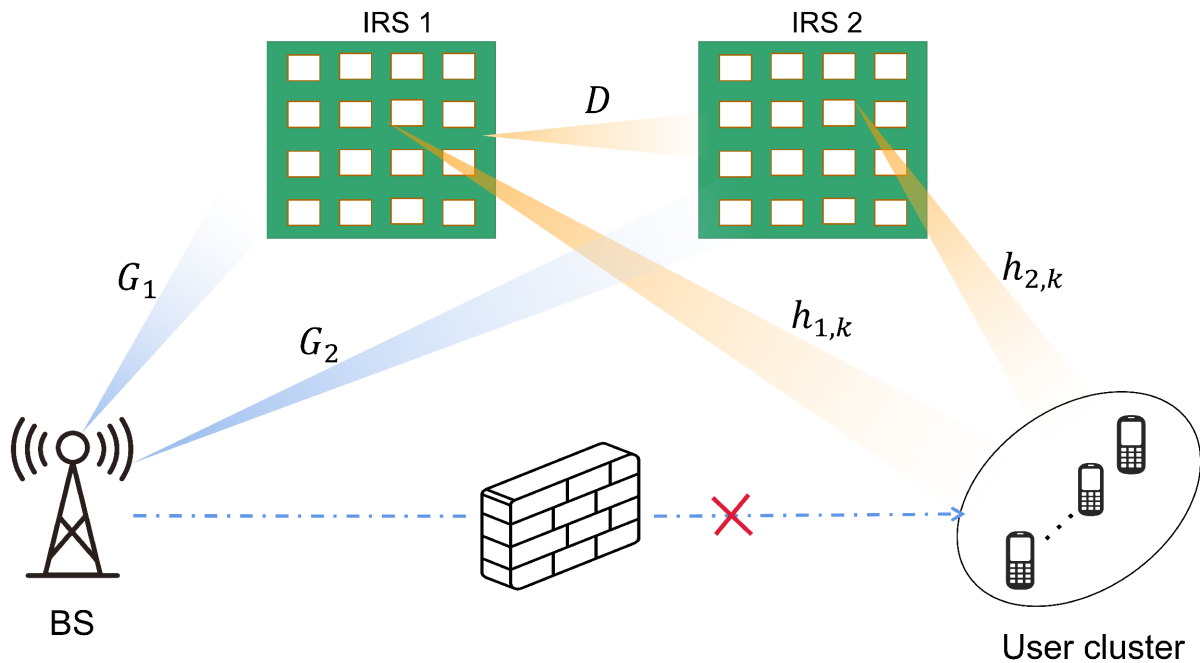
Προκειμένου να προσφερθεί αποτελεσματική κατανομή πόρων για δίκτυα 6G, απαιτούνται ευέλικτα κριτήρια βελτιστοποίησης για τη καλύτερη της απόδοσης του συστήματος (Quality of service) και της εμπειρίας χρήστη (Quality of experience), QoS και QoE αντίστοιχα.

- **Ενισχυμένη κάλυψη:** Τα δίκτυα 6G αναμένεται να παρέχουν βελτιωμένη κάλυψη, ειδικά σε δύσκολα περιβάλλοντα όπως αγροτικές περιοχές, υπόγειες τοποθεσίες και εσωτερικούς χώρους, τοποθεσίες όπου το 5G ακόμα υστερεί. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών κεραιών, δορυφορικών επικοινωνιών και την ενσωμάτωση επίγειων και μη δικτύων. Τελικός στόχος είναι η ολική κάλυψη σε ένα ενιαίο και γρήγορο δίκτυο [71].
- **Ενεργειακή αποδοτικότητα:** Η βιωσιμότητα και η ενεργειακή απόδοση του δικτύου θα είναι βασικά ζητήματα για το 6G. Οι υποδομές και οι συσκευές δικτύου θα πρέπει να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας και να βελτιστοποιούν την χρήση ενέργειας, χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η δυναμική διαχείριση ενέργειας, οι έξυπνες λειτουργίες ύπνου (sleep mode) και οι ενεργειακά αποδοτικοί σχεδιασμοί υλικού [71].
- **Κινητικότητα:** Αναμένονται ευφυή συστήματα μεταφοράς για πομπούς και δέκτες με πολύ υψηλή ταχύτητα. Η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση στην επικοινωνία δεδομένων θα βελτιώσει το σύστημα μεταφοράς. Υπάρχει ανάγκη για διατήρηση μιας σταθερής και γρήγορης σύνδεσης μεταξύ πομπού και δέκτη ακόμα και στις παραπάνω συνθήκες. Η μέγιστη δυνατή ταχύτητα που υπολογίζεται στο 6G είναι 1000 Km/h για σενάρια επικοινωνίας αεροπορικών εταιρειών, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτά που μας προσφέρει το 5G. [69].
- **Παγκόσμια τυποποίηση:** Η επίτευξη παγκόσμιας διαλειτουργικότητας και τυποποίησης είναι ζωτικής σημασίας για την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας 6G. Τα κριτήρια ποιότητας θα περιλαμβάνουν προσπάθειες για την ανάπτυξη ενιαίων τεχνικών προτύπων και πρωτοκόλλων για την εξασφάλιση απρόσκοπτης επικοινωνίας σε διάφορα δίκτυα και συσκευές.

- Περιβαλλοντική βιωσιμότητα: Δεδομένων των αυξανόμενων ανησυχιών σχετικά με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της τεχνολογίας, τα κριτήρια ποιότητας για το 6G μπορεί να περιλαμβάνουν διατάξεις για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα και την προώθηση φιλικών προς το περιβάλλον πρακτικών στην ανάπτυξη και λειτουργία του δικτύου [67].
- Φασματική απόδοση: Το 6G στοχεύει να κάνει πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων, χρησιμοποιώντας δυνητικά υψηλότερες συχνότητες και προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης. Τα κριτήρια ποιότητας θα επικεντρωθούν στη μεγιστοποίηση της απόδοσης δεδομένων εντός περιορισμένων πόρων φάσματος, ενώ θα ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές και η υποβάθμιση του σήματος.

1.3.2 Τεχνολογίες κλειδιά

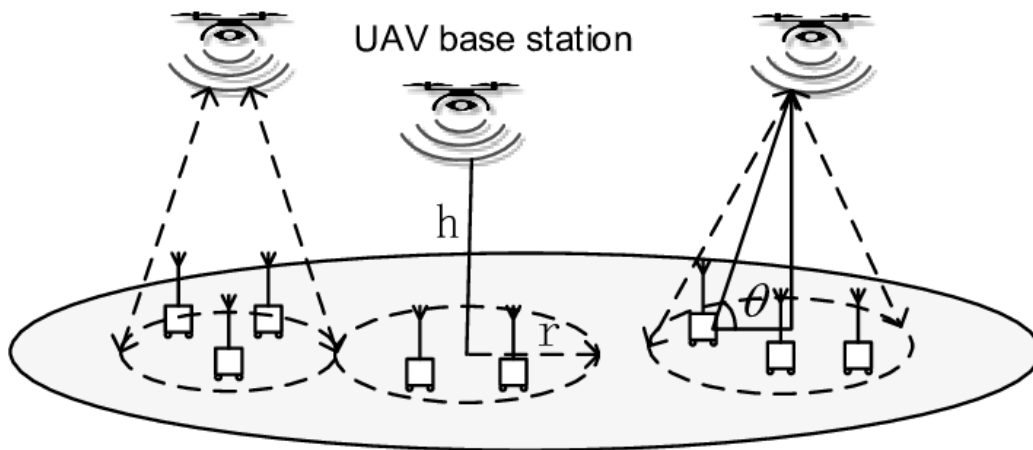
Έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες (Intelligent Reflecting Surfaces): Γνωστές και ως επαναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces-RIS). Τα RIS περιλαμβάνουν την χρήση παθητικών επιφανειών με ελεγχόμενες ιδιότητες ανάκλασης για τη βελτίωση της ασύρματης επικοινωνίας. Αυτές οι επιφάνειες μπορούν να ρυθμιστούν για να βελτιστοποιήσουν την ποιότητα και ιδιαίτερα την κάλυψη του σήματος όπως παριστάνεται και στο σχήμα 1.22. Η ανακλαστική επιφάνεια είναι μια δισδιάστατη επίπεδη επιφάνεια χαμηλού πάχους, η οποία έχει τη δυνατότητα να ελέγχει τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων διάδοσης προκειμένου να διαμορφώσει κυματομορφές, να δημιουργήσει μια παθητική δέσμη προς το επιθυμητό τερματικό και να επιτύχει ένα ενισχυμένο λαμβανόμενο σήμα. Το διαμορφώσιμο ηλεκτρομαγνητικό υλικό περιέχει ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα σε επίπεδη επιφάνεια και προγραμματιζόμενο λογισμικό, το οποίο ελέγχει το περιβάλλον διάδοσης. Κάθε επιφάνεια περιέχει έναν τεράστιο αριθμό χαμηλού κόστους παθητικών στοιχείων σκέδασης που έχουν τη δυνατότητα να αντανakλούν ανεξάρτητα τα προσπίπτοντα σήματα προς τους επιθυμητούς χρήστες ελέγχοντας ψηφιακά το ρυθμιζόμενο πλάτος και τις μετατοπίσεις φάσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετατοπίσεις πλάτους και φάσης μπορούν να βελτιστοποιηθούν για να μεγιστοποιήσουν τη φασματική απόδοση ή να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας. Τα RIS θα είναι αναγκαία για κάλυψη πυκνοκατοικημένων περιοχών με κύματα συχνότητας Terahertz. Τα RIS θα έχουν επίσης πρωταρχικό ρόλο στην εγκαθίδρυση των προαναφερόμενων έξυπνων πόλεων. Επιπλέον, λόγω της μαζικής συνδεσιμότητας συσκευών και αισθητήρων IoT, τα ασύρματα δίκτυα μετακινούνται σε εφαρμογές λογισμικού, ένα παράδειγμα των οποίων είναι τα δίκτυα καθορισμένα από λογισμικό (Software Defined Networks). Ως εκ τούτου, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να ελέγχονται εξ αποστάσεως μέσω της χρήσης προγραμματιζόμενου λογισμικού. Τα RIS μπορούν να είναι πιο ενεργειακά αποδοτικά σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης. Αυτό συμβαίνει επειδή τα RIS δεν απαιτούν ενισχυτές ισχύος, αλυσίδες ραδιοσυχνοτήτων (RF), εξελιγμένη επεξεργασία σήματος και συστήματα διαχείρισης παρεμβολών. Τα RIS μπορούν πρακτικά να κατασκευαστούν με χαμηλό κόστος. Τα RIS μπορούν να αναπτυχθούν πυκνά σε εσωτερικούς χώρους, σε τοίχους/οροφές, σε εκθεσιακούς χώρους και σε εξωτερικούς χώρους σε αυθαίρετα διαμορφωμένες επιφάνειες, κτίρια, δρόμους, τοίχους, εμπορικά κέντρα, αεροδρόμια κ.λπ. Αυτή η ανάπτυξη ευρείας περιοχής αυξάνει την κάλυψη του δικτύου ειδικά σε μέρη όπου η διάδοση πολλαπλών διαδρομών είναι ανεπαρκής [72]. Τα RIS μπορούν να είναι χρήσιμα σε συστήματα επικοινωνιών με ζώνες υψηλών συχνοτήτων όπως mmWaves και κύματα THz. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ζώνες υψηλών συχνοτήτων θεωρούνται ιδιαίτερα ευαίσθητες σε διαφορετικές συνθήκες διάδοσης. Τα RIS έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν περαιτέρω βελτίωση στους βαθμούς ελευθερίας των καναλιών ασύρματης



Σχήμα 1.22: Σενάριο χρήσης των RIS [73].

επικοινωνίας, ειδικά όταν η διαδρομή οπτικής επαφής (LoS) δεν είναι διαθέσιμη. τα RIS μπορούν επίσης να τροφοδοτούνται αποτελεσματικά από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες είναι ενεργειακά αποδοτικές, και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν με ασύρματη μεταφορά ενέργειας και φορητό υπολογιστικό άκρο για την υποστήριξη πυκνών συσκευών IoT, δικτύων πολλαπλών κυψελών και γνωστικών ραδιοεπικοινωνιών.

Μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) και Σταθμοί Υψηλού Υψομέτρου Πλατφόρμας (High Altitude Platform Stations-HAPS) : Τα UAV είναι μερικώς αυτοματοποιημένα (τηλεκατευθυνόμενα) ή πλήρως αυτοματοποιημένα ιπτάμενα οχήματα τα οποία υπάγονται στην κατηγορία των “drone”. Αρχικά αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για στρατιωτικούς σκοπούς, όπως η κατασκοπεία και η συλλογή πληροφοριών. Σήμερα παρατηρείται μεγάλο ενδιαφέρον και μελέτη για εμπορική χρήση των UAVs. Συγκεκριμένα, μάλιστα να αξιοποιηθούν είτε ως κινητοί σταθμοί βάσης, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.23, είτε ως αναμεταδότες. Σε πολλές περιπτώσεις, τα UAVs θα έχουν τον ρόλο του μεσάζοντα σε επικοινωνίες ανάμεσα στο επίγειο δίκτυο και στο δορυφορικό δίκτυο. Επιπρόσθετα, σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, όπου το επίγειο δίκτυο δεν θα είναι διαθέσιμο, τα UAV θα μπορούν σταλούν στην περιοχή και να λειτουργήσουν ως εφεδρικοί σταθμοί βάσεων ώστε να καλύψουν προσωρινά το κενό αυτό και να επιτρέψουν την επικοινωνία και κατά συνέπεια την καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος σε τέτοιες κρίσιμες στιγμές [74]. Συγκεκριμένα, ο τύπος των UAVs που θα κληθούν να φέρουν εις πέρας το παραπάνω ονομάζονται Σταθμοί Υψηλού Υψομέτρου Πλατφόρμας (High Altitude Platform Stations-HAPS). Εκτός από UAV, HAPS μπορεί να είναι απλά αεροσκάφη ή ακόμα και αερόστατα (Πλατφόρμες Αεροστάτων Υψηλού Υψομέτρου). Βασική προϋπόθεση των HAPS είναι η μεγάλη αυτονομία τους κάτι το οποίο στο 6G θα είναι εφικτό μέσω των πολυάριθμων τρόπων συγκομιδής ενέργειας [75]. Επιπρόσθετα, διαθέτουν μεγάλο ωφέλιμο φορτίο (συνήθως ≥ 100 kg), το οποίο επιτρέπει καθιστά εύκολο τον εξοπλισμό των HAPS με ισχυρές υπολογιστικές μονάδες και μεγάλες μπαταρίες [76]. Τα HAPS εγκαθίστανται στο στρώμα της στρατόσφαιρας και είναι ουσιαστικά ο συνδετικός κρίκος ανάμεσα σε UAVs και



Σχήμα 1.23: UAVs ως σταθμοί βάσης [77].

δορυφόρους [75]. Το παραπάνω αποδίδεται στο γεγονός πως παρόλο που τα περισσότερα HAPS είναι UAVs, έχουν πολλά χαρακτηριστικά των δορυφόρων. Ένα UAV έχει ορισμένα χαρακτηριστικά που δεν βρίσκονται σε σταθερές υποδομές σταθμών βάσης, όπως εύκολη ανάπτυξη και υλοποίηση, ισχυρές συνδέσεις οπτικής επαφής και βαθμούς ελευθερίας με ελεγχόμενη κινητικότητα. Τα UAVs σε συνεργασία με τα RIS μπορούν να συντελέσουν στην δημιουργία ενός ενσωματωμένου επίγειου και δορυφορικού δικτύου κάτι το οποίο αναλύεται παρακάτω.

Ενσωματωμένη δορυφορική επικοινωνία και ετερογενή δίκτυα: Στα σημερινά συστήματα επικοινωνιών, τα δορυφορικά δίκτυα και τα επίγεια δίκτυα αναπτύσσονται και λειτουργούν ξεχωριστά. Αν και έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στο ενσωματωμένο δορυφορικό-επίγειο δίκτυο, ο τρόπος ενοποίησης των δύο δικτύων παραμένει ανοιχτό ζήτημα [78]. Από το 1990 ακόμα, παρατηρήθηκαν εκτεταμένες προσπάθειες και σχέδια δημιουργίας ενός επίγειου δικτύου που θα έχει ενσωματωμένο δορυφορικό δίκτυο (Satellite Communication-Satcom) [79]. Ωστόσο λόγω έλλειψης εξειδικευμένου εξοπλισμού καθώς και της βάσης που δόθηκε τότε στο επίγειο δίκτυο, τα παραπάνω σχέδια δεν υλοποιήθηκαν. Τα πρώτα δορυφορικά δίκτυα εμφανίστηκαν το 2010 με την έλευση του 4G και ενοποιήθηκαν μερικώς με αυτό [79]. Ωστόσο, τα εγγενή χαρακτηριστικά των συστημάτων SatCom, όπως είναι οι μεγάλες καθυστερήσεις διάδοσης, και οι μεγάλες μετατοπίσεις Doppler (μεγάλες μεταβολές στην αντιληπτή συχνότητα ενός κύματος από έναν παρατηρητή που κινείται από ή προς την πηγή του κύματος) έφεραν σοβαρές προκλήσεις στην υλοποίηση δορυφορικών δικτύων στο 4G και στο 5G. Το 6G, με την χρήση κοινών πρωτοκόλλων που τέθηκαν από την 3GPP μαίνεται να αντιμετωπίσει τα προβλήματα των προκάτοχων του και θα σχεδιαστεί ώστε να έχει έμφυτη δορυφορική επικοινωνία με το επίγειο δίκτυο, επιτρέποντας παγκόσμια κάλυψη και βελτιωμένη συνδεσιμότητα σε απομακρυσμένες περιοχές. Για το σκοπό αυτό διερευνώνται δορυφορικοί αστερισμοί Χαμηλής Τροχιάς της Γης (Low Earth Orbit) [79]. Το δορυφορικό δίκτυο θα ενσωματωθεί στο επίγειο δίκτυο μέσω κοινής χρήσης φάσματος, επίγειων ηλεκτρονόμενων και συνεργατικής μετάδοσης [78]. Στο σχήμα 1.24 παριστάνεται ένα τέτοιο ενοποιημένο δίκτυο. Τα ετερογενή δίκτυα συνδυάζουν διαφορετικούς τύπους τεχνολογιών πρόσβασης, όπως Wi-Fi, κινητής τηλεφωνίας και δορυφόρου, για να

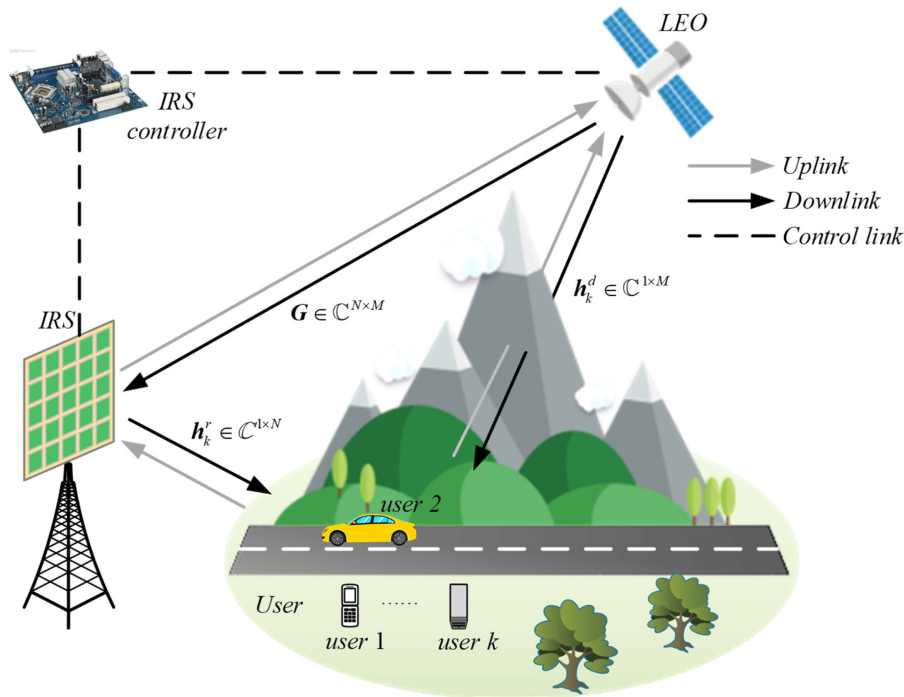
παρέχουν απρόσκοπτη συνδεσιμότητα [79]. Σε τοποθεσίες όπου τα επίγεια δίκτυα ενδέχεται να είναι περιορισμένα, όπως σε αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές, τα δορυφορικά δίκτυα μπορούν να παρέχουν κάλυψη, ενώ τα επίγεια δίκτυα μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και μειωμένη καθυστέρηση σε περιοχές με υψηλό πληθυσμό χρηστών [80].

Δυνατότητα μεταφοράς και συγκομιδής ενέργειας: Ήδη παρατηρείται σε πολλές έξυπνες συσκευές η δυνατότητα αποστολής ή/και λήψης ενέργειας χωρίς την ανάγκη χρήσης καλωδίου. Καθώς η ασύρματη μεταφορά ενέργειας (wireless energy transfer) ωριμάζει, προβλέπουμε ότι οι σταθμοί βάσης 6G θα είναι σε θέση παρέχουν βασική μεταφορά ενέργειας για συσκευές, ιδιαίτερα εμφυτεύματα και αισθητήρες. Συμπληρωματικές ιδέες με επίκεντρο την ενέργεια, όπως η συγκομιδή ενέργειας η οπισθοσκέδαση και η αποδοτικότερη αποστολή ενέργειας θα αποτελούν επίσης σημαντικό μέρος του 6G [81].

Δίκτυα επικοινωνίας Terahertz: Το 6G βασίζεται στη χρήση συχνοτήτων Terahertz, οι οποίες είναι πολύ υψηλότερες από τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται στα τρέχοντα ασύρματα δίκτυα. Οι συχνότητες Terahertz προσφέρουν πολύ υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο, αλλά έχουν επίσης πολύ μικρότερη εμβέλεια και είναι πιο επιρρεπείς σε παρεμβολές [7]. Τα δίκτυα επικοινωνίας Terahertz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές όπως η μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας και σε αισθητήρες.

Δίκτυο που βασίζεται σε blockchain: Το blockchain είναι μια αλυσίδα μπλοκ που αποτελούν μια κατανεμημένη βάση δεδομένων. Είχε σχεδιαστεί αρχικά για κρυπτονομίσματα όπως το bitcoin. Ωστόσο, στις μέρες μας, το blockchain μπορεί να κάνει πολύ περισσότερα από το να αξιοποιείται σε κρυπτονομίσματα. Το Blockchain παρέχει μια κατανεμημένη και ασφαλή βάση δεδομένων για την αποθήκευση αρχείων και συναλλαγών, όπου κάθε κόμβος περιλαμβάνει το κρυπτογραφικό κατακερματισμό του προηγούμενου μπλοκ, δεδομένα συναλλαγών και μια χρονική σήμανση. Επιπλέον, οι μηχανισμοί που μοιάζουν με blockchain αναμένεται να παρέχουν κατανεμημένο έλεγχο ταυτότητας, έλεγχο μέσω της μόχλευσης των ψηφιακών ενεργειών που παρέχονται από τα έξυπνα συμβόλαια [82].

Δίκτυα βασιζόμενα στο AI: Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και η μηχανική μάθηση (Machine Learning) αναμένεται να διαδραματίσουν πρωταρχικό ρόλο στα δίκτυα 6G. Η τεχνητή νοημοσύνη θα χρησιμοποιηθεί για έξυπνη διαχείριση δικτύου, κατανομή πόρων και βελτιστοποίηση, δίνοντας έτσι στα δίκτυα την ικανότητα αποδιαμόρφωσης, αυτοεπιδιόρθωσης και αυτοβελτιστοποίησης [83]. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν ακόμα να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα, την αξιοπιστία και την ασφάλεια του δικτύου [84], κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό ειδικά με την εξάπλωση ανησυχιών παραβίασης των προσωπικών δεδομένων. Το αυξημένο ενδιαφέρον για την τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αποδοθεί σε πρόσφατα φαινόμενα, στους υπολογιστές υψηλής απόδοσης αλλά και στην αυξανόμενη ποσότητα δεδομένων, που παράγονται από διάφορες πανταχού παρούσες συσκευές, από προσωπικά smartphone έως βιομηχανικά ρομπότ [85]. Η μηχανική μάθηση είναι ένας κλάδος της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και της επιστήμης των υπολογιστών που εστιάζει στη χρήση δεδομένων και αλγορίθμων για τη μίμηση του τρόπου με τον οποίο μαθαίνουν οι άνθρωποι, βελτιώνοντας σταδιακά την ακρίβειά της. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, οι τεχνολογικές εξελίξεις στην αποθήκευση και την επεξεργαστική ισχύ επέτρεψαν ορισμένα καινοτόμα προϊόντα που βασίζονται στη μηχανική μάθηση, όπως ο αλγόριθμος συστάσεων του Netflix και τα αυτοοδηγούμενα αυτοκίνητα. Η μηχανική μάθηση είναι ένα σημαντικό συστατικό του αναπτυσσόμενου τομέα της επιστήμης δεδομένων. Μέσω της χρήσης στατιστικών μεθόδων, οι αλγόριθμοι



Σχήμα 1.24: Ενσωματωμένο επίγειο-δορυφόρου δίκτυο με χρήση RIS [86].

μοι εκπαιδεύονται να κάνουν ταξινομήσεις ή προβλέψεις και να αποκαλύπτουν βασικές γνώσεις σε έργα εξόρυξης δεδομένων. Δεν υπάρχει ουσιαστικά καμία μεγάλη βιομηχανία όπου η σύγχρονη τεχνητή νοημοσύνη δεν παίζει ήδη σημαντικό ρόλο. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, καθώς η συλλογή και η ανάλυση δεδομένων έχει αυξηθεί σημαντικά χάρη στην ανάπτυξη του IoT, τον πολλαπλασιασμό των συνδεδεμένων συσκευών και την ολοένα πιο γρήγορη επεξεργασία υπολογιστών [85]. Ένας ακόμα τομέας εστίασης του AI θα είναι οι συσκευές που εκτελούν έξυπνη μάθηση. Ένα παράδειγμα αυτής της περίπτωσης χρήσης μπορεί να εξεταστεί στη διδασκαλία μέσω ενός αυτοματοποιημένου ρομπότ σε συνεργασία με τον συντονιστή-καθηγητή. Ας πούμε ότι οι μαθητές δυσκολεύονται να λύσουν μελέτες περιπτώσεων για ερωτήσεις αξιολόγησης. Το αυτοματοποιημένο ρομπότ θα πραγματοποιήσει μια αυτοματοποιημένη αναζήτηση και θα δώσει τις απαντήσεις στον συντονιστή, ο οποίος με κάποια διόρθωση, αν αυτός κρίνει αναγκαίο θα μπορεί να τις κατευθύνει στον μαθητή [64]. Παρακάτω αναφέρονται οι επικρατέστεροι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης.

- **Βαθιά μάθηση (Deep Learning):** Η βαθιά μάθηση, που θεωρείται το ζωτικό συστατικό των τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης, έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στα ασύρματα δίκτυα. Θα διαδραματίσει ουσιαστικό ρόλο σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των σημασιολογικών επικοινωνιών, της ολιστικής διαχείρισης της επικοινωνίας, των περιοχών πόρων ελέγχου, της προσωρινής αποθήκευσης και του υπολογισμού, που ωθούν τη μετατόπιση παραδείγματος του 6G [83]. Τα νευρωνικά δίκτυα βαθιάς μάθησης, ή τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, επιχειρούν να μιμηθούν τον ανθρώπινο εγκέφαλο μέσω ενός συνδυασμού εισροών δεδομένων και μεροληψίας. Αυτά τα στοιχεία συνεργάζονται για την ακριβή αναγνώριση, ταξινόμηση και περιγραφή αντικειμένων μέσα στα δεδομένα.
- **Εποπτευόμενη μάθηση (Supervised Learning):** Η εποπτευόμενη μάθηση εκπαιδεύει το μοντέλο μηχανής χρησιμοποιώντας δεδομένα εκπαίδευσης με ετικέτα. Υπάρχουν ορισμένοι καλά ανεπτυγ-

μένοι αλγόριθμοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο δίκτυο 6G, όπως μηχανές υποστήριξης διανυσμάτων, γραμμική παλινδρόμηση, λογιστική παλινδρόμηση και ανάλυση γραμμικής διάκρισης. Οι τεχνικές εποπτευόμενης μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε φυσικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο δικτύου. Στο φυσικό επίπεδο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε εποπτευόμενη μάθηση για εκτίμηση καταστάσεων καναλιού, αποκωδικοποίηση καναλιών, κ.λ.π. Οι τεχνικές εποπτευόμενης εκμάθησης μπορούν να αναπτυχθούν για την προσωρινή αποθήκευση, την ταξινόμηση της κυκλοφορίας και τον μετριασμό της καθυστέρησης στο επίπεδο δικτύου.

- **Μάθηση χωρίς επίβλεψη (Unsupervised Learning):** Η μάθηση χωρίς επίβλεψη αξιοποιείται για την εύρεση απροσδιόριστων μοτίβων στο σύνολο δεδομένων χωρίς τη χρήση ετικετών. Οι κοινώς χρησιμοποιούμενες τεχνικές μάθησης χωρίς επίβλεψη περιλαμβάνουν ομαδοποίηση, ανίχνευση ανωμαλιών, αυτοκωδικοποιητές και βαθιά δίκτυα πεποιθήσεων. Στο φυσικό επίπεδο, οι τεχνικές μάθησης χωρίς επίβλεψη ισχύουν για τη βέλτιστη διαμόρφωση, την εξαγωγή χαρακτηριστικών με επίγνωση καναλιού κ.λ.π. Επιπλέον, οι τεχνολογίες μάθησης χωρίς επίβλεψη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δρομολόγηση, έλεγχο κυκλοφορίας και πρόβλεψη παραμέτρων στο επίπεδο δικτύου.

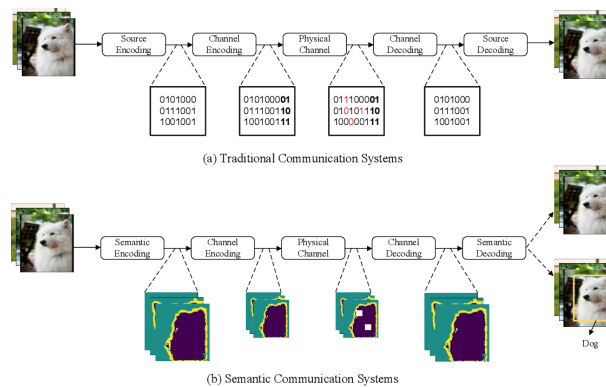
Distributed edge-cloud continuum: Το Distributed edge-cloud continuum μπορεί να θεωρηθεί μια εναλλακτική του cloud computing, το οποίο γεννήθηκε από την άνοδο των δικτύων 5G και του IoT αλλά μάλιστα να επεκταθεί στο 6G. Το Distributed edge-cloud continuum μετακινεί ένα μέρος του αποθηκευτικού χώρου και των υπολογιστικών πόρων έξω από το κεντρικό κέντρο δεδομένων και πιο κοντά στην πηγή των δεδομένων. Αντί να μεταδίδονται ακατέργαστα δεδομένα σε ένα κέντρο δεδομένων για επεξεργασία και ανάλυση, αυτή η εργασία εκτελείται εκεί όπου παράγονται πραγματικά τα δεδομένα. Μόνο το αποτέλεσμα αυτής της υπολογιστικής εργασίας όπως επιχειρηματικές πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, προβλέψεις συντήρησης εξοπλισμού και άλλα, αποστέλλονται πίσω στο κύριο κέντρο δεδομένων για έλεγχο. Το Distributed edge-cloud continuum χρησιμοποιείται για την επεξεργασία δεδομένων ευαίσθητων στο χρόνο, ενώ το cloud computing χρησιμοποιείται για την επεξεργασία δεδομένων όπου δεν υπάρχει ανησυχία σχετικά με τον χρόνο. Εκτός από τον λανθάνοντα χρόνο, το Distributed edge-cloud continuum προτιμάται έναντι του cloud computing σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, όπου υπάρχει περιορισμένη ή καθόλου συνδεσιμότητα σε μια κεντρική τοποθεσία [54]. Μεταξύ των αναμενόμενων πλεονεκτημάτων της ανάπτυξης Distributed edge-cloud continuum στα τρέχοντα δίκτυα 5G υπάρχουν: βελτιώσεις απόδοσης, βελτιστοποίηση κίνησης και νέες υπηρεσίες εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης. Στο 6G θα συμβάλει σημαντικά σε όλες αυτές τις προαναφερθείσες πτυχές [85]. Λογικό προαπαιτούμενο είναι η συσκευή του χρήστη να έχει την απαιτούμενη υπολογιστική δυνατότητα για να φέρει εις πέρας την ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η “Precedence Research” μια από τις πιο πασίγνωστες εταιρίες μελέτης της μελλοντικής αγοράς προβλέπει δραστική αύξηση του edge computing, το οποίο παριστάνεται στο σχήμα 1.25, όπου η κλίμακα είναι σε δισεκατομμύρια δολάρια [87].

Διαδίκτυο των πάντων (Internet of Everything, IoE): Το Δίκτυο των πάντων είναι η απρόσκοπτη ενοποίηση και αυτόνομος συντονισμός μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού υπολογιστικών στοιχείων και αισθητήρων, αντικειμένων ή συσκευών, ανθρώπων, διαδικασιών και δεδομένων που χρησιμοποιούν την υποδομή του Διαδικτύου. Το 5G έχει τους επαναστατικούς στόχους για το IoE μεταμορφώνοντας την παραδοσιακή διάταξη κινητής επικοινωνίας. Ωστόσο, το 5G θεωρείται ως η αρχή του IoE και αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις από την τυποποίηση έως την εμπορευματοποίηση. Το σύστημα 6G θα παρέχει πλήρη υποστήριξη IoE.



Σχήμα 1.25: Η μελλοντική αγορά ως αναφορά το Edge computing με κλίμακα τα δισεκατομμύρια δολάρια [87].

Επικοινωνία ορατού φωτός (Visible light communication-VLC): Χρησιμοποιώντας το ορατό φάσμα, όπου είναι αυτό εφικτό, γίνεται να φτάσουμε ταχύτητες που αγγίζουν το 1 Tbps, πράγμα που σημαίνει πως το VLC θα μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του 6G και αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο τομέα για μελέτη. Για επικοινωνία μικρής εμβέλειας, είτε λευκές δίοδοι λείζερ με διαμόρφωση δεδομένων είτε δίοδοι εκπομπής φωτός χρησιμοποιούνται ως πομποί, ενώ φωτοανιχνευτές χρησιμοποιούνται ως δέκτες. Επιπλέον, το VLC θεωρείται ως συμπληρωματική τεχνολογία των επικοινωνιών ραδιοσυχνοτήτων καθώς μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα μη αδειοδοτημένο φάσμα για επικοινωνία [88]. Το VLC δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σενάρια εξωτερικών χώρων επειδή έχει περιορισμένο εύρος κάλυψης και χρειάζεται πηγή φωτισμού και υποφέρει από παρεμβολές από άλλες πηγές φωτός (π.χ. τον ήλιο). Επομένως, τα VLC είναι χρήσιμα σε περιπτώσεις όπου η παραδοσιακή επικοινωνία ραδιοσυχνοτήτων είναι λιγότερο ενεργή, για παράδειγμα, η υπηρεσία διαδικτύου στην καμπίνα. Επιπλέον, το VLC προβλέπεται να χρησιμοποιείται ευρέως στις επικοινωνίες οχήματος με όχημα (Vehicle to vehicle), οι οποίες εξαρτώνται από τα φώτα κεφαλής και πίσω φώτα των αυτοκινήτων για επικοινωνίες. Ακόμα, το VLC χρησιμεύει ως πιθανή λύση για την κατασκευή υποβρυχίων ασύρματων δικτύων ταχυτήτων gigabit [89]. Μια ανησυχία που πρέπει να ληφθεί υπόψη, ωστόσο, είναι το αναπόφευκτο τρεμόπαιγμα που είναι αποτέλεσμα της διαμόρφωσης του μεταδιδόμενου σήματος στο LED. Τυπικά, αυτό το τρεμόπαιγμα είναι τόσο γρήγορο που δεν είναι παρατηρήσιμο, δηλαδή τα ανθρώπινα μάτια το αντιλαμβάνονται ως συνεχές φως. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι το τρεμόπαιγμα των LED εμφανίζεται ακόμη και σε LED που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για φωτισμό, το οποίο οφείλεται σε διακυμάνσεις της τάσης οδήγησης. Και στις δύο περιπτώσεις (εσκεμμένου και μη τρεμόπαιγμα), είναι δυνατό να ληφθούν μέτρα για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης του στα ανθρώπινα μάτια. Για το σκοπό αυτό, το 2015, η IEEE ανέπτυξε ένα πρότυπο που απαριθμεί τις συνιστώμενες πρακτικές για τη διαμόρφωση του ρεύματος σε LED υψηλής φωτεινότητας με στόχο τον μετριασμό των κινδύνων για την υγεία των θεατών [90]. Στην πράξη, αυτό γίνεται ελαχιστοποιώντας το δυναμικό των διακυμάνσεων της έντασης λόγω του σχεδιασμού συμβόλων διαμόρφωσης.



Σχήμα 1.26: Σύστημα Σημασιολογικής Επικοινωνίας για αναγνώριση εικόνας [91].

Σημασιολογική Επικοινωνία (Semantics communication-SC): Τα δίκτυα των γενιών μέχρι και σήμερα χρησιμοποιούν τον παραδοσιακό τρόπο αποστολής πληροφοριών με κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση των συμβόλων με τεχνικές εύρεσης λάθους οι οποίες να μεν μειώνουν την πιθανότητα σφάλματος άλλα μειώνουν σε σημαντικό βαθμό την ταχύτητά και την απόδοσή της επικοινωνίας. Ωστόσο αντ' αυτού στο 6g αναμένεται να αξιοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα η σημασιολογική επικοινωνία. Σε αντίθεση με το παραδοσιακό τρόπο, οι σημασιολογικές επικοινωνίες μεταδίδουν μόνο τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικές με τη συγκεκριμένη εργασία στον δέκτη, γεγονός που οδηγεί σε ένα πραγματικά έξυπνο σύστημα με σημαντική μείωση της κίνησης δεδομένων [91]. Στο σχήμα 1.26 παριστάνεται σενάριο σημασιολογικών επικοινωνιών, όπου ο σκοπός μετάδοσης είναι η αποστολή μιας εικόνας. Αντί να μεταδίδονται ακολουθίες bit που αντιπροσωπεύουν ολόκληρη την εικόνα, ένας σημασιολογικός πομπός εξάγει χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την αναγνώριση του αντικειμένου, δηλαδή του σκύλου, στην πηγή. Απαραίτητη προϋπόθεση του παραπάνω είναι ο περιορισμός των εσφαλμένων συμβόλων που υπόσχεται το 6G.

Στον πίνακα 1.2 παρατίθενται τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της κάθε γενιάς κινητής τηλεφωνίας.

1.3.3 Ανοικτά προβλήματα

Το 6G είναι ακόμα στα πρώιμα στάδια της δημιουργίας του, οπότε υπάρχουν ακόμα πολλοί προβληματισμοί. Οι επικρατέστεροι είναι οι παρακάτω:

Ενεργειακή αποδοτικότητα: Το 6G θα μπορεί να συνδέει ευέλικτα και αποτελεσματικά πάνω από τρισεκατομμύρια αυτόνομες κινητές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης. Σε αυτή την περίπτωση, οι ενεργειακά αποδοτικές τεχνικές γίνονται πολύ σημαντικές όσον αφορά την εμπειρία του χρήστη. Επί του παρόντος, τα περισσότερα smartphone μπορούν να τροφοδοτηθούν μόνο για μία με ίσως δύο ημέρες, γεγονός που περιορίζει την ανάπτυξη της κινητής επικοινωνίας. Ως αποτέλεσμα, απαιτούνται νέες τεχνικές τροφοδοσίας μαζί με απλοποιημένη αρχιτεκτονική επεξεργασίας σήματος για να καταστεί το δίκτυο 6G αποδοτικό για τη συνεχή ανάπτυξη των κινητών συσκευών. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, από τη μία πλευρά, μπορούν να αναπτυχθούν νέες αρχιτεκτονικές φορητών συσκευών που επιτρέπουν διαφορετικές μεθόδους παροχής ρεύματος, όπως μέθοδοι ασύρματου τύπου (π.χ. ασύρματη συλλογή ενέργειας και ασύρματη μεταφορά ενέργειας). Από την άλλη πλευρά, μπορούν να προσαρμοστούν προηγμένες ενεργειακά αποδοτικές τεχνικές ασύρματης επικοινωνίας. Για παράδειγμα, μπορού-

Γενιά	0G	1G	2G	3G	4G	5G	6g
Χρονολογία	1950-1960	1970-1980	1990-2000	2000-2010	2010-2020	2020-2030	2030
Τοποθεσία πρώτης εμπορευματοποίησης	Νορβηγία	Αμερική	Φινλανδία	Ιαπωνία	Νότια Κορέα	Αμερική	TBD
Διαμόρφωση	-	FDMA	TDMA, CDMA	W-CDMA	CDMA, OFDMA	OFDMA	OFDM-SPM
Ρυθμός δεδομένων	-	2Kbps	64Kbps	21Mbps	1Gbps	20Gbps	1Tbps
Ρυθμός Δεδομένων ανά χρήστη	-	-	1Mbps	86Mbps	100Mbps	1Gbps	TBD
Χρόνος αδράνειας	-	-	-	-	50ms	1ms	10ns
Εύρος Ζώνης καναλιού	30KHz	30KHz	200KHz	5MHz	150MHz	4GHz	TBD
Συχνότητα	0.03-1GHz	800 MHz	800-1900 MHz	2-3.5GHz	2-5.8 GHz	2-39GHz	0.1-10 THz
Βασικά Χαρακτηριστικά	Αναλογική κλήση	-	SMS	Διαδίκτυο Webmail	Cloud computing	Edge Computing	AI networks
Βασικές Τεχνολογίες	P2P σύνδεση	Roaming	SIM	CA	Volte	SDN	ML & AI
Προδιαγραφές	-	AMPS	GSM, EDGE	UMTS	LTE	NR	TBD
Μεταγωγή	-	CS	CS-PS	CS-PS	PS	PS	PS

Πίνακας 1.2: Βασικά χαρακτηριστικά γενιών δικτύου [9].

με να σχεδιάσουμε αλγόριθμους προ-κωδικοποίησης και ανίχνευσης σήματος χαμηλής πολυπλοκότητας για να αντιμετωπίσουμε τους αντίστοιχους αλγόριθμους υπερύψηλων διαστάσεων σε σενάρια πολλών χρηστών UM-MIMO, με αποτέλεσμα υψηλή απόδοση ισχύος. Επιπλέον, η ολοκληρωμένη βελτιστοποίηση της μεθόδου τροφοδοσίας και της τεχνικής ασύρματης μετάδοσης με βάση τις απαιτήσεις των κινητών συσκευών είναι μια στρατηγική προσέγγιση για την υλοποίηση του μελλοντικού δικτύου 6G που λειτουργεί με κινητές συσκευές και επιτρέπει την ενεργειακή αυτονομία για διάχυτες συσκευές σε διαφοροποιημένες συνθήκες.

Απώλεια σήματος: Ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα με τις συχνότητες Terahertz είναι η μεγάλη εξασθένηση λόγω απόστασης. Τα σήματα Terahertz, λόγω της αυξημένης συχνότητας, έχουν ακόμα πιο περιορισμένη εμβέλεια από τα mmWaves. Η εξασθένηση λαμβάνει χώρα λόγω μοριακής απορρόφησης (molecular absorption), αλλά και απώλειας εξάπλωσης (spreading loss). Η μοριακή απορρόφηση συμβαίνει από την μετατροπή της ακτινοβολίας terahertz σε κινητική ενέργεια, εξαιτίας των μορίων του αέρα. Η απώλεια εξάπλωσης εμφανίζεται λόγω επέκτασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον αέρα και αυξάνεται τετραγωνικά με βάση την συχνότητα και την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρίζεται αναγκαία η ανατροφοδότηση του σήματος κάθε 1 μέτρο εκπομπής με στοιχειοκεραίες, κάτι που με τα δεδομένα του σήμερα δεν είναι οικονομικό και είναι μη πρακτικό. [92]. Λόγω του χαμηλού μήκους κύματος είναι επίσης ιδιαίτερα επιρρεπή σε εμπόδια.

Αξιοπιστία: Οι απαιτήσεις αξιοπιστίας του δικτύου 6G αναμένεται να είναι διαφορετικές σε κάθε περίπτωση. Αναδυόμενες υπηρεσίες όπως βιομηχανικός έλεγχος και απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις είναι ίσως το πιο αυστηρό σενάριο όπου το μέγιστο επιτρεπτό όριο λανθασμένου bit (max error bit rate) θα πρέπει να μην υπερβαίνει το 0.00001%. Μέχρι τώρα, η αξιοπιστία 5G ορίζεται από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών ως 99,999%, το οποίο δεν μπορεί να ικανοποιήσει την απαίτηση του μελλοντικού δικτύου και των εφαρμογών του 6G [62].

Κόστος: Μία από τις σημαντικότερες προϋποθέσεις του 6G είναι ο περιορισμός του κόστους. Παρόλο που οι επίγειες συνδέσεις θα είναι σχετικά χαμηλές σε κόστος εγκατάστασης, θα έχουν σημαντικό κόστος συντήρησης. Επιπρόσθετα, οι μη επίγειοι κόμβοι, όπως δορυφόροι και drones είναι πολύ ακριβοί. Στόχος είναι η εύρεση μεθόδων ελάττωσης του κόστους ώστε το 6G να είναι προσιτό σε όλους [92].

Το 6G θα βασίζεται στην τεχνητή νοημοσύνη για να ενεργοποιήσει πλήρως αυτόνομα δίκτυα. Επομένως, οι επιθέσεις σε συστήματα τεχνητής νοημοσύνης, ειδικά συστήματα Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), θα αποτελέσουν εμπόδιο στην ανάπτυξη του 6G. Οι επιθέσεις δηλητηρίασης, η έγχυση δεδομένων, χειραγώγηση δεδομένων, και η εξαγωγή μοντέλων είναι πιθανές επιθέσεις ασφαλείας [93].

Ετερογένεια: Το 6G θα συνδέει μια ποικιλία έξυπνων συσκευών. Είναι αδύνατο να παρέχουμε μόνο ένα παγκόσμιο δίκτυο για τη σύνδεση ολόκληρου του κόσμου. Το δίκτυο θα χωριστεί σε υποδίκτυα και αυτά τα υποδίκτυα δεν θα είναι ομοιογενή. Επιπλέον, το 6G θα ενσωματώνει τόσο τα μη επίγεια όσο και τα επίγεια δίκτυα, τα οποία είναι ετερογενή από τη φύση τους. Πρέπει να ληφθούν υπόψη τα διαφορετικά ετερογενή χαρακτηριστικά τους για την αποτελεσματική ενσωμάτωσή τους στο ενιαίο δίκτυο [92].

Δια-λειτουργικότητα πρωτοκόλλων επικοινωνίας: Όπως προαναφέρθηκε το δίκτυο 6G θα ενσωματώσει τόσο μη επίγεια όσο και επίγεια δίκτυα επικοινωνίας. Τα πρωτόκολλα TCP/IP που χρησιμοποιούνται για τα επίγεια δίκτυα επικοινωνίας είναι ακατάλληλα για δορυφορική επικοινωνία, εξαιτίας της καθυστέρησης.

ρησης μετάδοσης και του σχετικά μεγάλου αριθμού λανθασμένων bit σε σύγκριση με τις απαιτήσεις της μη επίγειας μετάδοσης. Εντούτοις, θα πρέπει να γίνει ανάλογη διαμόρφωσή των παραπάνω πρωτοκόλλων ή αντικατάστασή τους. Η φαινομενική μετατόπιση Doppler και η διαδορυφορική συνδεσιμότητα καθιστούν τις επικοινωνίες από δορυφόρο σε έδαφος δύσκολο να εφαρμοστούν [94]. Επιπρόσθετα, το 6G αναμένεται να συνδέει δίκτυα στο διάστημα, τον αέρα, το έδαφος και το νερό. Ως αποτέλεσμα, απαιτούνται προσαρμοσμένα σχήματα και δυναμικά πρωτόκολλα που προσαρμόζονται στο περιβάλλον τους για να παρέχουν ομαλή επικοινωνία και δια-λειτουργικότητα δικτύου. Ένας άλλος τομέας έρευνας είναι η ανάπτυξη μιας νέας δυναμικής τεχνολογίας πολλαπλής πρόσβασης που μπορεί να προσαρμοστεί στις μεταβαλλόμενες συνθήκες (ορθογώνιες ή μη, τυχαίες ή προγραμματισμένες).

Τόσο ο **χαρακτηρισμός καναλιού** όσο και η **εκτίμηση καναλιού σε πραγματικό χρόνο** είναι προκλήσεις στο UM MIMO πολλαπλών ζωνών. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι ότι διαφορετικά παράθυρα μετάδοσης μπορεί να εμφανίζουν αξιοσημείωτα διαφορετικές ιδιότητες διάδοσης, όχι μόνο όσον αφορά την απώλεια διαδρομής και το εύρος ζώνης μετάδοσης, αλλά και όσον αφορά το εύρος ζώνης συνοχής και την καθυστέρηση εξάπλωσης.

Απαίτηση υψηλής υπολογιστικής δύναμης: Τα δίκτυα 6G θα είναι εξαιρετικά μεγάλα, πολύπλοκα και πολυδιάστατα. Θα είναι επίσης δυναμικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις καταναλωτών και το φόρτος δεδομένων. Αυτές οι εργασίες απαιτούν μεγάλη υπολογιστική δύναμη, κάτι το οποίο κοστίζει [92].

Ασφάλεια: Το απόρρητο και η ασφάλεια δεδομένων είναι βασικές πτυχές οποιουδήποτε συστήματος επικοινωνίας, ειδικά στον προσωπικό, αμυντικό και τραπεζικό τομέα. Επειδή το 6G προορίζεται να είναι ένα πιο ανοιχτό δίκτυο από το 5G, η γραμμή μεταξύ συσκευών εντός και εκτός του δικτύου θα γίνεται ολοένα και πιο θολή. Ως αποτέλεσμα, τα τρέχοντα μέτρα ασφάλειας δικτύου, όπως η ασφάλεια πρωτοκόλλου διαδικτύου (IP security) και τα τείχη προστασίας (firewall), δεν θα είναι αρκετά ισχυρά για να προστατεύσουν το δίκτυο από εξωτερικούς εισβολείς. Στο 6G, εκτός από τη συμβατική ασφάλεια φυσικού επιπέδου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι τύποι ασφάλειας, όπως η ενσωματωμένη ασφάλεια δικτύου. Επομένως, οι νέες προσεγγίσεις ασφαλείας, που βασίζονται σε χαμηλή πολυπλοκότητα και έχουν υψηλά επίπεδα ασφάλειας, αξίζουν εντατικότερη μελέτη. Για το σκοπό αυτό, ορισμένες τεχνικές ασφάλειας φυσικού επιπέδου που αξιοποιούνται στο 5G μπορούν να επεκταθούν για δίκτυα 6G, όπως ο έλεγχος ισοτιμίας χαμηλής πυκνότητας (Low-density parity-check code-LDPC) που βασίζεται σε ασφαλές μαζικό MIMO. Οι ασφαλείς τεχνικές mmWave μπορεί επίσης να είναι κατάλληλες για εφαρμογές ζώνης UM-MIMO και THz. Για την ενσωματωμένη ασφάλεια δικτύου, είναι πολύ σημαντικός ένας σωστός μηχανισμός διαχείρισης διαφορετικών κλειδιών λειτουργίας για διαφορετικούς τομείς ασφαλείας. Επιπρόσθετα, παραδοσιακή κρυπτογράφηση έχει γίνει μη ασφαλής καθώς οι τεχνολογίες μεγάλων δεδομένων και τεχνητής νοημοσύνης έχουν προχωρήσει. Κατά συνέπεια, χρειάζονται νέες τεχνικές προστασίας της ιδιωτικής ζωής. Ένας τύπος κατανεμημένης προεξοχής είναι το blockchain που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η αρχιτεκτονική ασφάλειας 6G θα πρέπει να υποστηρίζει τη βασική έννοια ασφάλειας της μηδενικής εμπιστοσύνης (Zero Trust-ZT) για να μετριάσει αυτό το πρόβλημα. Το ZT είναι ένα παράδειγμα ασφάλειας που δίνει έμφαση στην προστασία των πόρων του συστήματος πάνω από οτιδήποτε άλλο. Το ZT προϋποθέτει ότι ένας εισβολέας μπορεί να ζει μέσα στο δίκτυο και ότι η αρχιτεκτονική του δικτύου είναι προσβάσιμη ή αναξιόπιστη από το εξωτερικό. Μια τέτοια αξιολόγηση πρέπει να γίνεται τακτικά και πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για τη μείωση του κινδύνου εσωτερικής απώλειας πολύτιμων στοιχείων [10]. Επιπρόσθετα, με την εφαρμογή τεχνολογιών βαθιάς μάθησης (deep learning)

και τεχνητής νοημοσύνης (Artificial intelligence-AI) σε φυσικά επίπεδα καθώς και σε επίπεδα δικτύου, η ασφάλεια θα βελτιωθεί περιορίζοντας σημαντικά εξαπατήσεις, και κλοπή περιουσιακών στοιχείων.

Ίσως ο σημαντικότερος από τους προβληματισμούς είναι οι πιθανές **επιπτώσεις της Terahertz ακτινοβολίας στο ανθρώπινο σώμα**. Ιδιαίτερη σημασία θα έχει να μελετηθούν τυχόν μακροχρόνιες επιπτώσεις που μπορεί να έχει την δυνατότητα να προκαλέσει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπουν τα κύματα Terahertz στο ανθρώπινο σώμα, κάτι το οποίο είναι ακόμα δύσκολο και χρονοβόρο για να εξεταστεί. Είναι γνωστό ότι τα πιο επιρρεπή σημεία του ανθρώπινου σώματος όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι τα αυτιά το κεφάλι και το κρανίο, τα οποία βρίσκονται σε σχεδόν άμεση επαφή με την συσκευή-Πηγή ακτινοβολίας σε μια απλή κλήση τηλεφώνου χωρίς ακουστικά. Παρόλο που τα μακροχρόνια αποτελέσματά είναι δύσκολο να αναλυθούν, τυχόν βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις θα αναλυθούν στην ενότητα 4.

1.4 Δομή πτυχιακής και μεθοδολογία

Στην προκειμένη εργασία θα αναλυθεί εκτενέστερα το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, οι διάφορες ιδιότητες του και θα μελετηθούν οι επιπτώσεις και τα προβλήματα που μπορεί να προκαλέσει η ακτινοβολία συχνοτήτων Terahertz στο ανθρώπινο σώμα σε σύγκρισή με τις προηγούμενες γενιές κινητής τηλεφωνίας. Θα αναλυθούν οι ιοντίζουσες και οι μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες και τα χαρακτηριστικά του κάθε τύπου ακτινοβολίας. Ακόμα, θα μελετηθούν τα προτεινόμενα όρια της μέγιστης λαμβανόμενης ακτινοβολίας που έχουν θεσπισθεί καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακτινοβολία στο ανθρώπινο σώμα. Συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις του ειδικού ρυθμού απορρόφησης της πυκνότητας ισχύος και της ακτινοβολούμενης ισχύος σε διάφορα σενάρια μακρινής και κοντινής εμβέλειας, ώστε να μελετηθεί κατά πόσο επηρεάζουν τον ρυθμό απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η μεταβολή της απόστασης της θερμοκρασίας και της συχνότητάς. Τέλος θα ληφθούν συμπεράσματα για το αν και κατά πόσο η τεχνολογία κυμάτων Terahertz θα είναι επιβλαβής για τους ανθρώπινους ιστούς και τον ανθρώπινο οργανισμό γενικότερα.

1.5 Επίλογος

Η εξέλιξη των τεχνολογιών επικοινωνιών από το 0G στο 5G είναι ένα αξιοσημείωτο ταξίδι που έφερε επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο συνδεόμαστε και αλληλεπιδρούμε με τον κόσμο γύρω μας. Ξεκινώντας με τις βασικές αναλογικές δυνατότητες του 0G, ανά δέκα χρόνια κάθε επόμενη γενιά έφερε πρωτοφανείς εξελίξεις, επιτρέποντας ταχύτερες, πιο αξιόπιστες και ολοένα και πιο καθηλωτικές εμπειρίες επικοινωνίας για να ικανοποιήσουν τις συνεχώς αυξανόμενες προσδοκίες. Το 6G αναμένεται να φέρει την επανάσταση στον τρόπο επικοινωνίας και της ευημερίας των ανθρώπων γενικότερα, εκμηδενίζοντας του χρόνου αναμονής και ενεργοποιώντας υπηρεσίες μη υλοποιησιμες από τις προηγούμενες γενιές. Ωστόσο χρήζει σημαντικό να γίνει μια εκτενής προετοιμασία σχετικά με τις απαιτήσεις και την επικινδυνότητα που μπορεί να αποφέρουν οι καινούργιες τεχνολογίες που θα εισάγει το 6G, πιο συγκεκριμένα τα κύματα Terahertz (THz).

Κεφάλαιο 2ο: Έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

2.1 Εισαγωγή

Οι άνθρωποι εκτίθενται καθημερινά σε διάφορα είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Βέβαια ο βαθμός επικινδυνότητας κάθε μορφής ακτινοβολίας ποικίλλει. Είναι πλέον ευρέως γνωστό ότι η υπεριώδης ακτινοβολία είναι επιβλαβής για το ανθρώπινο σώμα, ειδικά μετά από παρατεταμένη έκθεση όπου υπάρχει κίνδυνος ανεπανόρθωτης ζημιάς. Ωστόσο, η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελεί μόνο ένα μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να περιγραφεί ως ένα ρεύμα σωματιδίων χωρίς μάζα, τα όποια ονομάζονται φωτόνια, το καθένα από τα οποία ταξιδεύει σε κυματοειδές μοτίβο με την ταχύτητα του φωτός. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι μια μορφή ενέργειας που δημιουργείται από την κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων, όπως η κίνηση των ηλεκτρονίων. Αυτή η ακτινοβολία αποτελείται από διακυμάνσεις των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που εξαπλώνονται μέσω του χώρου. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκδηλώνεται τόσο ως κύμα όσο και ως σωματίδιο (φωτόνιο). Αυτό το φαινόμενο, γνωστό ως κυματο-σωματίδιοδυϊσμός, περιγράφεται από την κβαντομηχανική και εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αλληλεπιδρά με την ύλη. Σε ομοιογενή, ισότοπα μέσα, οι ταλαντώσεις των δύο πεδίων είναι κάθετες μεταξύ τους και κάθετες στην κατεύθυνση της ενέργειας και της διάδοσης των κυμάτων, σχηματίζοντας έτσι ένα εγκάρσιο κύμα. Η θέση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μπορεί να χαρακτηριστεί είτε από την συχνότητα ταλάντωσης του είτε από το μήκος κύματός του, τα οποία είναι αντιστρόφως ανάλογα. Διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός ($c=299.792.458$ m/s) αλλά και μέσα στην ύλη με ταχύτητα λίγο μικρότερη απ' την ταχύτητα του φωτός. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καλύπτει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και ενεργειών, περιλαμβάνοντας (σε συχνοτική αύξουσα σειρά) τα γνωστά ραδιοκύματα, τις υπέρυθρες ακτινοβολίες, το ορατό φως, τις υπεριώδεις ακτινοβολίες, τις ακτίνες X και τις ακτινοβολίες τύπου γάμμα. Κάθε είδος ακτινοβολίας έχει διαφορετικές ενέργειες και δυναμικές ιδιότητες, αλληλεπιδρά δηλαδή με την ύλη με διαφορετικό τρόπο, και χρησιμοποιείται σε διαφορετικές εφαρμογές, όπως η επικοινωνία, η ιατρική διάγνωση και θεραπεία, ο αυτοματισμός και άλλα. Κάθε φωτόνιο περιέχει μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας. Οι διαφορετικοί τύποι ακτινοβολίας ορίζονται από την ποσότητα ενέργειας που βρίσκεται στα φωτόνια. Τα ραδιοκύματα έχουν φωτόνια με την χαμηλότερη ενέργεια, ενώ οι ακτίνες γάμμα έχουν την υψηλότερη ενέργεια. Άρα με την αύξησή της συχνότητάς αυξάνεται και η ενέργεια του κάθε ηλεκτρονίου. Όπως προαναφέρθηκε, η υπερβολική έκθεση σε ορισμένες μορφές αυτής της ακτινοβολίας, όπως οι υπεριώδεις ακτινοβολίες και ορισμένες μορφές ραδιοσυχνοτήτων, μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία.

2.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Ραδιοκύματα: Στο κατώτερο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ανήκουν τα ραδιοκύματα. Οι συχνότητες των ραδιοκυμάτων κυμαίνονται από 3 Hz μέχρι και 300 MHz και έχουν ενέργεια φωτονίων που κυμαίνεται από 12.4 feV μέχρι 12.4 neV. Όπως είναι φανερό, συσκευές όπως το απλό ραδιόφωνο και κατά συνεχεία οι ραδιοφωνικοί σταθμοί λαμβάνουν και εκπέμπουν ραδιοκύματα. Συσκευές όπως ασύρματοι και πομποδέκτες (walkie-talkie) χρησιμοποιούν ραδιοκύματα για τη μετάδοση και λήψη σημάτων



Σχήμα 2.1: Χρήση ραδιοεπικοινωνίας στον Β' Παγκόσμιο πόλεμο [96].

σε διάφορες αποστάσεις. Λόγω του μεγάλου μήκους κύματος τους, τα ραδιοκύματα μπορούν εύκολα να περάσουν μέσα από εμπόδια όπως κτίρια και τοίχους, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται συνήθως για ασύρματη επικοινωνία εκτεταμένης εμβέλειας. Τα ραδιοκύματα εκπέμπονται επίσης από αστέρια και αέρια στο διάστημα.

Τα ραδιοκύματα παράγονται προκαλώντας ταλάντωση ηλεκτρικών φορτίων σε μια κεραία μέσω της χρήσης ενός πομπού. Αυτά τα κύματα διαδίδονται στον χώρο και μπορούν να μεταφέρουν πληροφορίες μέσω διαμόρφωσης. Όταν φτάσουν σε μια κεραία λήψης, τα μεταβαλλόμενα πεδία προκαλούν ένα ρεύμα που στη συνέχεια ενισχύεται, συντονίζεται και αναδιαμορφώνεται για να ανακτήσει τις αρχικές πληροφορίες [95].

Τα ραδιοκύματα προβλέφθηκαν για πρώτη φορά από τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού που προτάθηκε το 1867 από τον Σκοτσέζο μαθηματικό φυσικό James Clerk Maxwell. Η μαθηματική του θεωρία προέβλεψε ότι ένα συζευγμένο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο θα μπορούσε να ταξιδέψει στο διάστημα ως «ηλεκτρομαγνητικό κύμα» (electromagnetic wave). Ο Maxwell πρότεινε ότι το φως αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα πολύ μικρού μήκους (κύματος). Το 1887, ο Γερμανός φυσικός Heinrich Hertz [95] κατάφερε να δημιουργήσει πειραματικά ραδιοκύματα στο εργαστήριό του, δείχνοντας ότι εμφάνιζαν τις ίδιες κυματικές ιδιότητες με το φως: στάσιμα κύματα, διάθλαση, περίθλαση και πόλωση. Οι κυβερνήσεις άρχισαν να θεσπίζουν κανόνες και περιορισμούς για τις εκπομπές για την αποφυγή παρεμβολών και τη διασφάλιση της δίκαιης χρήσης του αρκετά περιορισμένου ραδιοφάσματος. Με άλλα λόγια περιορίσαν το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνταν για στρατιωτικούς, εμπορικούς σκοπούς καθώς και άλλους παράγοντες. Οι πρώτες εμπορικές ραδιοφωνικές εκπομπές ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1920, σηματοδοτώντας τη γέννηση του ραδιοτηλεοπτικού κλάδου. Η ραδιοτεχνολογία έπαιξε κρίσιμο ρόλο κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου-όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1- χρησιμεύοντας ως μέσο επικοινωνίας για στρατιωτικές επιχειρήσεις.

Μετά τον πόλεμο, η πρόοδος στη ραδιοτεχνολογία συνεχίστηκε, πάρα τους προβληματισμούς αρκετών για την σωματική υγεία, οδηγώντας στην ανάπτυξη πιο εξελιγμένων συστημάτων επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των ραντάρ, των δορυφορικών επικοινωνιών και των κυψελοειδών δικτύων [1]. Η ραδιοσυχνότητα που χρησιμοποιείται στην κινητή επικοινωνία έχει την ικανότητα να διεισδύει μέσω ημιστερεών ουσιών όπως το κρέας και οι ζωντανοί ιστοί. Έρευνες που διεξήχθησαν δείχνουν ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που παράγει το κινητό τηλέφωνο μπορεί να προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις στον άνθρωπο ειδικά σε σημείο κοντά στην περιοχή του κρανίου του αυτιού. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων μέσα στα άτομα θα παράγει θερμότητα τη λεγόμενη θερμική ακτινοβολία. Η συχνότητα των εκπεμπόμενων κυμάτων της θερμικής ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του θερμαινόμενου αντικειμένου. Καθώς η θερμοκρασία του θερμαινόμενου αντικειμένου αυξάνεται, η συχνότητα της θερμικής ακτινοβολίας θα αυξάνεται επίσης και αντίστροφα [17]. Με άλλα λόγια, για όσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ένα σώμα είναι εκτεθειμένο σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και κατά συνέπεια αυξάνεται η θερμοκρασία του θα αυξάνεται συνεχώς η και συχνότητα της ακτινοβολίας, εξηγώντας έτσι τους λόγους που ακόμα και ένα κύμα χαμηλής ενέργειας φωτονίων μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο σώμα.

Μικροκύματα: Τα μικροκύματα είναι μια «ζώνη» που ουσιαστικά βρίσκεται στο άνω άκρο των υψηλότερων συχνοτήτων των ραδιοκυμάτων, ωστόσο συνήθως διακρίνονται από τα ραδιοκύματα λόγω της διαφοροποίησης των τεχνολογιών και εφαρμογών στα οποία χρησιμοποιούνται. Κυμαίνονται από τα 300 MHz μέχρι και τα 300 GHz όσον αφορά την συχνότητα και από 1.24 μεV έως 1.24 meV όσον αφορά την ενέργεια ανά φωτόνιο. Η ακτινοβολία μικροκυμάτων όπως φαίνεται και από το όνομα είναι αυτή που χρησιμοποιείται για να ζεσταίνει και να μαγειρεύει το φαγητό μας. Οι φούρνοι μικροκυμάτων έχουν σχεδιαστεί για να εκπέμπουν ακτινοβολία μικροκυμάτων σε μια συγκεκριμένη συχνότητα που απορροφάται από τα μόρια του νερού με αποτέλεσμα τα μόρια του νερού να δονούνται και να δημιουργούν θερμότητα. Η συχνότητα που χρησιμοποιείται στους οικιακούς φούρνους μικροκυμάτων είναι περίπου 2,45 GHz. Παρόλο που η συχνότητα των 2,45 GHz είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην θέρμανση του νερού, άλλες συχνότητες εντός της περιοχής μικροκυμάτων αλληλεπιδρούν επίσης με τα μόρια του νερού, αν και όχι τόσο αποτελεσματικά. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι επειδή τα 2.45 GHz είναι ακριβώς η συχνότητα βρασμού του νερού. Στο σχήμα 2.2 παριστάνεται ο πρώτος οικιακός φούρνος μικροκυμάτων της Panasonic που είναι ένας από τους πρώτους φούρνους μικροκυμάτων που έγινε διαθέσιμος για το ευρύ κοινό. Αν και αρκετά ογκώδης για τα σημερινά δεδομένα, λειτουργικά είναι παρόμοιος με τα σύγχρονα μοντέλα της αγοράς. Οι φυσικές πηγές ακτινοβολίας μικροκυμάτων προέρχονται κυρίως από αστρονομικά φαινόμενα στο διάστημα και την ατμόσφαιρα της Γης. Ίσως το σημαντικότερο από αυτά είναι η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου μικροκυμάτων (Cosmic Microwave Background Radiation-CMBR): Αυτή είναι η υπολειπόμενη ακτινοβολία από τη Μεγάλη Έκρηξη (Big bang) και είναι μια από τις πιο σημαντικές φυσικές πηγές ακτινοβολίας μικροκυμάτων. Το CMBR διαπερνά το σύμπαν ομοιόμορφα και είναι ανιχνεύσιμο προς όλες τις κατευθύνσεις. Το CMBR είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της πρώιμης μορφής του σύμπαντος και του σχηματισμού κοσμικών δομών. Εντοπίστηκε για πρώτη φορά το 1965 από τους Arno Penzias και Robert Wilson [97].

Η ατμόσφαιρα της Γης συμβάλλει επίσης στη φυσική ακτινοβολία μικροκυμάτων. Οι υδρατμοί, ειδικότερα, παρουσιάζουν απορρόφηση και εκπομπή μικροκυμάτων, οδηγώντας σε χαρακτηριστικά όπως γραμμές υδρατμών στο φάσμα μικροκυμάτων. Αυτό το φαινόμενο χρησιμοποιείται στη μετεωρολογία για τη μελέτη και πρόβλεψη των ατμοσφαιρικών συνθηκών.



Σχήμα 2.2: Ο πρώτος οικιακός φούρνος μικροκυμάτων της Panasonic που κυκλοφόρησε το 1966 [98].

Η θερμική επίδραση των μικροκυμάτων σε ορισμένα υλικά αναγνωρίστηκε ακόμη και από τον 19^ο αιώνα. Εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας που χρησιμοποιούν διηλεκτρική θέρμανση λειτουργούσαν τις πρώτες δεκαετίες του εικοστού αιώνα. Ωστόσο, οι συμπαγείς και απλοί φούρνοι μικροκυμάτων στην μορφή που ξέρουμε σήμερα δεν θα ήταν διαθέσιμοι μέχρι και το 1950. Η σχετικά καθυστερημένη εγκαθίδρυση τους ίσως οφείλεται στο γεγονός πως η μεταφορά με χρήση πεδίου μικροκυμάτων ήταν πολύ διαφορετική από αυτήν των δύο καθιερωμένων τρόπων μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή αγωγιμότητα και ακτινοβολία [97]. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, αναγνωρίστηκε ότι ένα αποτελεσματικό ραντάρ μικροκυμάτων μεγάλης εμβέλειας θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικό πλεονέκτημα και τελικά να συντελέσει στην νίκη στην πλευρά που θα δημιουργούσε επιτυχώς πρώτη ένα τέτοιο σύστημα [99].

Τα μικροκύματα έχουν μακρά ιστορία στις χημικές επιστήμες. Έχουν χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα πειραμάτων, για τη μέτρηση και τη θέρμανση, διεγείροντας πολλά διαφορετικά φαινόμενα από μαγνητικό συντονισμό έως τον συντονισμό κυκλοτρονίων, από την κατάλυση μέχρι τη συσσωμάτωση και τη σύνθεση. Στη μικροκυματική χημεία, σε χαμηλή ισχύ, οι μετρήσεις που χρησιμοποιούν το ηλεκτρικό πεδίο μικροκυμάτων μπόρεσαν να μετρήσουν με ακρίβεια τις αλλαγές στη δυναμική φορτίου που προκύπτουν από φαινόμενα από την απενεργοποίηση του καταλύτη έως την προσρόφηση αμμωνίας στους ζεόλιθους. Μετρήσεις με μαγνητικά πεδία υψηλής συχνότητας χρησιμοποιούνται συνήθως στην μαγνητική απεικόνιση συντονισμού, πυρηνικό μαγνητικό συντονισμό και παραμαγνητικό συντονισμό ηλεκτρονίων. Τα τελευταία 20 χρόνια, η περαιτέρω κατανόηση του τρόπου αλληλεπίδρασης των μικροκυμάτων με τα χημικά είδη έχει οδηγήσει σε πλαίσια, μέσα στα οποία μπορούμε να κατανοήσουμε χημικές αντιδράσεις ενισχυμένες με μικροκύματα, για παράδειγμα στη θέρμανση με μικροκύματα σκονών για ετερογενή κατάλυση [100]. Στο σχήμα 2.3 απεικονίζεται ένας τυπικός χημικός αντιδραστήρας ο οποίος είναι ένας εξειδικευμένος εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιεί την ακτινοβολία μικροκυμάτων για χημικές αντιδράσεις [101]. Η χημεία με τη βοήθεια μικροκυμάτων (microwave-assisted chemistry) έχει εξέχουσα



Σχήμα 2.3: Χημικός αντιδραστήρας μικροκυμάτων της “Stonylab” [101]

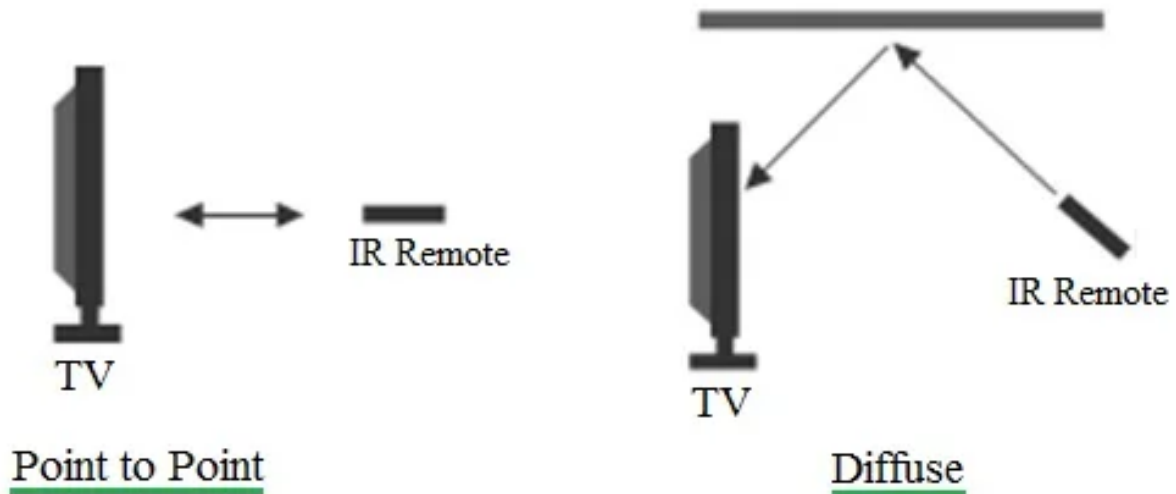
θέση για την επιτάχυνση των χημικών αντιδράσεων. Προσφέρει ταχύτερους χρόνους αντίδρασης και βελτιωμένες αποδόσεις σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους θέρμανσης. Στον κόσμο της απεικόνισης και της φασματοσκοπίας, το φάσμα μικροκυμάτων παρείχε πάντα ένα μοναδικό πλεονέκτημα με την ικανότητά του να αποτυπώνει με ακρίβεια φασματικές υπογραφές εξαιρετικά στενής ζώνης και να διεισδύει σε πολλά υλικά που είναι οπτικά ασαφή.

Παράλληλα στο κομμάτι της επικοινωνίας, τα μικροκύματα είναι αναπόσπαστο κομμάτι των κυβελωτών δικτύων, της δορυφορικής επικοινωνίας, της τεχνολογίας Wi-Fi του Bluetooth του Zigbee και του Wiimax. Τα περισσότερα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που χρησιμοποιούνται σήμερα, αξιοποιούν μικροκύματα. Οι γεωστατικοί δορυφόροι επικοινωνίας χρησιμοποιούν συχνότητες μικροκυμάτων για τη μετάδοση σημάτων τηλεόρασης, τηλεφώνου και δεδομένων σε ηπείρους και ωκεανούς. Τα ραδιοτηλεσκόπια ανιχνεύουν την κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου και άλλες ραδιοεκπομπές από ουράνια αντικείμενα, παρέχοντας πληροφορίες για την προέλευση και την εξέλιξη του σύμπαντος. Η επικοινωνία με μικροκύματα βασίζεται πολλές φορές στη διάδοση μέσω οπτικής επαφής (Line Of Sight-LOS). Τα μικροκύματα ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές και μπορούν να παρεμποδιστούν από εμπόδια όπως κτίρια, δέντρα και λόφους. Για να διατηρηθεί ένα ισχυρό σήμα, οι ζεύξεις επικοινωνίας πρέπει να διασφαλίζουν μια ανεμπόδιστη διαδρομή μεταξύ της κεραίας εκπομπής και λήψης. Τα μικροκύματα μπορούν να αναπηδήσουν από τις επιφάνειες, οδηγώντας σε ανάκλαση. Αυτή η ιδιότητα χρησιμοποιεί-

ται σε συστήματα ραντάρ για την επέκταση του εύρους κάλυψης ή για τον εντοπισμό αντικειμένων και εμποδίων. Όταν τα μικροκύματα περνούν από το ένα μέσο στο άλλο με διαφορετικό δείκτη διάθλασης, μπορούν να αλλάξουν κατεύθυνση. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως διάθλαση. Διαφορετικά υλικά μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια μικροκυμάτων. Τα μόρια του νερού, ειδικότερα, είναι αποτελεσματικά στην απορρόφηση των μικροκυμάτων, γι' αυτό και τα μικροκύματα χρησιμοποιούνται για θέρμανση και μαγείρεμα. Οι ιδιότητες απορρόφησης των υλικών επηρεάζουν την ισχύ του σήματος και μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια σήματος. Όταν τα μικροκύματα αλληλεπιδρούν με μικρά σωματίδια ή ανωμαλίες σε ένα υλικό, μπορούν να διασκορπιστούν σε διάφορες κατευθύνσεις. Αυτό το φαινόμενο σκέδασης μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του σήματος και χρησιμοποιείται επίσης σε εφαρμογές τηλ-επισκόπησης για τη συλλογή πληροφοριών για το περιβάλλον.

Υπέρυθρες ακτίνες: Το 1800, ο Sir William Herschel, ένας Βρετανός αστρονόμος, διεξήγαγε πειράματα χρησιμοποιώντας ένα πρίσμα για να διαχωρίσει το ηλιακό φως στα διάφορα χρώματά του. Τοποθέτησε θερμομέτρα στις διαφορετικές χρωματιστές περιοχές μετά από το κόκκινο άκρο του φάσματος, όπου δεν υπήρχε ορατό φως. Ανακάλυψε ότι σε αυτές οι περιοχές υπήρχε μια αύξηση της θερμοκρασίας, υποδεικνύοντας την παρουσία «θερμιδικών ακτίνων» που ήταν πέρα από το ορατό φάσμα. Αυτό σηματοδότησε την ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η υπέρυθρη ακτινοβολία διακυμαίνεται από τα 3 THz μέχρι τα 30 THz και μπορεί να έχει ενέργεια φωτονίων από 12.4 meV μέχρι 1.24 eV. Διαχωρίζονται περαιτέρω ανάλογα με το μήκος κύματος όπως φαίνεται στον πίνακά 2.1. Για δισεκατομμύρια χρόνια, ο ήλιος εκπέμπει ακτινοβολία υπέρυθρων και οι ζωντανοί οργανισμοί στη γη έχουν εξελιχθεί για να αντιμετωπίζουν την ακτινοβολία υπέρυθρων ως σημαντικό περιβαλλοντικό παράγοντα ανάλογα με τον βιότοπο τους. Οι υπέρυθρες ακτίνες εκπέμπονται από όλα τα αντικείμενα με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν (-273,15°C ή 0 Kelvin). Μεταφέρουν ενέργεια και μπορούν να διεισδύσουν σε ορισμένα υλικά που δεν μπορεί το ορατό φως, όπως η ομίχλη, ο καπνός και ορισμένα πλαστικά. Αυτή η ικανότητα τα καθιστά χρήσιμα σε εφαρμογές όπως η τεχνολογία νυχτερινής όρασης, οι κάμερες θερμικής απεικόνισης, τα τηλεχειριστήρια, ακόμη και στην επιστημονική έρευνα για τη μελέτη μακρινών αντικειμένων στο διάστημα. Πολλές αρχαίες θεραπείες έχουν εφαρμόσει το ηλιακό φως για την επούλωση πληγών και την ανακούφιση από τον πόνο, κάτι το οποίο συνέβαινε χάρις των υπέρυθρων. Τα υπέρυθρα τηλεσκόπια επέτρεψαν στους αστρονόμους να παρατηρήσουν ουράνια αντικείμενα που εκπέμπουν κυρίως στο υπέρυθρο φάσμα, αποκαλύπτοντας ιδέες για το σχηματισμό άστρων, τους γαλαξίες και πολλά άλλα. Μολονότι το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να αντιληφθεί τις υπέρυθρες ακτίνες, μπορεί το ανθρώπινο σώμα να νιώσει την θερμότητα που εκπέμπουν. Η υπέρυθρη ακτινοβολία βρήκε διάφορες πρακτικές εφαρμογές από το δεύτερο μισό του 19ου αιώνα και μετά. Χρησιμοποιήθηκε στην υπέρυθρη φωτογραφία και για πειράματα που σχετίζονται με τη θερμότητα. Η υπέρυθρη φωτογραφία έχει την ικανότητα να ανιχνεύει ευκρινώς σώματά μέσα στο νερό ή σε άσχημες καιρικές συνθήκες. Η ανάπτυξη βελτιωμένων ανιχνευτών και φασματομέτρων επέτρεψε στους επιστήμονες να μελετήσουν και να μετρήσουν τις ιδιότητες της υπέρυθρης ακτινοβολίας με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η υπέρυθρη τεχνολογία έπαιξε κρίσιμο ρόλο κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, όπου χρησιμοποιήθηκε για νυχτερινή όραση και στόχευση εχθρικών αεροσκαφών. Τα γυαλιά νυχτερινής όρασης συλλαμβάνουν το υπέρυθρο φως που εκπέμπεται από το δέρμα και τα αντικείμενα μας με θερμότητα. Η υπέρυθρη ακτινοβολία χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της ιατρικής απεικόνισης (όπως η υπέρυθρη θερμογραφία), των συστημάτων ασφαλείας, της επικοινωνίας (η επικοινωνία με οπτικές ίνες χρησιμοποιεί υπέρυθρα σήματα) και της παρακολούθησης του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.4: Τρόποι επικοινωνίας υπέρυθρων ακτίνων [102].

Επιπρόσθετα χρησιμοποιήθηκαν στα κινητά τηλέφωνα ως τρόπος επικοινωνίας μεταξύ δύο συσκευών, μικρής απόστασης και χαμηλού κόστους [103], όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5. Υπάρχουν δύο λειτουργίες διαμόρφωσης στις υπέρυθρες: η επικοινωνία από σημείο σε σημείο (Point to Point-P2P) και η επικοινωνία μέσω διάχυσης.

- Στην επικοινωνία από σημείο σε σημείο, τόσο οι συσκευές υπέρυθρων πομπού όσο και δέκτης πρέπει να τοποθετούνται σε οπτική γωνία και να μην υπάρχουν εμπόδια (π.χ. τοίχοι) ανάμεσά τους.
- Στην επικοινωνία διάχυσης, οι συσκευές υπέρυθρων πομπού και δέκτη θα πρέπει να βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη, αλλά δεν χρειάζεται να βρίσκονται σε ευθεία οπτική γωνία. Τα περισσότερα εμπορικά προϊόντα υπέρυθρων λειτουργούν αποτελεσματικά σε απόσταση 15 μοιρών μεταξύ τους.

Παράδειγμα του παραπάνω παριστάνεται στο σχήμα 2.4.

Ενώ η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι απαραίτητη σε διάφορα πεδία, η παρατεταμένη ή/και υπερβολική έκθεση σε έντονες υπέρυθρες ακτίνες μπορεί να προκαλέσει θερμικά προβλήματα και πιθανή βλάβη των ιστών, ειδικά στο δέρμα και τα μάτια. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα μέτρα ασφαλείας είναι ζωτικής σημασίας όταν αντιμετωπίζουμε συσκευές που εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία υψηλής έντασης.

Όνομα Υποκατηγορίας	Συντομογραφία	Μήκος Κύματος	Συχνότητα
Εγγύς υπέρυθρες	NIR	0.7-1.4 μ m	300 THz
Μεσαίες υπέρυθρες	MWIR	3-8 μ m	30 THz
Μακρινές Υπέρυθρες	FIR	15-1000 μ m	3 THz

Πίνακας 2.1: Υποκατηγορίες υπέρυθρων [105].

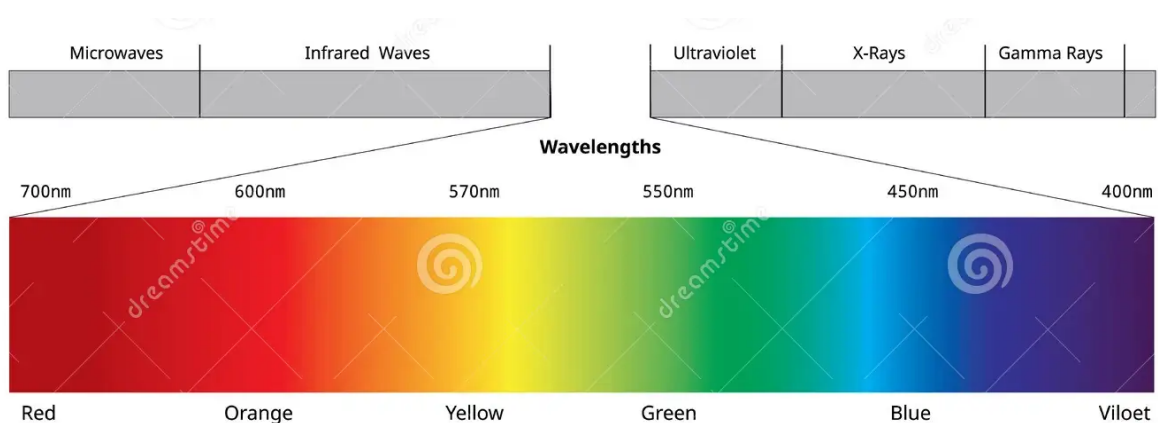
Ορατό φως: Το ορατό φως είναι το εύρος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που τα μάτια μας είναι ικανά να ανιχνεύσουν. Μας επιτρέπει να αντιλαμβανόμαστε και να διακρίνουμε διαφορετικά χρώματα και σχήματα στο περιβάλλον μας. Οι πυγολαμπίδες, οι λαμπτήρες και τα αστέρια εκπέμπουν ορατό φως. Οι καλλιτέχνες χρησιμοποιούν τα χρώματα του ορατού φάσματος για να δημιουργήσουν ένα ευρύ φάσμα οπτικών εμπειριών σε πίνακες ζωγραφικής, φωτογραφίες και άλλες μορφές τέχνης. Τα φυτά το



Σχήμα 2.5: Επικοινωνία μεταξύ 2 κινητών συσκευών με χρήση υπέρυθρων [104].

χρησιμοποιούν για να φέρουν εις πέρας την διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Το ορατό φως διακρίνεται σε συχνότητες από 400 THz μέχρι και περίπου τα 700 THz. Στο σχήμα 2.6 παριστάνεται το ορατό φως σε σχέση με το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το πόσο μικρό το ορατό φάσμα είναι σε σύγκριση με το σύνολο του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Τα σήματα ορατού φωτός χρησιμοποιούνται σε διάφορα συστήματα σηματοδότησης, όπως φώτα θαλάσσιας πλοήγησης και φανάρια. Το ορατό φως χρησιμοποιείται σε οπτικά όργανα όπως μικροσκόπια, τηλεσκόπια και κάμερες για τη λήψη και την οπτικοποίηση εικόνων. Η τηλεόραση, οι οθόνες υπολογιστών και ο φωτισμός του θεάτρου βασίζονται στο ορατό φως για τη δημιουργία οπτικών οθονών και εφέ. Η δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης του φωτός για φωτισμό και για ασύρματη επικοινωνία έχει πρό-



Σχήμα 2.6: Το ορατό φως στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.



Σχήμα 2.7: Οι πρώτες δίοδοι ορατού φωτός [107].

σφατα συγκεντρώσει την προσοχή από την κοινότητα των ασύρματων δικτύων. Η επικοινωνία ορατού φωτός (Visible Light Communication-VLC) αναγνωρίζεται ως μια πράσινη λύση τεχνολογίας επικοινωνίας και ως μια ασφαλής τεχνολογία για τους ανθρώπους σε σύγκριση με την τεχνολογία που βασίζεται στις ραδιοσυχνότητες. Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια αξιοποίησης του φάσματος του ορατού φωτός στον τομέα της επικοινωνίας, με την χρήση διόδων LED. Συγκεκριμένα, στόχος είναι να χρησιμοποιηθούν σε εξωτερικούς χώρους έναντι των ραδιοσυχνοτήτων, καθώς δεν εκπέμπουν σχεδόν καθόλου ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία [105]. Έχει δηλαδή επιτευχθεί η αποστολή σημάτων μορφής κειμένου με δίοδους led 2.7 προγραμματισμένες από ένα απλό raspberry pi, το αναβοσβήσιμο υψηλής συχνότητας των οποίων στο άκρο της μετάδοσης μεταδίδει δυαδικούς κώδικες και η φωτοευαίσθητη δίοδος στο άκρο λήψης ανιχνεύει το προαναφερθέν αναβοσβήσιμο [106]. Το γρήγορο τρεμόπαιγμα, ανεπαίσθητο από τον άνθρωπο, κωδικοποιεί δεδομένα, τα οποία οι δέκτες ερμηνεύουν για να ανακτήσουν τις μεταδιδόμενες πληροφορίες. Το VLC προσφέρει πλεονεκτήματα όπως υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, βελτιωμένη ασφάλεια (καθώς το ορατό φως δεν περνά μέσα από τους τοίχους) και δυνατότητα εφαρμογής σε περιβάλλοντα όπου οι ραδιοσυχνότητες ενδέχεται να προκαλέσουν παρεμβολές. Βρίσκεται σε χρήση σε εσωτερικούς χώρους, κυρίως σε περιορισμένα περιβάλλοντα ραδιοσυχνοτήτων όπως νοσοκομεία ή αεροσκάφη και υποβρύχια επικοινωνία όπου τα ραδιοκύματα δεν μπορούν να διεισδύσουν.

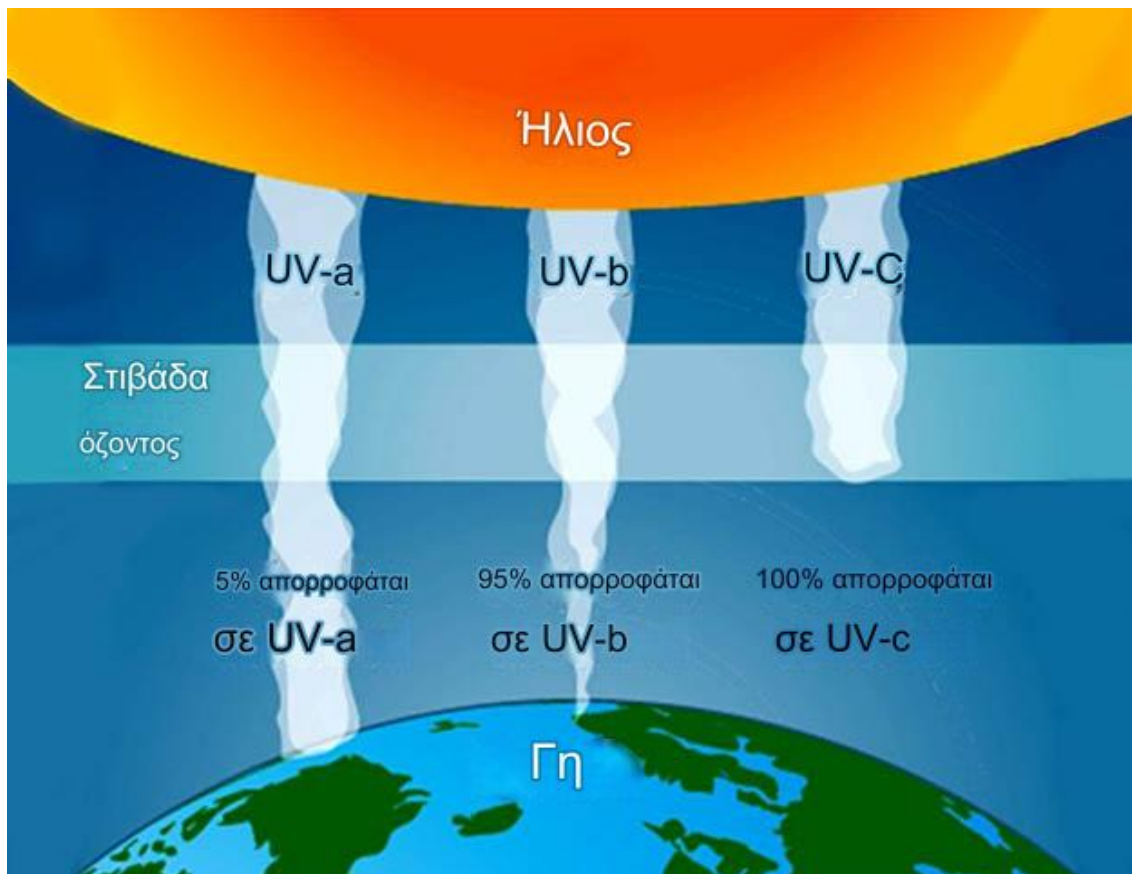
Σημαντικές μελέτες έχουν γίνει ακόμα σχετικά με την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων μέσω των κυμάτων του ορατού φωτός με χρήση φωτοδίοδων των φαναριών των οχημάτων. Σκοπός είναι η επικοινωνία μεταξύ έξυπνων αυτοκινήτων σε μικρή εμβέλεια όπου τα αυτοκίνητα θα στέλνουν και θα λαμβάνουν σημαντικές πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο όπως θέση, ταχύτητα καθώς και ειδοποιήσεις πιθανών προβλημάτων και ατυχημάτων που μπορεί να συμβούν. Ένα ξεκάθαρο μειονέκτημά του ορατού φωτός

για τεχνολογίες επικοινωνίας αποτελεί το γεγονός πως δεν μπορεί να διαπεράσει εμπόδια και απορροφάται από μαύρα και σκοτεινά αντικείμενα. Επιπρόσθετα, παρεμβολές από άλλες πηγές φώτος και κυρίως του ήλιου, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες εσφαλμένης λήψης σήματος. Τεχνικές περιορισμού του παραπάνω φαινομένου βρίσκονται υπό μελέτη [108].

Το ορατό φως αποτελείται από διάφορα χρώματα, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Τα χρώματα αντιπροσωπεύονται συχνά στο ακρωνύμιο “ROYGBIV” (κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, μπλε, μοβ, ιώδες). Τα χρώματά είναι σε αύξουσα σειρά με κλίμακα την συχνότητα, όπου το κόκκινο έχει την μικρότερη συχνότητα και κατά συνέπεια το μεγαλύτερο μήκος κύματος και το ιώδες έχει την μεγαλύτερη συχνότητα και το μικρότερο μήκος κύματος. Όπως η υπέρυθη ακτινοβολία πήρε το όνομα της καθώς βρίσκεται «πέρα από το φάσμα του κόκκινου», έτσι και η επόμενη ακτινοβολία στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ονομάστηκε υπεριώδης (Ultraviolet-UV) καθώς βρίσκεται μετά το τελευταίο ορατό χρώμα, το ιώδες.

Υπεριώδης ακτινοβολία: Η κύρια φυσική πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας είναι ο ήλιος και τα αστέρια. Μόλις 10% του συνολικού ακτινοβολούμενου φωτός του ηλίου είναι υπεριώδες. Η υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet Radiation-UVR) χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες με μεγάλη επιτυχία και με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό στη διαχείριση δερματικών παθήσεων, αποτελώντας βασικό μέρος της σύγχρονης δερματολογικής θεραπείας. Παρόλο που η έκθεση του ανθρώπινου σώματος στην υπεριώδη ακτινοβολία έχει ορισμένα οφέλη όπως η παράγωγή βιταμίνης D, είναι αποδεδειγμένα επικίνδυνα, καθώς με εκτεταμένη μη ελεγχόμενη μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του δέρματος, πρόωγη γήρανση, αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του δέρματος και πιθανώς να επηρεάσει την ανοσία σε μολυσματικές ασθένειες [109]. Συγκεκριμένα, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization-WHO) αναφέρει ότι, χωρίς αντηλιακή προστασία, η παρατεταμένη έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία είναι επιβλαβής μετά από 10 λεπτά για άτομα με ανοιχτόχρωμο δέρμα και μετά από 60 λεπτά για άτομα με πιο σκούρο δέρμα και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα που σχετίζονται με το δέρμα ή καταρράκτη με την πάροδο του χρόνου. Εκτιμάται ότι θα ήταν εφικτή η αποφυγή εμφάνισης και πρόληψη των περισσότερων περιπτώσεων καρκίνου του δέρματος και του καταρράκτη με την χρήση φορητών μέσων ανίχνευσης υπεριώδους ακτινοβολίας [110]. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.8, η υπεριώδης ακτινοβολία διακρίνεται σε τρεις κύριες υποκατηγορίες με βάση το μήκος κύματος:

- UV-A (με μήκος κύματος 320-400 nm): Αυτό είναι το μεγαλύτερο μήκος κύματος της ακτινοβολίας UV και αναφέρεται συχνά ως «μαύρο φως». Οι ακτίνες UV-A είναι λιγότερο ενεργητικές από τους άλλους τύπους ακτινοβολίας UV, αλλά μπορούν να διεισδύσουν στο δέρμα πιο βαθιά. Συχνά σχετίζονται με τη γήρανση του δέρματος και μπορούν να συμβάλουν στην ανάπτυξη καρκίνου του δέρματος. Ενώ τα καρκινογόνα αποτελέσματα της ακτινοβολίας UV-B είναι καλά τεκμηριωμένα πειραματικά, αυτά της ακτινοβολίας UV-A είναι λιγότερο σαφή. Αρκετές προκαταρκτικές έρευνες υποδεικνύουν ότι η ακτινοβολία UV-A είναι ογκογονική σε άτριχα ποντίκια, αν και σε δόσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές που απαιτούνται με την UVB. Δεδομένου ότι η ποσότητα της ακτινοβολίας UV-A που φτάνει στην επιφάνεια της γης υπερβαίνει κατά πολύ εκείνη της ακτινοβολίας UV-B, το ενδιαφέρον για τις βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας UV-A δεν είναι αδικαιολόγητο. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η υπεριώδης ακτινοβολία A είναι θανατηφόρα και μεταλλαξιογόνος στα κύτταρα των θηλαστικών. Το ότι η παρουσία οξυγόνου είναι απαραίτητη για τουλάχιστον ένα από αυτά τα αποτελέσματα υποδηλώνει ότι η UV-A μπορεί να δρα, εν μέρει, μέσω ενός έμμεσου



Σχήμα 2.8: Τα 3 είδη υπεριώδους ακτινοβολίας.

μηχανισμού φωτοευαισθητοποίησης [111].

- UV-B (με μήκος κύματος 280-320 nm): Οι ακτίνες UVB έχουν ελαφρώς μεγαλύτερη ενέργεια από τις ακτίνες UVA και είναι υπεύθυνες για την πρόκληση ηλιακού εγκαύματος. Αποτελούν επίσης κύρια αιτία καρκίνου του δέρματος. Οι ακτίνες UVB απορροφώνται εν μέρει από τη στιβάδα του όζοντος και είναι πιο έντονες σε μεγαλύτερα υψόμετρα και μεσημεριανές ώρες [112]. Παρόλα αυτά, η ακτινοβολία UV-B που λαμβάνεται μέσω σύνθεσης δέρματος είναι η επικρατέστερη πηγή βιταμίνης D, έλλειψη της οποίας μπορεί να προκαλέσει πόνο στα οστά, μυϊκή αδυναμία, αδύναμο ανοσοποιητικό σύστημα και πονοκεφάλους. Γενικά, η σύνθεση του δέρματος είναι η κύρια πηγή βιταμίνης D καθώς η πρόσληψη τροφής είναι συνήθως ανεπαρκής. Διάφορες μελέτες θεωρούν ότι η έκθεση σε UVB δύο φορές την εβδομάδα είναι επαρκής για τη διατήρηση των επιπέδων βιταμίνης D και ότι η βιταμίνη D μόλις παραχθεί μπορεί να αποθηκευτεί στο σωματικό λίπος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα, υποδηλώνοντας έτσι μια καθυστερημένη επίδραση της UVB [113].
- UV-C (με μήκος κύματος 100-280 nm): Οι ακτίνες UVC είναι ο πιο ενεργητικός και επικίνδυνος τύπος υπεριώδους ακτινοβολίας. Ευτυχώς, σχεδόν όλες οι ακτίνες UVC από τον ήλιο απορροφώνται από την ατμόσφαιρα της Γης και συγκεκριμένα από το στρώμα του όζοντος. Ωστόσο, η ακτινοβολία UVC μπορεί να παραχθεί τεχνητά για χρήσεις όπως η αποστείρωση λόγω της ικανότητάς της να σκοτώνει βακτήρια και ιούς. Η υπεριώδης ακτινοβολία ως τεχνική απολύμανσης υπήρξε αποδεδειγμένα σε πολλαπλές βιομηχανικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της απολύμανσης πόσιμου νερού και της επεξεργασίας λυμάτων. Η αποτελεσματικότητα αυτής της τεχνο-



Σχήμα 2.9: Φορητός αποστειρωτής κυμάτων UVC για κινητά τηλέφωνα [115].

λογίας σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα της υπεριώδους ακτινοβολίας που λαμβάνεται από τους οργανισμούς στόχους. Η υπεριώδης ακτινοβολία καταστρέφει κοινά βακτήρια διαταράσσοντας την ικανότητα αναπαραγωγής [114]. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα, εμφανίστηκαν στην αγορά φορητοί λαμπτήρες που εκπέμπουν ακτινοβολία UVC, όπως αυτός του σχήματος 2.9 [115].

Η ιδέα να χρησιμοποιηθεί το φάσμα UV-C για την παροχή ασύρματων επικοινωνιών είχε συλληφθεί πριν από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο στην Αμερική. Τα πρώτα συστήματα UV-C εμφανίστηκαν αμέσως μετά τον πόλεμο [116]. Μια πρωτοποριακή μελέτη της δυνατότητας της υπεριώδους επικοινωνίας διεξήχθη από τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής το 1964. Το 1976, ο D. M. Reilly μελέτησε την επίδραση της διαστολής ενός παλμού υπεριώδους ακτινοβολίας με απουσία οπτικού πεδίου, προτείνοντας ένα μοντέλο μονής σκέδασης [117]. Το 1985, ο M. Gellerett δημιούργησε ένα σχετικά σύγχρονο σύστημα υπεριώδους επικοινωνίας χρησιμοποιώντας μια λάμπα υδραργύρου ως πηγή φωτός και έναν φωτοπολλαπλασιαστή σε συνδυασμό με ένα φίλτρο ως δέκτη, και για πρώτη φορά δοκίμασε κατά πόσο ήταν εφικτή επικοινωνία μεγάλης απόστασης μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας [117]. Η ανάπτυξη τεχνολογιών επικοινωνίας μέσω του UV-C δυστυχώς όμως η δεν συνεχίστηκε προοδευτικά κατά τις επόμενες δύο δεκαετίες. Αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι τα διαθέσιμα συστήματα UV-C απαιτούσαν πομποδέκτες μεγάλου μεγέθους με υψηλή κατανάλωση ενέργειας και μη προσιτό κόστος και ως εκ τούτου δεν ήταν σε θέση να ανταγωνιστούν εναλλακτικές αναδυόμενες τεχνολογίες όπως οι επικοινωνίες ραδιοκυμάτων [116]. Σήμερα, εξετάζεται η εφαρμογή UV-C σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs).

Ακτίνες X: Οι ακτίνες X: ανακαλύφθηκαν το 1895 από τον Wilhelm Conrad Röntgen και έκτοτε χρη-



Σχήμα 2.10: Απεικόνισή θώρακα μέσω ακτίνων x-ray [118].

σιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς της φυσικής και της ιατρικής λόγω της ικανότητάς τους να διεισδύουν στην ύλη και να παράγουν λεπτομερείς εικόνες του ανθρώπινου σώματος, αντικειμένων και υλικών.

Η αναγνώριση της ραδιενέργειας από τον Becquerel (1896) και η επακόλουθη ανακάλυψη του ραδίου (Curie, 1898), οδήγησαν σε πολλές περαιτέρω περιπτώσεις σωματικής βλάβης από ακτινοβολία, αλλά η ιδέα πρόκλησης τέτοιας ζημιάς κατά βούληση σε επιλεγμένους ιστούς άνοιξε επίσης το δρόμο για ακτινοβολική θεραπεία. Οι πρώτες αποδεδειγμένες θεραπείες ασθενών με καρκίνο ήταν από τους Sjoögren και Stenbeck στη Σουηδία το 1899 [119]. Οι ακτίνες X χρησιμοποιήθηκαν από στρατιωτικά νοσοκομεία πεδίου ήδη από το 1897 (Churchill, 1898), αν και ο αριθμός των τραυματισμών με ακτίνες X κλιμακώθηκε κατά τη διάρκεια του Μεγάλου Πολέμου όταν χρησιμοποιήθηκε πρωτόγονος κινητός εξοπλισμός ακτίνων X στο πεδίο. Στα επόμενα 10 χρόνια, δημοσιεύθηκαν πολλές εργασίες σχετικά με τη βλάβη των ιστών που προκαλείται από την ακτινοβολία. Ωστόσο, κατά τις δύο πρώτες δεκαετίες από την ανακάλυψη των ακτίνων X και του ραδίου, η άγνοια σχετικά με τους κινδύνους προκάλεσε πολυάριθμους τραυματισμούς και ακόμα και θανάτους. Προφανώς, οι πρώτοι ακτινολόγοι μη έχοντάς τον κατάλληλο εξοπλισμό, χρησιμοποιούσαν συχνά τα χέρια τους για να εστιάσουν τη δέσμη των μηχανημάτων ακτίνων X και ο καρκίνος του δέρματος ως άμεσο αποτέλεσμα αυτής της έκθεσης εμφανίστηκε μέσα σε 6 χρόνια από την ανακάλυψη του Röntgen (Friebe, 1902) [119]. Δυστυχώς, σύντομα αποδείχθηκε ότι τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να είναι θανατηφόρα, και το γνωστό μνημείο για τους «μάρτυρες ακτίνων X και του ραδίου» στο Αμβούργο, που ανεγέρθηκε το 1936 από τη Γερμανική Εταιρεία Röntgen, κατονομάζει αρκετές εκατοντάδες ιατρούς πολλών εθνικοτήτων που πέθαναν από ραδιενέργεια [120].

Ένα τυπικό μηχάνημα ακτίνων X αποτελείται από έναν σωλήνα ακτίνων X που εκπέμπει ακτίνες X και έναν ανιχνευτή που συλλαμβάνει τις ακτίνες αφού περάσουν από το σώμα ή το αντικείμενο που εξετάζεται. Οι διαφορετικοί ιστοί απορροφούν τις ακτίνες X με διαφορετικό τρόπο, δημιουργώντας την αντίθεση που φαίνεται στις εικόνες ακτίνων X. Διαχωρίζονται σε μαλακές ακτίνες X (Soft Xrays) και σκληρές ακτίνες X (Hard Xrays) όπου η μαλακές έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος και μικρότερη συχνότητα από τις σκληρές.

Οι ακτίνες X μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν με βάση τις εφαρμογές τους:

1. Διαγνωστικές ακτίνες X: Χρησιμοποιούνται στην ιατρική απεικόνιση για την απεικόνιση του εσωτερικού του σώματος. Βοηθούν στον εντοπισμό καταγμάτων των οστών, στην ανίχνευση καταστάσεων όπως πνευμονία, όγκοι ή οδοντικά προβλήματα.
2. Θεραπευτικές ακτίνες X: Ακτίνες X υψηλότερης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην ακτινοθεραπεία για τη θεραπεία του καρκίνου στοχεύοντας και καταστρέφοντας καρκινικά κύτταρα.
3. Βιομηχανικές ακτίνες X: Χρησιμοποιούνται σε μη καταστροφικές δοκιμές για την επιθεώρηση υλικών για ελαττώματα, ρωγμές ή δομικές ανωμαλίες σε κατασκευασμένα προϊόντα, αγωγούς ή εξαρτήματα αεροσκαφών.

Οι ακτίνες X γρήγορα απέκτησαν ευρεία εφαρμογή στην ιατρική, όπως στη ραδιογραφία, τη μαστογραφία και την ακτινοθεραπεία. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως στον έλεγχο ποιότητας και τη μη καταστροφική δοκιμή υλικών. Οι ακτίνες X μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση αρχαιοτήτων, γραφείων, πινάκων και άλλων ιστορικών αντικειμένων χωρίς να τα καταστρέφουν. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται για την κρυσταλλογραφία, μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δομής των κρυστάλλων και των μοριακών ενώσεων. Ακόμα, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποιότητας των καλλυντικών προϊόντων, της ενδυμασίας και των υποδημάτων, καθώς και για την εντοπισμό τυχόν κρυμμένων ελαττωμάτων στην κατασκευή. Τέλος, οι ακτίνες X χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποιότητας και της ανίχνευσης ατελειών στις συσκευασία τροφίμων και ποτών [121].

Ακτίνες Γάμμα: Στην κορυφή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι οι ακτίνες γάμμα. Ο Paul Villard, ένας Γάλλος χημικός και φυσικός, ανακάλυψε την ακτινοβολία γάμμα το 1900 ενώ μελετούσε την ακτινοβολία που εκπέμπεται από το ράδιο. Το 1903, ο Ernest Rutherford ονόμασε αυτή την ακτινοβολία ακτίνες γάμμα με βάση την ισχυρή διείσδυσή τους στην ύλη. Το 1900 είχε ήδη ονομάσει δύο λιγότερο διεισδυτικούς τύπους ακτινοβολίας διάσπασης (που ανακάλυψε ο Henri Becquerel) ακτίνες άλφα και βήτα σε αύξουσα σειρά διεισδυτικής ισχύος. Οι ακτίνες γάμμα είναι μια μορφή φωτονίων υψηλής ενέργειας, παρόμοια με τις ακτίνες X αλλά ακόμη πιο ενεργητικές. Η ακτίνες γάμμα είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που απελευθερώνεται από την μετάβαση σε επίπεδο ενέργειας των ατομικών πυρήνων, γνωστή και ως ροή σωματιδίων γάμμα. Οι ακτίνες γάμμα είναι εξαιρετικά διεισδυτικές και μπορούν να περάσουν από τα περισσότερα υλικά, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπινου ιστού. Απαιτούν πυκνά υλικά όπως μόλυβδος ή χοντρό σκυρόδεμα για να τα μπλοκάρουν αποτελεσματικά. Οι ακτίνες γάμμα χρησιμοποιούνται σε πειράματα πυρηνικής φυσικής για την ανίχνευση ατομικών και πυρηνικών δομών. Συμβάλλουν επίσης στην κατανόηση των διεργασιών ραδιενεργού διάσπασης και της συμπεριφοράς της ύλης σε ατομικό επίπεδο.

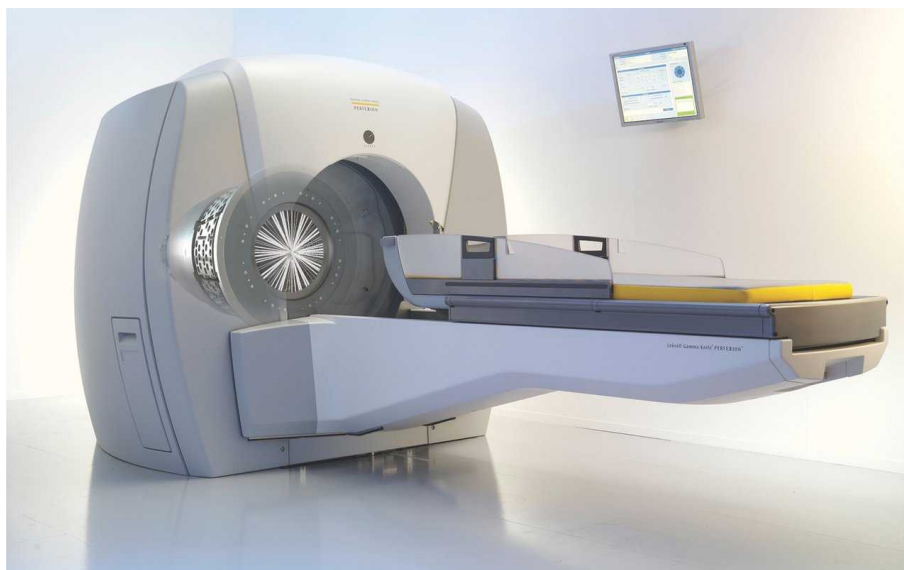


Σχήμα 2.11: Απεικόνιση έκρηξης ακτίνων τύπου γάμμα στο διάστημα [123].

Έχουν χρησιμοποιηθεί μέθοδοι έμμεσης ανίχνευσης για την παρακολούθηση των ακτίνων γάμμα καθώς είναι ακτίνες χωρίς φορτίο. Επειδή οι ακτίνες γάμμα που προέρχονται από το διάστημα απορροφώνται από την ατμόσφαιρα της Γης, η πρώτη ανίχνευση των ακτίνων γάμμα που προέρχονται από το διάστημα ήταν μέσω δορυφόρων. Πράγματι, ο δορυφόρος “Explorer” το 1961 επιβεβαίωσε την ύπαρξη ακτίνων γάμμα στο διάστημα. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία πηγών ακτίνων γάμμα από το διάστημα: η πιο σημαντική είναι η παροδική δραστηριότητα του Ήλιου, όπως οι ηλιακές εκλάμψεις και η στεφανιαία εκτόξευση μάζας. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει επίσης ένα «φόντο ακτίνων γάμμα» που οφείλεται σε άλλα αστέρια στον γαλαξία μας και από αστέρια άλλων γαλαξιών. Υπάρχουν επίσης πηγές ακτίνων γάμμα με συνεχή εκπομπή ή μακράς διάρκειας εκπομπή ακτίνων γάμμα από συμπαγείς πηγές. Το τηλεσκόπιο Fermi μεγάλης περιοχής (Large Area Telescope-LAT) παρήγαγε έναν κατάλογο 1873 αντικειμένων που λάμπουν σε φως ακτίνων γάμμα [122]. Οι εκρήξεις ακτίνων γάμμα (Gamma Ray Bursts), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.11, είναι οι πιο ενεργητικές εκρήξεις στο Σύμπαν: είναι φωτεινές λάμψεις ακτίνων γάμμα για σύντομο χρονικό διάστημα, στις περισσότερες περιπτώσεις λιγότερο από 100 δευτερόλεπτα. Συμβαίνουν συνήθως όταν ένας τεράστιος αστέρας εκρηγνύεται και ονομάζεται «υπερνόβα». Χαρακτηριστικό αυτών των εκρήξεων είναι δύο αντίθετες δέσμες ακτίνων γάμμα, απ τις οποίες μια θα πρέπει να έχει κατεύθυνση προς την γη για να γίνει ορατή.

Οι ακτίνες γάμμα που προέρχονται από το διάστημα έχουν συχνότητες μεγαλύτερες από περίπου 1018 THz. και καταλαμβάνουν την ίδια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με τις σκληρές ακτίνες X (hard xrays) ή πάνω από αυτές. Η μόνη διαφορά μεταξύ τους είναι η πηγή τους: οι ακτίνες X παράγονται από επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια, ενώ οι ακτίνες γάμμα παράγονται από διασπάσεις ατομικών πυρήνων ή/και πυρηνικές συγκρούσεις [122].

Η τεχνητή παραγωγή ιόντων ξεκίνησε το 1948, με τους Lattes και Gardner να χρησιμοποιούν το 184 ιντσών σύγχροκυκλοτρον στο Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Berkeley (Καλιφόρνια) το οποίο επιτάχυνε



Σχήμα 2.12: εξοπλισμός ραδιοθεραπείας [125].

τα πρωτόνια στα 350 MeV. Παράγονται κατά τη διάρκεια πυρηνικών αντιδράσεων και ραδιενεργής αποσύνθεσης. Η κύρια πηγή των φυσικών ακτίνων γάμμα είναι η κοσμική ακτινοβολία από το διάστημα. Εκπέμπονται επίσης από ραδιενεργά υλικά που βρίσκονται στο φλοιό της Γης [124]. Στις μέρες μας, η τεχνητή παραγωγή ιόντων (και κατά συνέπεια ακτίνων γάμμα) γίνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Οι ακτίνες γάμμα του διαστήματος, μέσω ανάλυσης, θα μπορούσαν να αποκαλύψουν την ιστορία του Σύμπαντος.

Οι ακτίνες γάμμα, όπως και οι ακτίνες X χρησιμοποιούνται στην ιατρική (ακτινοθεραπεία), στη βιομηχανία (αποστείρωση και απολύμανση) αλλά αξιοποιούνται επιπρόσθετα στην πυρηνική βιομηχανία. Στο σχήμα 2.12 απεικονίζεται ο εξοπλισμός της ακτινοχειρουργικής Εγκεφάλου “Gamma Knife”, μιας μεθόδου ραδιοθεραπείας.

2.3 Βιβλιογραφική έρευνα και προσεγγίσεις

Η πρώτη εικόνα που δημιουργήθηκε με χρήση ακτινοβολίας THz χρονολογείται στο 1960. Το 1995, η εικόνα THz που δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας φασματοσκοπία πεδίου χρόνου THz προκάλεσε μεγάλο ενδιαφέρον και πυροδότησε μια ταχεία ανάπτυξη στον τομέα της τεχνολογίας THz [126]. Ταυτόχρονα όμως, γεννήθηκαν ανησυχίες και προβληματισμοί σχετικά με τις επιπτώσεις που μπορεί να έχουν τα κύματα THz στον άνθρωπο.

Όπως και σε κάθε τεχνολογικό τομέα, έτσι και στον τομέα της τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας απαιτείται εκτενής μελέτη, πειράματα, δοκιμές και έλεγχοι προτού ένα προϊόν ή μια υπηρεσία προωθηθεί στην αγορά. Η παραπάνω ανάγκη γιγαντώνεται όταν εμπλέκεται και ο παράγοντας της υγείας. Τα κύματα THz έχουν αναλυθεί λεπτομερώς στο παρελθόν για την κατασκευή φωτογραφιών καθώς και για ιατρικούς σκοπούς. Παρόλα αυτά δεν έχει υπάρξει λόγος σχολαστικής έρευνας σχετικά με τα μακροπρόθεσμα (μη θερμικά) προβλήματα που μπορεί να επιφέρει η έκθεση μέχρι σήμερα. Σήμερα ωστόσο, με την αναμενόμενη ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών THz, το παραπάνω κρίνεται απαραίτητο.

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο οργανισμό υγείας, οι επιδράσεις της ακτινοβολίας ακτίνων THz χωρίζονται

στις βραχυπρόθεσμες και στις μακροπρόθεσμες. Βραχυπρόθεσμα παρατηρείται θέρμανση των ιστών που προκαλείται από τη θερμική επίδραση που προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ της ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων και του ανθρώπινου σώματος. Παρατεταμένη χρήση μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας (Non-Ionizing Radiation-NIR) εστιασμένη σε συγκεκριμένο μέρος του σώματος θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά την θερμοκρασία και να προκαλέσει ζημιά στην ομοιόσταση του ανθρώπινου οργανισμού. Η μακροπρόθεσμη έκθεση πιστεύεται ότι μπορεί να αυξήσει τις πιθανότητες σχηματισμού όγκου στο κεφάλι ή καρκινοποίησης κυττάρων του σώματος. Ωστόσο, μέχρι σήμερα, δεν έχει τεκμηριωθεί συσχέτιση μεταξύ οποιωνδήποτε πηγών NIR με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία [127]. Επίσης, δεν υπάρχουν μηχανισμοί που να έχουν εντοπιστεί, καθώς επίσης δεν υπάρχει υποστήριξη από τις πειραματικές μελέτες που να εξηγούν ότι η έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία θα μπορούσε να αυξήσει τον κίνδυνο όγκων του εγκεφάλου ή άλλων καρκίνων [127].

Το μεγαλύτερο ποσοστό καρκινικών όγκων από εκτενή έκθεση σε ακτίνες υπεριώδους ακτινοβολίας τύπου A (UV-A) και τύπου B (UV-B) παρατηρήθηκε στα αυτιά και το κεφάλι, οπότε χρήζει να υπάρξει ιδιαίτερη προσοχή σε αυτά τα σημεία του σώματος. Είναι άλλωστε τα πιο εκτεθειμένα σημεία ενός χρήστη όταν μιλάει στο τηλέφωνο [111]. Περιπτώσεις τυχαίας υπερέκθεσης έχουν αναφερθεί από ελαττωματικούς φούρνους μικροκυμάτων που λειτουργούν στα 2.450 MHz [128, 129]. Σε ελεγχόμενες εκθέσεις σε πολύ υψηλή ισχύ (P_D της τάξης των 10.000 W/m^2 στα 95 GHz με εκθέσεις μόνο λίγων δευτερολέπτων) σε τεχνολογία ελέγχου που βασίζεται σε mmWave, περισσότερες από 11.000 εκθέσεις οδήγησαν σε μόνο οκτώ εγκαύματα δεύτερου βαθμού. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, τα άτομα ανάρρωσαν πλήρως [130]. Ακόμη και σε αυτά τα υψηλά επίπεδα έκθεσης, αναμενόταν ότι η ανθρώπινη αντανακλαστική αντίδραση θα προστατεύει τα μάτια από βλάβη και ότι δεν θα παρατηρούνται μακροπρόθεσμες ή καρκινογόνες επιδράσεις [130], ειδικά σε μικρές χρονικά εκθέσεις. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει σημαντική ανησυχία για τις δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία λόγω της έκθεσης της ακτινοβολίας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο ανθρώπινο σώμα.

Έχουν γίνει εκτενείς μελέτες όπου αναλύθηκαν πιθανά προβλήματα που θα μπορούσε να προκαλέσει η τεχνολογία THz στο ανθρώπινο σώμα και στο δέρμα συγκεκριμένα [131, 132], στο DNA [133, 134], σε πρωτεΐνες [135], αλλά και στα κύτταρά γενικότερα [136], σε βιομακρομόρια [137] κ.α. Στο δέρμα ειδικότερα, σημαντικές ήταν οι έρευνες [131, 132] οι οποίες χρησιμοποιώντας το μοντέλο του debye (ένα θεωρητικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στη φυσική των στερεών για να περιγράψει τη θερμική χωρητικότητα των κρυστάλλων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας) σε προσομοίωση στο δέρμα [131] καθώς και πειραματικά στο κολλαγόνο [132] (την επικρατέστερη πρωτεΐνη του δέρματος) κατέληξαν στο συμπέρασμα πως με εξαίρεσή κάποιων συγκεκριμένων συνθηκών οπου δημιουργούνταν προβλήματά, η THz ακτινοβολία δεν έχει επιπτώσεις στο ανθρώπινο δέρμα. Παρατηρήθηκε ότι σε συχνότητες της τάξεως THz η διέγερση των κυττάρων αυξάνεται με την μείωση της ισχύος της ακτινοβολίας [136]. Γενικότερα, δεν έχει βρεθεί κάποιο μοτίβο ή κάποια απόδειξη πως οι ακτίνες THz είναι παραπάνω βλαβερές από τις ήδη χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες, όπως τα ραδιοκύματα και τα μικροκύματα. Η επίδραση της ακτινοβολίας THz σε βιολογικά κύτταρα, ιστούς και οργανισμούς ήταν σημαντική από τη δημιουργία των πηγών THz, ωστόσο αυτό παραμένει ανεπαρκώς διερευνημένο. Για παράδειγμα, τα όρια ασφαλείας της πυκνότητας ισχύος, τα οποία ορίζονται από τη Διεθνή Επιτροπή για την Προστασία από Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες, δεν έχουν θεσπιστεί για συχνότητες άνω των 300 GHz. Οι μελέτες που διεξήχθησαν, όπως ανασκοπήθηκαν σε πολλά άρθρα, αποκαλύπτουν ότι η ακτινοβολία THz μπορεί να έχει τόσο θερμικές (που σχετίζεται με τη θέρμανση του εκτεθειμένου αντικειμένου λόγω απορρόφησης) όσο και μη θερμι-

	DNA	Κεφάλι	Θερμικά	Κύτταρα	Δέρμα	Καρκινοποίηση
[131]					✓	✓
[132]					✓	✓
[133]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
[134]			✓	✓	✓	✓
[135]						
[136]				✓	✓	
[137]	✓		✓	✓	✓	
[138]					✓	
[139]		✓			✓	✓
[140]		✓				
[141]		✓				
[142]		✓	✓			
[143]				✓		✓
[144]						✓

Πίνακας 2.2: Τομείς ερευνών που έχουν γίνει σχετικά με τις επιπτώσεις της terahertz ακτινοβολίας.

κές επιδράσεις σε βιολογικά αντικείμενα. Όπως και άλλα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα THz εκπέμπουν δέσμες θερμότητας και η έκταση της θέρμανσης εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη ισχύ, ενώ η ισχυρή απορρόφηση από το νερό αντιπροσωπεύει έναν σημαντικό παράγοντα που σχετίζεται με τη θέρμανση. Οι δεσμοί υδρογόνων μπορούν περαιτέρω να οδηγήσουν σε τροποποιήσεις στη γονιδιακή έκφραση. Έτσι, η ακτινοβολία THz μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα βολικό και αποτελεσματικό εργαλείο για τη διαμόρφωση της κυτταρικής δραστηριότητας. Από τη μία πλευρά, η πλειονότητα των χρησιμοποιούμενων εντάσεων THz δεν είναι επιβλαβείς για τα κύτταρα και δεν προκαλούν καμία μείωση στην βιωσιμότητά τους. Μελέτες που έγιναν σε κύτταρα του δέρματος δεν έδειξαν σημάδια απόπτωσης και οξειδωτικού στρες. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν δεδομένα σχετικά με την επαγόμενη από την THz λιπογόννη διαφοροποίηση του καρκίνου του δέρματος μελανώματος και ενδείξεις ότι η THz μπορεί να επηρεάσει τη μεταγραφή της πρωτεΐνης [135]. Το μεγαλύτερο πρόβλημα με ισχυρισμούς όπως οι παραπάνω είναι η έλλειψη αποδεικτικών στοιχείων που να υποστηρίζουν την άμεση συσχέτιση μεταξύ διαφόρων ασθενειών και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Μια τυπική μελέτη για τη διερεύνηση της επίδρασης της ακτινοβολίας στην υγεία απαιτεί πολύ χρόνο και η παρουσία μιας ομάδας ελέγχου για σύγκριση των αποτελεσμάτων, η οποία στο σενάριο πολλών πιθανών κινδύνων παραπάνω δεν είναι πρακτική. Επιπλέον, ο Miller [138], μεταξύ άλλων, υποστηρίζει ότι είναι δύσκολο να γίνουν τέτοιου είδους μελέτες επειδή η τεχνολογία αλλάζει τόσο γρήγορα που μέχρι να αποκτηθεί κάποια ουσιαστική εικόνα, μια νέα τεχνολογία με τους δικούς της πιθανούς κινδύνους έχει κυκλοφορήσει και η παλιά τεχνολογία μπορεί να έχει εγκαταλειφθεί ή να έχει αλλάξει. Επιπλέον, αυτοί οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι η έλλειψη επιδημιολογικών στοιχείων δεν υποδηλώνει απαραίτητα την απουσία επίδρασης, αλλά θα μπορούσε να υποδηλώνει αδυναμία εύρεσης μιας σχέσης, δεδομένων των πειραματικών συνθηκών και της διάρκειας της μελέτης [139]. Οι μακροπρόθεσμες μελέτες που θα ήταν σχετικές με τις τεχνολογίες που εισάγονται από το 5G θα γίνουν διαθέσιμες μόνο σε πολλά χρόνια από τώρα και τυχόν αποτελέσματα που είναι διαθέσιμα επί του παρόντος μπορεί να εξαπατούν.

Όσον αφορά την ακτινοβολία έκθεσής και τα προβλήματα που μπορεί να προκληθούν στο κεφάλι, έχουν γίνει εκτενείς μελέτες όπως αυτή της Huda I. Hamd (2018) [140], όπου συγκρίθηκε η τιμή του SAR στο κεφάλι μεταξύ του 2G και του 4G κάνοντάς την χρήση ενός μοντέλου προσομοίωσης του CST, ενός πακέτου τρισδιάστατων λογισμικών ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής απόδοσης για το σχεδιασμό, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση ηλεκτρομαγνητικών στοιχείων και συστημάτων. Η παραπάνω προσομοίωση έδειξε πόσο μικρότερη τιμή SAR και κατά συνέπεια πόσο λιγότερο επιβλαβής είναι το 4G σε σύγκρισή με το 2G [140]. Παραπλήσια έρευνα διεξάχθηκε από τον George Mihai το 2016 όπου συγκρίθηκε η η ακτινοβολία του 3G σε σύγκρισή με το 2G στο κεφάλι, όπου το 2G ήταν και πάλι αυτό με την υψηλότερη τιμή [141]. Εργαστηριακές έρευνες διεξάχθηκαν αρχικά από τον Ahmet Turgut (και στην συνέχεια στο CST) σε συχνότητες 900 και 1800 MHz, όπου διερευνήθηκαν οι διαφορές τιμές του ρυθμού ειδικής απορρόφησης στο κεφάλι, ανάλογα με το φύλο και την ηλικία του ατόμου. Παρατηρήθηκε ότι το SAR στο κεφάλι γενικότερα ήταν υψηλότερο στους ενήλικες άντρες, μετά στις γυναίκες και τέλος στα παιδιά. Στο εσωτερικό του εγκεφάλου ωστόσο το SAR ήταν υψηλότερο στα παιδιά [142]. Ωστόσο, σε καμία περίπτωση τα επίπεδα SAR δεν ήταν ανησυχητικά

Στο πλαίσιο αποκλειστικά της σχέσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και καρκίνου, στην έρευνα του Wang [143], αναλύθηκαν οι θεραπευτικές ιδιότητες που μπορεί να έχει η ακτινοβολία THz στον τομέα του καρκίνου και τον όγκων με εφαρμογή της τεχνολογίας της υπερθερμίας. Επιπρόσθετα, ο Διεθνής Οργανισμός Έρευνας για τον Καρκίνο (International Agency for Research on Cancer-IARC) έδωσε στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ταξινόμηση 2B το 2011 [144]. 2B σε αυτήν την ταξινόμηση σημαίνει ότι ο εν λόγω παράγοντας είναι πιθανώς καρκινογόνος. Ο καφές εντάσσεται επίσης στην κατηγορία των πιθανώς καρκινογόνων παραγόντων, μαζί με πολλά στοιχεία που μπορούν να καταναλωθούν σε τρόφιμα ή ποτά. Η παρούσα ταξινόμηση, ως έχει, είναι πιθανώς μια καλή ένδειξη ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ασφαλής. Ταυτόχρονα, υπάρχει μια μικρή πιθανότητα να υπάρξουν μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της παρατεταμένης έκθεσης σε ακτίνες THz, όπως πιθανότητα ανάπτυξης καρκίνου. Ωστόσο, οι επιστημονικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα δεν μπόρεσαν να βρουν κάποια στενή συσχέτιση αυτής της φύσης ακόμη. Επομένως, απαιτούνται περισσότερες μακροπρόθεσμες ερευνητικές μελέτες. Φαίνεται απίθανο ότι η συνολική έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία επί του παρόντος και στο μέλλον θα είναι πιο επιβλαβής από το να περνάμε λίγα λεπτά στον ήλιο ή να καταναλώνουμε επεξεργασμένο κρέας, καφέ ή ένα ποτήρι κρασί (όλα είναι γνωστό ότι προκαλούν καρκίνο στον άνθρωπο) [145].

2.3.1 Ιοντίζουσες και μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες

Βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση της σταθερότητας του περιβάλλοντος του σώματος ενός ζώου, δηλαδή των κυττάρων και των ιστών του, είναι η διατήρηση της κατάστασης της ομοιόστασης. Το νευρικό σύστημα που λαμβάνει πληροφορίες από μέσα στο σώμα καθώς και από εξωτερικούς παράγοντες, αυξάνει ή μειώνει τη βιολογική δραστηριότητα των κυττάρων, των ιστών και των οργάνων δυναμικά. Η βασική μονάδα του νευρικού συστήματος είναι ένας νευρώνας που μπορεί να αναλύσει τα λαμβανόμενα νευρικά σήματα, να εκκινεί και να εκ-φορτίζει δυναμικά δράσεις όπου κωδικοποιούνται οι βασικές πληροφορίες. Ένα μεμονωμένο νευρικό κύτταρο είναι ένας κρίκος στη νευρωνική αλυσίδα που σχηματίζει το αντανακλαστικό τόξο, μέσω από το οποίο ξεκινώντας από τους υποδοχείς, οι πληροφορίες αποστέλλονται σε αισθητήρια και κινητικά κέντρα που αποτελούν μέρος του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος

(ΚΝΣ) και στη συνέχεια κεντρικά στον τελεστή, που μπορεί να είναι κύτταρα, ιστοί και όργανα. Ένα συμπαθητικό και παρασυμπαθητικό αυτόνομο νευρικό σύστημα επιβλέπει αυτήν την πορεία πληροφοριών. Στην κυτταρική μεμβράνη του νευρώνα εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό φαινόμενο που ονομάζεται νευρική ώθηση, το οποίο παίζει θεμελιώδη ρόλο στη μετάδοση πληροφοριών στο νευρικό σύστημα μιας φυσιολογικής ή παθολογικής λειτουργικής κατάστασης στα όργανα. Σε μεγάλο βαθμό μετά τη λήψη πληροφοριών για την υπέρβαση του φυσιολογικού ορίου, με αρνητική ανάδραση υπάρχει μια διαδικασία αναστολής ή διέγερσης αυτού του φαινομένου. Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να ονομαστεί προσαρμογή. Ωστόσο, οι δυνατότητες προσαρμογής για τη διατήρηση της ισορροπίας είναι περιορισμένες. Αφού σπάσουμε αυτό το φράγμα, μπορούμε να μιλήσουμε για την εμφάνιση παθολογικών καταστάσεων. Οι αιτίες τους μπορεί να είναι διαφορετικές - από μηχανικούς και χημικούς τραυματισμούς- για ανοσολογικές διεργασίες. Η εξάπλωση της ώθησης στον νευρικό ιστό είναι μια ενεργή διαδικασία που βασίζεται στη ροή του ιοντικού νευρώνα μέσω της κυτταρικής μεμβράνης και στα φυσικά και χημικά φαινόμενα που προκαλούνται από αυτήν. Κάθε κύτταρο στο σώμα έχει ένα λεγόμενο δυναμικό μεμβράνης - ηρεμία. Αυτή η δυνατότητα καθορίζει τη διαφορά στο ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού της κυτταρικής μεμβράνης και εξαρτάται από τη συγκέντρωση ιόντων και στις δύο πλευρές. Στο σώμα των θηλαστικών, τον πιο σημαντικό ρόλο παίζουν τα ιόντα νατρίου και καλίου, ασβεστίου και χλωρίου (δεν είναι τα μόνα μόρια που εμπλέκονται στη δημιουργία δυναμικού) [146]. Έχουν την ικανότητα να κινούνται ελεύθερα μέσα από τη μεμβράνη και σύμφωνα με τους νόμους της φυσικής επιδιώκουν να δημιουργήσουν μια οσμωτική ισορροπία. Έχει αποδειχθεί ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στη διαπερατότητα των κυτταρικών μεμβρανών των δομών του νευρικού συστήματος, καθώς και των κυττάρων και των ιστών των οργάνων. Η αλλαγή στη διαπερατότητα αυτών των μεμβρανών είναι σημαντική για τη ρύθμιση των λειτουργιών των οργάνων του σώματος. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να οδηγήσουν σε θετικές και αρνητικές αλλαγές. Σύμφωνα με πολλές μελέτες, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διαταράσσει τη λειτουργία της αντλίας Na^+/K^+ , η οποία αλλάζει τις συνθήκες μεταφοράς ιόντων και κατά συνέπεια μπορεί να οδηγήσει, μεταξύ άλλων, σε αλλαγές στη νευρική αγωγιμότητα και αλλαγές στη δραστηριότητα των κυτταρικών ενζύμων. Η επίδραση του πεδίου προκαλεί επίσης αυξημένη εκροή ιόντων Ca^+ από τα κύτταρα, ο ρόλος του οποίου στο σώμα είναι πολύ σημαντικός. Συμμετέχει στη ρύθμιση των διεργασιών στο εσωτερικό των κυττάρων και των ιστών σε επίπεδο μεταβολισμού καθώς και σε μοριακό επίπεδο [146].

Όπως το φως, έτσι και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να περιγραφεί με όρους κυμάτων που ταξιδεύουν, αλλά έχει επίσης μια σωματιδιακή φύση. τα σωματίδια ονομάζονται φωτόνια. Κάθε φωτόνιο έχει μια συγκεκριμένη ενέργεια, η οποία αυξάνεται με τη συχνότητα, σύμφωνα με τον τύπο:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

όπου:

- E είναι η ενέργεια των ηλεκτρονίων
- h είναι η σταθερά του Plank ίση με $6.626 \cdot 10^{-36} \text{J}\cdot\text{s}$
- $f=c/\lambda$ είναι η συχνότητα (Hz)
- λ είναι το μήκος κύματος του σήματος (m)

Περιοχή	Εύρος Μήκους Κύματος	Εύρος Συχνότητας	Εφαρμογές
Ραδιοκύματα	> 1 mm	< 30 MHz	Ραδιοφωνία, επικοινωνία, Wi-Fi
Μικροκύματα	1 mm - 1 m	300 MHz - 300 GHz	Φούρνοι μικροκυμάτων, ραντάρ, επικοινωνία δορυφόρων
Υπέρυθρες ακτίνες	700 nm - 1 mm	300 GHz - 430 THz	Απομακρυσμένη ανίχνευση, ανίχνευση θερμοτήτας
Ορατό φως	400 - 700 nm	430 - 750 THz	Ανθρώπινη όραση, οπτική επικοινωνία
Υπεριώδεις ακτίνες	10 - 400 nm	750 THz - 30 PHz	UV λάμπες, αποστείρωση, φθορισμός
Ακτίνες X	0,01 - 10 nm	30 PHz - 30 EHz	Ιατρική απεικόνιση, ανάλυση υλικών
Ακτίνες Γάμμα	< 0,01 nm	> 30 EHz	Πυρηνική ιατρική, ακτινοθεραπεία

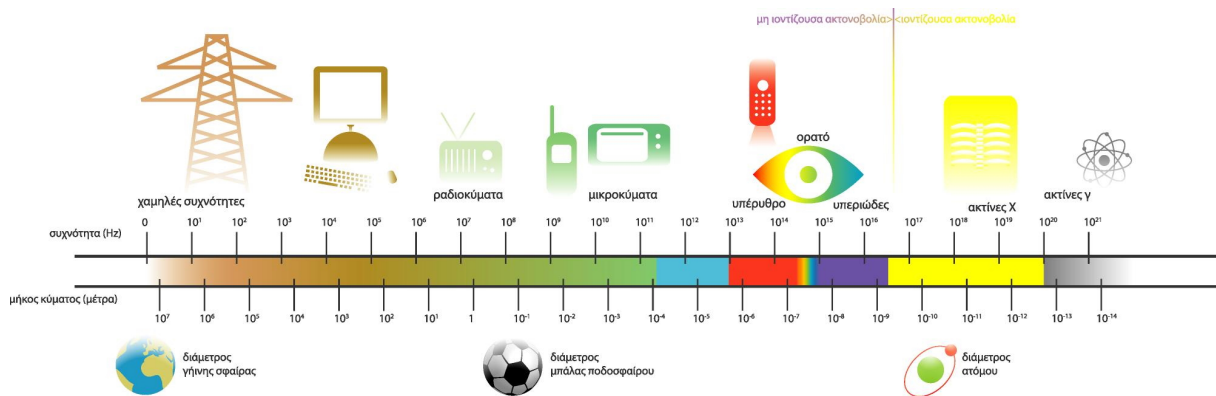
Πίνακας 2.3: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

- c είναι η ταχύτητα του φωτός ($3 \cdot 10^8$ m/s)

Οι επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε χημικές ενώσεις και βιολογικούς οργανισμούς εξαρτώνται τόσο από την ισχύ της ακτινοβολίας όσο και από τη συχνότητά της. Οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες ορατών ή χαμηλότερων συχνοτήτων (δηλαδή υπεριώδεις ακτίνες χαμηλής συχνότητας, ορατό φως, υπέρυθρες, μικροκύματα και ραδιοκύματα) ονομάζονται μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες, επειδή τα φωτόνια τους δεν έχουν αρκετή μεμονωμένη ενέργεια για να ιοντίσουν άτομα ή μόρια ή να σπάσουν χημικούς δεσμούς και συγκεκριμένα τους χημικούς δεσμούς του νερού. Η ενέργεια στην οποία σπάνε οι δεσμοί υδρογόνου είναι τα 12 eV. Εξ ορισμού όσα κύματα έχουν λιγότερη ενέργεια θεωρούνται μη ιοντίζων και όσα έχουν περισσότερη θεωρούνται ιοντίζων. Ομοίως οι ακτινοβολίες με μικρότερη συχνότητα των 30 PHz είναι μη ιοντίζουσες και αυτές με μεγαλύτερη συχνότητα είναι ιοντίζουσες. Οι επιδράσεις των μη ιοντίζουσων ακτινοβολιών στα χημικά συστήματα και στους ζωντανούς ιστούς προκαλούνται κυρίως από θερμικά φαινόμενα, μετά από εκτεταμένη έκθεση, από τη συνδυασμένη μεταφορά ενέργειας πολλών φωτονίων [147]. Αντίθετα, οι υπεριώδεις ακτινοβολίες υψηλής συχνότητας οι ακτίνες X και οι ακτίνες γάμμα ονομάζονται ιοντίζουσες ακτινοβολίες, καθώς μεμονωμένα φωτόνια τέτοιας υψηλής συχνότητας έχουν αρκετή ενέργεια για να ιοντίσουν μόρια ή να σπάσουν χημικούς δεσμούς. Αυτές οι ακτινοβολίες έχουν την ικανότητα να προκαλούν χημικές αντιδράσεις και να βλάπτουν τα ζωντανά κύτταρα πέρα από αυτό που προκύπτει από απλή θέρμανση είναι σίγουρα επικίνδυνες για την υγεία, αν όχι θανατηφόρες [147].

2.3.2 Όρια ακτινοβολίας

Τα όρια έκθεσης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως κατευθυντήριες γραμμές για τον έλεγχο της έκθεσης του ανθρώπου στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τα όρια έκθεσης είναι τα όρια στα οποία ένα άτομο προστατεύεται από άμεσους φυσικούς κινδύνους καθώς και από αρνητικές βιολογικές επιπτώ-



Σχήμα 2.13: Το φάσμα συχνοτήτων, μη ιοντίζουσες και ιοντίζουσες [148].

σεις. Οι επιπτώσεις της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία στον άνθρωπο δεν εξαρτώνται μόνο από τη συχνότητα των πεδίων αλλά και από τη διάρκεια της έκθεσης, την ένταση του πεδίου, την πόλωση των πεδίων και τα χαρακτηριστικά του ανθρώπινου σώματος. Τα στατικά πεδία και τα πεδία χαμηλής συχνότητας είναι γνωστό ότι προκαλούν δυσλειτουργίες σε ιατρικά ηλεκτρονικά εμφυτεύματα, όπως οι βηματοδότες, οι οποίοι μπορεί να δυσλειτουργούν σε εντάσεις πεδίου πολύ κάτω από τα ισχύοντα όρια επαγγελματικής έκθεσης. Στο χαμηλότερο εύρος συχνοτήτων από 300 Hz έως 1 MHz προκαλούνται ρεύματα στο σώμα που μπορεί να επηρεάσουν τα βιολογικά συστήματα. Μπορεί να επηρεάσουν τις κανονικές δυνατότητες επεξεργασίας πληροφοριών του κεντρικού νευρικού συστήματος. Η σχετική δοσομετρική ποσότητα σε αυτό το εύρος συχνοτήτων είναι η πυκνότητα ρεύματος εκφραζόμενη σε A/m². Στην περιοχή συχνοτήτων από 100 KHz έως 10 GHz η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας οδηγεί στη δημιουργία θερμότητας. Η κατάλληλη δοσομετρική ποσότητα σε αυτό το εύρος συχνοτήτων είναι ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης Ενέργειας (SAR) εκφραζόμενος σε μονάδες Watt /κιλό. Στην ανώτερη περιοχή συχνοτήτων 6 – 300 GHz η ενέργεια από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία διαχέεται ολοένα και περισσότερο στην επιφάνεια του σώματος, με αποτέλεσμα τη θέρμανση των επιφανειακών στρωμάτων, κυρίως του δέρματος. Ανάλογα με τη συχνότητα, τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των βασικών περιορισμών είναι η πυκνότητα ρεύματος (J), ο ρυθμός ειδικής απορρόφησης ενέργειας (Specific Absorption Rate-SAR), η ειδική απορρόφηση ενέργειας (Specific Absorption-SA) και η πυκνότητα ισχύος (Power Density-P_D).

Η πυκνότητα ισχύος είναι απαραίτητη στα ηλεκτρονικά για να προσδιοριστεί πόση θερμότητα παράγεται σε έναν δεδομένο χώρο, κάτι που είναι κρίσιμο για την ψύξη και τη θερμική διαχείριση. Στα ηλιακά πάνελ, η πυκνότητα ισχύος χρησιμοποιείται για να μετρηθεί πόση ενέργεια μπορεί να συλλεχθεί από το ηλιακό φως ανά μονάδα επιφάνειας. Επιπρόσθετα, βοηθά στην αξιολόγηση της χωρητικότητας αποθήκευσης ενέργειας των μπαταριών και του ρυθμού με τον οποίο μπορεί να παραδοθεί ενέργεια. Συνήθως μετράται σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m²) για διδιάστατες επιφάνειες ή σε Watt ανά κυβικό μέτρο (W/m³) για τρισδιάστατους όγκους. Εάν έχουμε μια λάμπα που εκπέμπει 100 Watt φωτεινής ενέργειας και θέλουμε να μάθουμε την πυκνότητα ισχύος σε ένα τραπέζι ακριβώς κάτω από τη λάμπα, θα υπολογίσουμε την πυκνότητα ισχύος διαιρώντας την ισχύ (100 Watt) με την περιοχή το τραπέζι ακριβώς κάτω από τη λάμπα (σε τετραγωνικά μέτρα). Αυτό θα μας δώσει την πυκνότητα ισχύος σε W/m², υποδεικνύοντας πόση φωτεινή ενέργεια κατανέμεται σε αυτή τη συγκεκριμένη επιφάνεια. Είναι φανερό λοιπόν, ότι αν έχουμε 2 σώματα με ίδια ισχύ αλλά διαφορετικό μέγεθος, το σώμα με τον μικρότερο όγκο θα έχει πάντα μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Η πυκνότητα ισχύος ισοδύναμου επιπέδου κύματος είναι

η μετρική ισχύς ανά εμβαδόν επιφάνειας και εκφράζεται σε W/m^2 . Στο πλαίσιο της ακτινοβολίας THz, αλλά και των τηλεπικοινωνιών γενικότερα, η πυκνότητα ισχύος αναφέρεται στην ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που κατανέμεται εντός του εύρους συχνοτήτων THz ανά μονάδα επιφάνειας ή όγκου. Στο μακρινό πεδίο της κεραίας (Far Field), μπορεί να εκφραστεί είτε με την τιμή της Μέσης τετραγωνικής ρίζας (Root Mean Square-RMS) του ηλεκτρικού πεδίου είτε με το μαγνητικό πεδίο που προσπίπτει στην επιφάνεια του ιστού:

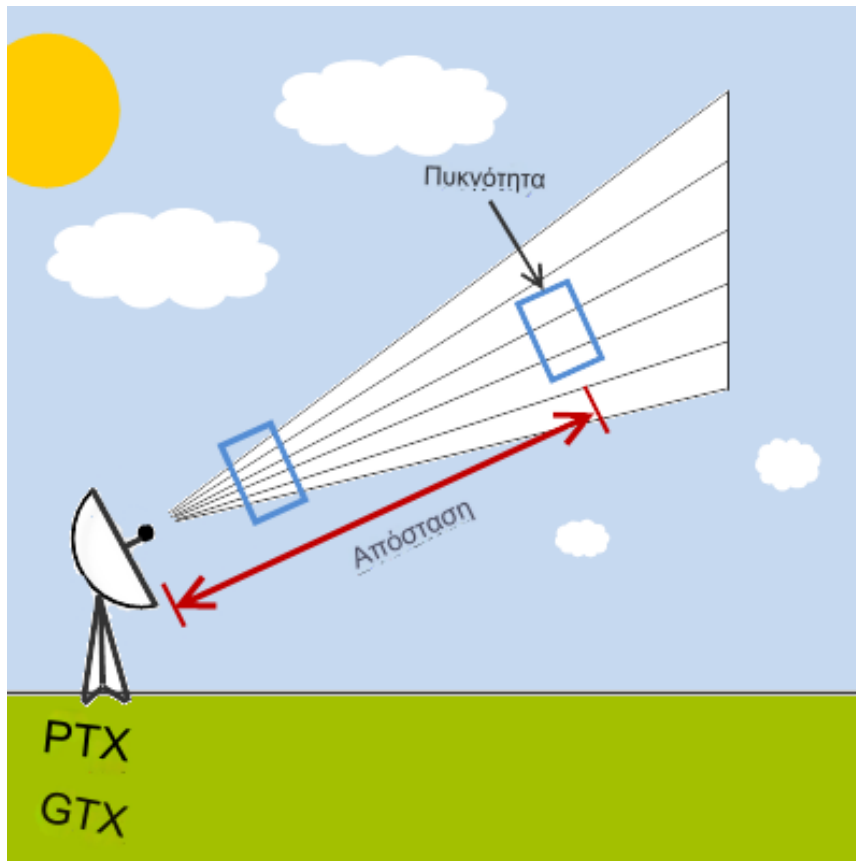
$$P_D = \frac{|E_i|^2}{\eta} = \eta \cdot |H_i|^2. \quad (2.2)$$

Σε αυτή την εξίσωση, η είναι η σύνθετη αντίσταση κύματος (377Ω στον ελεύθερο χώρο). E_i (V/m) και H_i (A/m) είναι οι τιμές RMS των εντάσεων ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που προσπίπτουν στην επιφάνεια του ιστού. Η μονάδα στο Μετρικό σύστημα (SI) του P_D είναι Watt ανά τετραγωνικό μέτρο. Στο κοντινό πεδίο μιας κεραίας εκπομπής, ο όρος “ισοδύναμο μακρινού πεδίου” ή “ισοδύναμο επιπέδου κύματος” P_D χρησιμοποιείται συχνά για να υποδείξει μια ποσότητα που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις τιμές κοντινού πεδίου του E_i (V/m) ή του H_i (A /m) «σαν να αποκτήθηκαν στο μακρινό πεδίο». Στο κοντινό πεδίο μιας κεραίας, ωστόσο, η αναλογία E προς H , και επομένως ακόμη και η σύνθετη αντίσταση του ελεύθερου χώρου “ η ”, είναι συναρτήσεις θέσης και διαφέρουν από ό,τι στο μακρινό πεδίο. Επειδή οι συσκευές χειρός mmWave και THz με κεραίες που χρησιμοποιούνται κοντά στο κεφάλι ή το πρόσωπο θα οδηγήσουν σε ακτινοβολία κοντινού πεδίου, όχι μακρινού πεδίου, απαιτείται προσοχή κατά την εφαρμογή των υφιστάμενων κανονιστικών κατευθυντήριων γραμμών για την αξιολόγηση της ασφάλειας. Εάν το κέρδος της κεραίας εκπομπής G_t και η ισχύς εκπομπής της P_t είναι γνωστά, τότε η πυκνότητα ισχύος στην απόσταση d από την κεραία μπορεί να υπολογιστεί από:

$$P_D = \frac{G_t P_t}{4\pi d^2}, \quad (2.3)$$

όπου G_t είναι το κέρδος της κεραίας εκπομπής σε γραμμική κλίμακα ή σε dbi, P_t (W) είναι η συνολική ισχύς που τροφοδοτείται στην κεραία και d (m) είναι η απόσταση από την πηγή ακτινοβολίας [145]. Σημειώνεται ότι η απόσταση μακρινού πεδίου (απόσταση Fraunhofer) για μια κατευθυντική κεραία mmWave καθορίζεται από τη μεγαλύτερη διάσταση (επιφάνεια) της κεραίας (d) και το μήκος κύματος (λ) όπου η υπόθεση μακρού πεδίου είναι ακριβής για αποστάσεις μεγαλύτερες από $d_{farfield} = 2D^2/\lambda$ [149]. Οι συντελεστές επιρροής της πυκνότητάς ισχύος παριστάνονται στο σχήμα 2.14. Σε αντίθεση με τις αξιολογήσεις του SAR ή της θερμοκρασίας, οι αξιολογήσεις που βασίζονται στην P_D δεν βασίζονται στη γνώση της κατανομής των πεδίων ή στην απορρόφηση ισχύος στους ιστούς, αλλά μόνο στην πυκνότητα της ισχύος που ταξιδεύει προς τον ιστό.

Για την προστασία των ανθρώπων από καθιερωμένες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, η ακτινοβολία THz θα πρέπει να συμμορφώνεται με τα πρότυπα ασφαλείας. Στον πίνακα 2.4 παρατίθενται έξι διαφορετικά κυβερνητικά όρια έκθεσης ραδιοσυχνοτήτων σε μακρινό πεδίο P_D για έκθεση ολόκληρου του σώματος (όπου η προσπίπτουσα ισχύς υπολογίζεται κατά μέσο όρο σε ολόκληρο το σώμα) για το ευρύ κοινό. Μπορεί να φανεί ότι τα όρια έκθεσης στη Ρωσία, την Κίνα Η Ελβετία και η Ιταλία είναι δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερες από αυτές στις Ηνωμένες Πολιτείες και στις περισσότερες χώρες της Δυ-



Σχήμα 2.14: Πυκνότητα Ισχύος μιας κεραίας [150].

τικής Ευρώπης. Αυτά τα όρια έκθεσης αναπτύσσονται είτε από επιστημονικούς συλλογισμούς είτε από προληπτικούς συλλογισμούς, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.4 και συζητείται στο [151].

Τα όρια που βασίζονται στην επιστήμη βασίστηκαν σε μελέτες που εντόπισαν δυνητικά επικίνδυνες επιπτώσεις, κυρίως μέσω δοκιμών με ζώα και ανθρώπους. Οι οδηγίες έκθεσης που χρησιμοποιούνται στις Ηνωμένες Πολιτείες οριοθετήθηκαν από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ (Federal Communications Commission-FCC), ενώ στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection-ICNIRP) ανέλαβε αυτόν τον στόχο. Στην Ρωσία και στην Κίνα έχουν αναπτυχθεί όρια με βάση επιστημονικούς συλλογισμούς. Οι κατευθυντήριες γραμμές έκθεσης που αναπτύχθηκαν από την FCC και το ICNIRP, σχεδιασμένες κυρίως για την προστασία από δυσμενείς θερμικές επιδράσεις, βασίστηκαν σε μεγάλο βαθμό σε μελέτες βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης έκθεσης σε ζώα σε υψηλά επίπεδα ισχύος. Ωστόσο, τα ρωσικά και κινεζικά όρια είναι πολύ κάτω από οποιαδήποτε θερμικά σημαντικά επίπεδα. Αυτά τα χαμηλά όρια υποδηλώνουν ότι η μακροχρόνια έκθεση σε επίπεδα κάτω από τα όρια FCC και ICNIRP μπορεί να έχει αρνητικές μη θερμικές επιπτώσεις στην υγεία. Μπορεί κανείς να υποθέσει ότι αυτοί οι πιο συντηρητικοί κανονισμοί προέρχονται από μη ειδικά προβλήματα υγείας (όπως πονοκεφάλους, κόπωση, ευερεθιστότητα, διαταραχές ύπνου και ζάλη) που αναφέρθηκαν στην ιατρική βιβλιογραφία από τη Ρωσία και την Κίνα με βάση μελέτες χαμηλού επιπέδου έκθεσης. Ωστόσο, πολλές από αυτές τις μελέτες δεν είχαν βασικές πληροφορίες, όπως η συχνότητα και η ένταση της έκθεσης, και τα διαγνωστικά κριτήρια είναι ασαφή. Επομένως, αυτές οι μελέτες δεν μπορούν να αξιολογηθούν προσεκτικά ή να βασιστούν σε αυτές από άλλους ερευνητές [154].

Χώρα	Περιορισμοί P_D για το ευρύ κοινό	Εύρος Συχνοτήτων GHz	οριοθετημένες από:
ICNIRP (1998)	10 W/m ²	2–300	επιστημονικά κριτήρια
FCC (1996)	10 W/m ²	1.5–100	επιστημονικά κριτήρια
Κίνα (1987)	0.1 W/m ²	0.3–300	επιστημονικά κριτήρια
Ρωσία (2003)	0.1 W/m ²	0.3–300	επιστημονικά κριτήρια
Ελβετία	0.1 W/m ²	0.0001–300	προληπτικά κριτήρια
Ιταλία (2003)	0.1 W/m ²	0.0001–300	προληπτικά κριτήρια
Ελλάδα (2017)	7 W/m ²	2-300	προληπτικά κριτήρια

Πίνακας 2.4: Όριο πυκνότητας ισχύος ανά χώρα [152, 153].

Τα προληπτικά όρια που υιοθετήθηκαν από την Ελβετία και την Ιταλία τέθηκαν στα χαμηλότερα επίπεδα που ήταν τεχνικά και οικονομικά εφικτά για την αντιμετώπιση της ανησυχίας του κοινού σχετικά με τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις των πομπών εκπομπής και των ασύρματων σταθμών βάσης στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Είχαν «ειδικό σκοπό να ελαχιστοποιήσουν τους ακόμη άγνωστους κινδύνους» των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων ραδιοσυχνότητας. Αν και τα προληπτικά όρια της Ελβετίας και της Ιταλίας είναι μεγαλύτερα από τα επίπεδα έκθεσης σε ραδιοσυχνότητες που προκύπτουν από τυπικές κεραίες ασύρματων σταθμών βάσης που είναι τοποθετημένες σε συμβατικά ύψη σε πύργους, αυτές οι οδηγίες καθιστούν δύσκολο τον εντοπισμό κεραίων σταθμών βάσης σε πολυκατοικίες και άλλες χαμηλές κατασκευές κοντά σε ανθρώπους. Είναι ενδιαφέρον ότι τα ελβετικά όρια δεν ισχύουν για ασύρματα ακουστικά, τα οποία εκθέτουν τον χρήστη σε πολύ υψηλότερο επίπεδο ενέργειας ραδιοσυχνότητας από τους ασύρματους σταθμούς βάσης και παρέχουν επίσης εξαιρέσεις για ιατρικές ή βιομηχανικές εκθέσεις. Στην Ελλάδα έχει τεθεί όριο SAR 70% του ήδη αυστηρού ορίου της Ευρώπης, ενώ μάλιστα έχει εφαρμοστεί 60% όριο της Ευρώπης σε εμβέλεια 100 μέτρα από περιοχές με πιθανώς ευάλωτα άτομα όπως νοσοκομεία και σχολεία [153].

Η εναρμόνιση των ορίων έκθεσης σε ραδιοσυχνότητες σε όλο τον κόσμο ήταν από καιρό επιθυμητή μεταξύ των επιτροπών καθορισμού προτύπων. Η σημασία της εναρμόνισης εγγυάται στο ότι μπορεί να παρέχει ένα συνεπές σύνολο επικυρωμένων και εγκεκριμένων ορίων έκθεσης για την προστασία όλων των ανθρώπων παγκοσμίως. Επίσης, η εναρμόνιση διευκολύνει τη βιομηχανία ασύρματης επικοινωνίας να εξυπηρετήσει μια παγκόσμια αγορά. Ακόμα, μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της πολιτικής διαμάχης ή του φόβου του κοινού που μερικές φορές εφαρμόζεται παράλογα στην ακτινοβολία ραδιοσυχνότητας. Η εναρμόνιση είναι ένας σημαντικός στόχος του έργου EMF του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας. Επί του παρόντος, 54 συμμετέχουσες χώρες και οκτώ διεθνείς οργανισμοί συμμετέχουν στο διεθνές έργο EMF, παρέχοντας μια μοναδική ευκαιρία να ενωθούν οι χώρες για να εναρμονίσουν τα πρότυπα EMF, τα οποία μπορούν να παρέχουν το ίδιο επίπεδο προστασίας της υγείας σε όλους τους ανθρώπους. Ωστόσο, δεδομένων των μεγάλων υφιστάμενων διαφορών μεταξύ των διαφορετικών προτύπων σε όλο τον κόσμο, η εναρμόνιση δεν θα είναι εύκολο να επιτευχθεί. Περαιτέρω αξιόπιστη και επαναλαμβανόμενη έρευνα σχετικά με τις επιπτώσεις στην υγεία και θεσπισμός κατάλληλων κατωφλιών έκθεσης μπορεί να χρειαστούν για να επιτευχθεί συμφωνία μεταξύ ερευνητών σε διάφορες χώρες και για να αντιμετωπιστούν ομοιόμορφα οι ανησυχίες του κοινού σχετικά με την ασφάλεια της ραδιοσυχνотικής ακτινοβολίας στο πλαίσιο των κατευθυντήριων γραμμών έκθεσης.

Ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (Specific Absorption Rate-SAR) μετρά την ισχύ ραδιοσυχνοτήτων που απορροφάται σε ζωντανό σωματικό ιστό και έχει μονάδα μέτρησης W/kg [3]. Έτσι αντιπροσωπεύει ένα επίπεδο ισχύος ανά μάζα σώματος. Το SAR μπορεί να εκφραστεί ως:

$$SAR = \frac{P_{diss}}{m} = \frac{\sigma E_{(rms)}^2}{\rho} \quad (2.4)$$

όπου P_{diss} (W) είναι η ισχύς ακτινοβολίας που διαχέεται στον ιστό, m είναι η μάζα ιστού (kg) υπό έκθεση, σ είναι η αγωγιμότητα [σε Siemens/μέτρο (S/m)] του ιστού, ρ είναι η πυκνότητα μάζας ιστού (kg/m^3), και το E είναι η μέση τετραγωνική τιμή (rms) της ρίζας της έντασης ηλεκτρικού πεδίου (V/m) που διαχέεται στον ιστό. Το διεθνές σύστημα μονάδων (SI) του SAR είναι Watt ανά κιλό, υποδεικνύοντας έτσι ότι το SAR αντιπροσωπεύει ένα επίπεδο ισχύος ανά μάζα σώματος [145].

Η ισχύς ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί από:

$$P_{diss} = P_D \cdot t \cdot a \quad (2.5)$$

οπού:

- t είναι ο χρόνος εκπομπής (second)
- a είναι η εκτεθειμένη περιοχή του σώματος (m^2)

Η τιμή rms της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να υπολογιστεί από:

$$E(rms) = \frac{(\sqrt{30 \cdot P_t \cdot G_t})}{r} \quad (2.6)$$

όπου:

- P_t είναι η ακτινοβολούμενη ισχύς (W).
- G_t είναι το κέρδος της κεραίας (dbi).
- r είναι η απόσταση (m).

Η αγωγιμότητα των ιστών ποικίλλει κατά 10 φορές κατά μήκος του σώματος, καθώς είναι μεγαλύτερη σε σημεία υψηλής περιεκτικότητας σε νερό όπως το αίμα και τα ούρα και η χαμηλότερη σε ιστούς όπως τα οστά, το λίπος και οι πνεύμονες, όπως αναπαριστάται και στο σχήμα 2.15. Τα ξένα μεταλλικά αντικείμενα στο σώμα είναι συχνά εξαιρετικά αγωγά και μπορεί να εμφανιστούν σημαντικά (ακόμη και επικίνδυνα) επίπεδα θέρμανσης γύρω από αυτά. Ακολουθούν ορισμένες κατά προσέγγιση τιμές αγωγιμότητας για διάφορες βιολογικές ουσίες σε θερμοκρασία δωματίου (περίπου 25°C) μετρημένες σε Siemens ανά μέτρο (S/m):

- Αίμα: Περίπου. 0,7 - 0,9 S/m

- Μυϊκός ιστός: Περίπου. 0,1 - 0,3 S/m
- Εγκεφαλικός ιστός: Περίπου. 0,1 - 0,2 S/m
- Οστά: Περίπου. 0,01 - 0,02 S/m
- Δέρμα: Περίπου. 0,01 - 0,02 S/m [155]

Η αγωγιμότητα του ανθρώπινου δέρματος ποικίλλει σημαντικά λόγω πολλών παραγόντων, όπως η υγρασία του δέρματος, οι ατομικές διαφορές, η θέση στο σώμα και η συχνότητα του ηλεκτρικού σήματος που εφαρμόζεται. Η αγωγιμότητα των βιολογικών ουσιών, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπινων ιστών, μπορεί να παρουσιάσει συμπεριφορά εξαρτώμενη από τη συχνότητα λόγω της πολύπλοκης σύνθεσης και της απόκρισης τους στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Η κατανόηση αυτής της συμπεριφοράς είναι απαραίτητη για διάφορες εφαρμογές στην ιατρική, τη βιομηχανική και τις αξιολογήσεις ηλεκτρομαγνητικής ασφάλειας. Η σχέση μεταξύ της αγωγιμότητας των βιολογικών ουσιών και της συχνότητας μπορεί να είναι πολύπλοκη και συχνά αναπαρίσταται χρησιμοποιώντας εμπειρικά μοντέλα ή μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν την εξάρτηση από τη συχνότητα. Ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το μοντέλο Cole-Cole, το οποίο είναι μια εμπειρική εξίσωση που περιγράφει την εξαρτώμενη από τη συχνότητα συμπεριφορά των υλικών, συμπεριλαμβανομένων των βιολογικών ιστών [156]. Το μοντέλο Cole-Cole εκφράζει τη σύνθετη αγωγιμότητα σ ως εξίσωση της συχνότητας (f):

$$\sigma(f) = \sigma_{\infty} + \frac{\sigma_0 - \sigma_{\infty}}{1 + (i \cdot F \cdot \tau)^{1-a}} \quad (2.7)$$

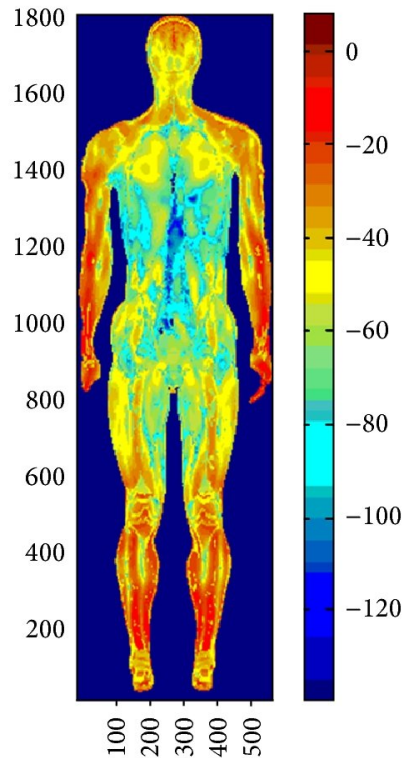
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το μοντέλο Cole-Cole είναι μια προσέγγιση και μπορεί να μην αποτυπώνει πλήρως τη σύνθετη συμπεριφορά όλων των βιολογικών ιστών σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Συγκεκριμένα δεν μπορεί να αποδοθεί ακριβής μέτρησή για συχνότητες άνω των 10 GHz. Ένα ακόμη μοντέλο μπορεί να βρει την επιτρεπτικότητα (permittivity) καθώς και την αγωγιμότητά διηλεκτρικών επιφανειών (σε συχνότητες μέχρι και 1 GHz) και τα συνέπειά και του ανθρώπινου δέρματος, είναι το μοντέλο διασποράς Gabriel του οποίου η γενική μορφή αναπαρίσταται στο (2.8) (για την επιτρεπτικότητα) και (2.9) (για την αγωγιμότητά).

$$\epsilon(F) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + (j \cdot f \cdot t)^n} \quad (2.8)$$

$$\sigma(F) = \sigma_{\infty} + \frac{\sigma_s - \sigma_{\infty}}{1 + (j \cdot f \cdot t)^n} \quad (2.9)$$

όπου:

- ϵ είναι η σύνθετη διαπερατότητα (F/m)
- σ είναι η σύνθετη αγωγιμότητα (S/m)
- ϵ_{∞} , σ_{∞} είναι οι οριακές τιμές επιτρεπτικότητας (F/m) και αγωγιμότητας υψηλής συχνότητας (S/m), αντίστοιχα.



Σχήμα 2.15: Αναπαράσταση του SAR στο ανθρώπινο σώμα [157].

- ϵ_0 , σ_0 είναι οι τιμές στατικής (χαμηλής συχνότητας) επιτρεπτικότητας (F/m) και αγωγιμότητας (S/m), αντίστοιχα .
- τ είναι η σταθερά χρόνου χαλάρωσης (s)
- n είναι ο εκθέτης που σχετίζεται με την κατανομή των χρόνων χαλάρωσης (καθαρός αριθμός)
- j είναι η φανταστική μονάδα (ρίζα του -1)
- F είναι η συχνότητα (Hz)

Η πυκνότητα μάζας των ανθρώπινων ιστών μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του ιστού. Ακολουθούν οι κατά προσέγγιση τιμές πυκνότητας μάζας για διάφορους ανθρώπινους ιστούς μετρημένες σε κιλά ανά κυβικό μέτρο (kg/m^3):

- Αίμα: Περίπου 1060 kg/m^3
- Μυϊκός ιστός: Περίπου 1060 kg/m^3
- Εγκεφαλικός ιστός: Περίπου 1030 kg/m^3
- Οστό (μέσος όρος): Περίπου 1700 kg/m^3
- Λιπώδης (λιπώδης) ιστός: Περίπου 920 kg/m^3
- Δέρμα: Περίπου 1200 kg/m^3

- Τριχωτό της κεφαλής: Περίπου 1300 kg/m^3
- Μάτια (ποικίλλει): Φακός: Περίπου $1,07 \text{ kg/L}$ ή 1070 kg/m^3 , Υδατικό υγρό (υγρό στο μπροστινό μέρος του ματιού): Περίπου 1.005 kg/L ή 1005 kg/m^3 , Κερατοειδής: Περίπου $1,038 \text{ kg/L}$ ή 1038 kg/m^3
- Όργανα (ποικίλλει): Συκώτι: 1030 kg/m^3 , Νεφρά: 1040 kg/m^3 , Καρδιά: 1040 kg/m^3 , Πνεύμονες: Περίπου $0,25$ έως $0,3 \text{ kg/L}$ ή 250 έως 300 kg/m^3
- Δόντια: Μεταβλητή πυκνότητα ανάλογα με τη σύνθεση (σμάλτο, οδοντίνη κ.λ.π.), αλλά γενικά περίπου $2,3 \text{ kg/L}$ ή 2300 kg/m^3 για το σμάλτο των δοντιών [158].

Γενικά, η πυκνότητα μάζας του ανθρώπινου ιστού παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από τη συχνότητα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ωστόσο, άλλες ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των ιστών, όπως η επιτρεπτικότητα και η διαπερατότητα, ενδέχεται να παρουσιάζουν συμπεριφορές εξαρτώμενες από τη συχνότητα, επηρεάζοντας τον τρόπο με τον οποίο αυτοί οι ιστοί αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Επιτρεπτικότητα: Αναφέρεται στην ικανότητα ενός υλικού να επιτρέπει τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στους βιολογικούς ιστούς, η σχετική διαπερατότητα (δηλεκτρική σταθερά) μπορεί να ποικίλλει ελαφρώς ανάλογα με τη συχνότητα. Αυτή η ιδιότητα επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αλληλεπιδρούν με τους ιστούς.

Διαπερατότητα: Αυτή η ιδιότητα δείχνει πόσο εύκολα τα μαγνητικά πεδία περνούν μέσα από ένα υλικό. Στους περισσότερους βιολογικούς ιστούς, η διαπερατότητα παραμένει σταθερή και σχετικά ανεπηρέαστη από τη συχνότητα εντός τυπικών ορίων, ωστόσο σε ορισμένα όργανα παρατηρείται μια μικρή μεταβολή.

Το SAR αυξάνεται σημαντικά με το μέγεθος του σώματος συγκεκριμένα με το τετράγωνο της διατομής του σώματος (A^2). Το SAR τείνει να συγκεντρώνεται περισσότερο γύρω από την περιφέρεια (όπου η ακτίνα είναι μεγαλύτερη). Σε μια ομοιογενή σφαίρα, το 87% της διασποράς ισχύος ραδιοσυχνοτήτων συμβαίνει στο εξωτερικό τρίτο της. Ευτυχώς η θερμότητα που εναποτίθεται στην περίμετρο του σώματος μπορεί να διαλυθεί πιο εύκολα.

Η τιμή SAR 4 W/kg , υπολογισμένη κατά μέσω όρο σε ολόκληρο το σώμα, αναγνωρίστηκε ως το βασικό όριο για την αποφυγή των επιβλαβών βιολογικών επιδράσεων στον άνθρωπο. Δύο κρίσιμα πειράματα, που ονομάζονται πειράματα διαταραχής συμπεριφοράς, από την Elena Goicoechea [159, 160] στη δεκαετία του 1980 συνέβαλαν σε αυτό το θεμελιώδες όριο SAR ολόκληρου του σώματος που βρίσκεται στα σημερινά πρότυπα ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων. Σε αυτά τα δύο πειράματα, η Elena Goicoechea εκπαίδευσε αρουραίους [159] και πιθήκους [160] σε μια εργασία ακουστικής παρατήρησης-απόκρισης και εξέθεσε αυτά τα ζώα σε ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων κατά τη διάρκεια της κανονικής ζωής τους. Το συμπέρασμα από αυτά τα πειράματα ήταν ότι συνέβαινε διαταραχή της συμπεριφοράς όταν ένα ζώο εκθέτονταν σε SAR περίπου 4 W/kg και η διαταραχή σημειωνόταν μετά από 30-60 λεπτά έκθεσης και όταν η θερμοκρασία του σώματος αυξάνονταν κατά τουλάχιστον $1 \text{ }^\circ\text{C}$ [160]. Με μια προσεκτική και εκτενή ανασκόπηση της βιολογικής, μηχανικής και επιστημονικής βιβλιογραφίας, το επίπεδο SAR ολόκληρου του σώματος των 4 W/kg αναγνωρίζεται ως το ανώτατο όριο λειτουργίας από το οποίο η

ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων αρχίζει να προκαλεί ανεπιθύμητες βιολογικές επιδράσεις στον άνθρωπο. Ορισμένα περιθώρια ασφαλείας έχουν εφαρμοστεί στο βασικό SAR των 4 W/kg κατά τη θέσπιση των σημερινών κατευθυντήριων γραμμών για την ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων για τον άνθρωπο.

Τα όρια ρυθμού ειδικής απορρόφησης (SAR Regulations) μπορεί να διαφέρουν από χώρα ή περιοχή σε άλλη και μπορεί επίσης να εξαρτώνται από το εύρος συχνοτήτων των εκπομπών ραδιοσυχνοτήτων (RF). Τα όρια SAR συνήθως μετρώνται σε Watt ανά κιλό (W/kg). Ακολουθούν ορισμένα παραδείγματα ορίων SAR σε διαφορετικές περιοχές: Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) θέτει τα όρια SAR για κινητά τηλέφωνα και άλλες ασύρματες συσκευές στην Αμερική. Το όριο SAR για το κεφάλι είναι 1,6 W/kg, κατά μέσο όρο για 1 γραμμάριο ιστού σε μορφή κύβου, ενώ για το σώμα και τα άκρα είναι 4 W/kg για 10 γραμμάρια ιστού. Χώρες όπως ο Καναδάς και η Ινδία ακολουθούν τα όρια της Αμερικής. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.5, οι περιορισμοί ακτινοβολίας της FCC μεταξύ 100 kHz και 6 GHz χρησιμοποιούν συντελεστή ασφαλείας 10 για να λάβουν μια μέση τιμή για ολόκληρο το σώμα (η προσπίπτουσα ισχύς υπολογίζεται κατά μέσο όρο σε ολόκληρο το σώμα) επίπεδο SAR 0,4 W/kg για επαγγελματική έκθεση. Ένας πρόσθετος συντελεστής ασφάλειας πέντε εισάγεται περαιτέρω για την έκθεση στο ευρύ κοινό, δίνοντας ένα μέσο όριο SAR για ολόκληρο το σώμα 0,08 W/kg. Για μια δεδομένη έκθεση, η κατανομή του SAR διαφέρει από σημείο σε σημείο στο ανθρώπινο σώμα. Είναι γενικά αποδεκτό ότι ο μέγιστος SAR σε ένα συγκεκριμένο σημείο του σώματος μπορεί να είναι τόσο υψηλός όσο 20 φορές ο μέσος όρος SAR για ολόκληρο το σώμα [161]. Έτσι, ένα επίπεδο SAR 1.6 W/kg ($20 \times 0,08$) σε 1 g ιστού (1-g SAR) στην κεφαλή και τον κορμό, και 4 W/kg σε 10 g ιστού στα άκρα (10-g SAR) υιοθετούνται ως οι τοπικοί περιορισμοί SAR για το ευρύ κοινό [152].

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τα όρια SAR για κινητά τηλέφωνα τα έχει θεσπίσει η ICNIRP και είναι γενικά πιο αυστηρά. Οι οδηγίες του ICNIRP είναι παρόμοιες με εκείνες της FCC, με μερικές εξαιρέσεις. Ο μέγιστος εντοπισμένος περιορισμός SAR των κατευθυντήριων γραμμών ICNIRP επιλέγεται να είναι 2 W/kg σε οποιαδήποτε 10 g ιστού στην κεφαλή και τον κορμό και 4 W/kg σε οποιαδήποτε 10 g ιστού στα άκρα για 6 λεπτά έκθεσης για συχνότητες έως 10 GHz για το ευρύ κοινό. Ωστόσο πολλές Ευρωπαϊκές χώρες έχουν αναδιαμορφώσει το όριο ειδικού ρυθμού απορρόφησης, είτε αυξάνοντάς, είτε μειώνοντας το όριο.

Θα πρέπει να είναι προφανές ότι το 1-g SAR παρέχει πιο λεπτοτερή ανάλυση και επομένως προσφέρει έναν πιο συντηρητικό περιορισμό στην πραγματική ενέργεια που διανέμεται στον ιστό. Δεδομένου ότι ένα κινητό τηλέφωνο εκπέμπει ακτινοβολία δίπλα στο σώμα ενός χρήστη, όπως συνήθως το κεφάλι, η ακτινοβολία είναι ανομοιόμορφη και ποικίλλει από τη μια θέση στην άλλη, και αυτή η μεταβλητότητα ακτινοβολίας θα αυξηθεί περαιτέρω με τις ολοένα και πιο κατευθυνόμενες κεραιές. Μια μέση μάζα τόσο μεγάλη όσο 10 g θα έτεινε να εξομαλύνει τις κατανομές SAR και πιθανώς θα μείωνε την αριθμητική τιμή του SAR σημαντικά σε σύγκριση με ένα SAR 1 g. Επιπλέον, το σφαιρικό σχήμα του ανθρώπινου ματιού έχει συνολική μάζα περίπου 10 g, και έτσι, η χρήση μέσης μάζας 10 g θα αγνοήσει εντελώς τη διακύμανση 1 κατανομής του SAR σε όλο το βολβό του ματιού. Το 1-g SAR είναι ένα πιο ουσιαστικό μέτρο της τοπικής απορρόφησης ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων και ένα πιο βιολογικά σημαντικό μέτρο της κατανομής του SAR εντός της κεφαλής ή του κορμού σε υψηλές συχνότητες [161].

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτά τα όρια SAR μπορούν να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου καθώς οι ρυθμιστικοί φορείς ενημερώνουν τις κατευθυντήριες γραμμές τους ώστε να αντικατοπτρίζουν

Κατηγορία έκθεσης	Εύρος Συχνότητας	SAR σε όλο το σώμα ανά 1g	Τοπικό Μέγιστο SAR κεφάλι	Τοπικό Μέγιστο SAR άκρα
Επαγγελματική	100 KHz-6 GHz	0.4 W/kg	10 W/kg	20 W/kg
Κοινό	100 Hz-6 GHz	0.08 W/kg	1.6 W/kg	4 W/kg

Πίνακας 2.5: Μέγιστο όριο SAR της FCC σε συχνότητα 100 KHz-6 GHz ανά 1g [152].

Κατηγορία έκθεσης	Εύρος Συχνότητας	SAR σε όλο το σώμα ανά 10g	Τοπικό Μέγιστο SAR κεφάλι	Τοπικό Μέγιστο SAR άκρα
Επαγγελματική	100 kHz-6 GHz	0.4 W/kg	10 W/kg	20 W/kg
Κοινό	100 Hz-10 GHz	0.08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg

Πίνακας 2.6: Μέγιστο όριο SAR της ICNIRP σε συχνότητα 100 KHz-6 GHz ανά 10g [152].

την πιο πρόσφατη επιστημονική έρευνα. Επιπλέον, οι τιμές SAR για συγκεκριμένες συσκευές είναι συνήθως διαθέσιμες από τους κατασκευαστές και μπορούν να βρεθούν στις οδηγίες του προϊόντος ή στους ιστότοπους των κατασκευαστών. Οι χρήστες που ανησυχούν για την έκθεση στο SAR μπορούν να ανατρέξουν σε αυτές τις τιμές για να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με την αγορά της συσκευής.

2.4 Κριτήρια υπολογισμού έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η ανησυχία για τους κινδύνους για την υγεία από την έκθεση σε μη ιονίζουσα ακτινοβολία (Non Ionizing Radiation-NIR) ξεκίνησε από την δεκαετία του 1950 μετά την πρώτη εισαγωγή των ραντάρ παρακολούθησης κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Αμέσως μετά, η έρευνα σχετικά με τις πιθανές βιολογικές επιπτώσεις της ακτινοβολίας μικροκυμάτων στην πρώην Σοβιετική Ένωση και τις Η.Π.Α. οδήγησε σε σημαντικά διαφορετικά όρια έκθεσης για το κοινό και τους εργαζομένους, κυρίως λόγω διαφορετικών φιλοσοφιών προστασίας. Καθώς η ανησυχία των κοινών πολιτών αυξήθηκε, οι εθνικές αρχές άρχισαν να εισάγουν νομοθεσίες για τον περιορισμό της έκθεσης σε NIR από οικιακούς φούρνους μικροκυμάτων και συσκευές στο χώρο εργασίας. Η Διεθνής Ένωση Ακτινοπροστασίας (INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION-IRPA) ιδρύθηκε το 1966 με σκοπό την αντιμετώπιση ζητημάτων προστασίας των μη ιοντίζουσων ακτινοβολιών. Το IRPA ίδρυσε τελικά τη Διεθνή Επιτροπή για την Προστασία από Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection-ICNIRP), που ναύλωσε την αρχική αποστολή της το 1992, όταν όρισε το NIR ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία [162]. Η Διεθνής Επιτροπή Προστασίας από Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες είναι μια ανεξάρτητη ομάδα εμπειρογνομόνων με ευθύνη για την αξιολόγηση της γνώσης σχετικά με τις επιπτώσεις της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας στην ανθρώπινη υγεία και ευημερία. Παρέχουν επίσης επιστημονικές συμβουλές και συστάσεις για την προστασία από τις βλαβερές επιπτώσεις της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένων των στατικών ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, των κυμάτων ραδιοσυχνότητας, του ορατού φωτός και της υπεριώδους ακτινοβολίας. Η δραστηριότητα του ICNIRP περιλαμβάνει την ανάλυση των φυσικών χαρακτηριστικών της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας και την αναφορά βιολογικών επιπτώσεων από την έκθεση σε μη ιονίζουσα ακτινοβολία. Επιπρόσθετα, ανέπτυξαν και αναπτύσσουν μέχρι και σήμερα κριτήρια προστασίας όπως τον ρυθμό ειδικής απορρόφησης SAR.

Ακόμα παρέχουν οδηγίες και καθοδηγήσεις για την προστασία των εργαζομένων, των κοινών πολιτών, των ασθενών και της προστασίας του περιβάλλοντος από την ακτινοβολία. Τέλος, προτείνουν συστήματα και μεθόδους προστασίας και διαφύλαξης των παραπάνω. Η επιστημονική εξειδίκευση των μελών του ICNIRP περιλαμβάνει ιατρική, δερματολογία, οφθαλμολογία, επιδημιολογία, βιολογία, φωτοβιολογία, φυσιολογία, φυσική, ηλεκτρολογία και μετρολογία [163].

Το ICNIRP εκτελεί το έργο του σε συνεργασία με διάφορους περιφερειακούς και διεθνείς εταίρους και επιστημονικούς οργανισμούς. Η ICNIRP συνεργάζεται στενά με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας μέσω δύο προγραμμάτων μη ιονίζουσας ακτινοβολίας και υγείας: του Διεθνούς Έργου EMF και του έργου “INTERSUN”. Η ICNIRP συνεργάζεται επίσης στενά με τον Διεθνή Οργανισμό Εργασίας (International Labour Organization-ILO) σε θέματα που σχετίζονται με την επαγγελματική προστασία από μη ιονίζουσες ακτινοβολίες. Η ICNIRP συνεργάζεται επίσης με το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο (European Council), και πιο συγκεκριμένα με την Ευρωπαϊκή Εταιρεία για την Πρόληψη του Καρκίνου του Δέρματος (EUROSKIN), τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (Commission on Illumination-CIE) και τη Διεθνή Επιτροπή για την Εργασιακή Υγιεινή (International Commission on Occupational Health-ICOH), μεταξύ άλλων [163].

Ο προαναφερόμενος Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (SAR) είναι ένα μέτρο της ποσότητας ενέργειας ραδιοσυχνότητων που απορροφάται (ανά μονάδα μάζας) στο ανθρώπινο σώμα κάθε φορά που ένα κινητό τηλέφωνο ή μια άλλη ασύρματη συσκευή ραδιοφώνου εκπέμπει. Το SAR υπολογίζεται συνήθως είτε σε ολόκληρο το σώμα είτε σε μικρό όγκο δείγματος (συνήθως 1 g ή 10 g ιστού). Η τιμή που αναφέρεται είναι το μέγιστο επίπεδο που μετράται στο μέρος του σώματος που μελετήθηκε για τον αναφερόμενο όγκο ή μάζα. Στις μετρήσεις του SAR, πάντα υπολογίζεται η μέγιστη δυνατή τιμή SAR (σε μονάδες Watts/κιλό), που μπορεί να εκπέμψει ο πομπός. Αυτό σημαίνει ότι καθ' όλη την διάρκεια του έλεγχου, ο εκτόμος χρησιμοποιεί την μέγιστη δυνατή ισχύ. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει βέβαια στην πράξη καθώς οι συσκευές δεν εκπέμπουν ποτέ στην μέγιστη ισχύ τους για παρατημένα χρονικά διαστήματα. Αντ' αυτού χρησιμοποιούν την ελάχιστη αναγκαία ισχύ (ανάλογα με τις συνθήκες) με σκοπό την ελάττωσή της κατανάλωσης ενέργειας και την επέκταση διάρκειας Ζωής της μπαταρίας της συσκευής. Με άλλα λόγια οι τιμές SAR που αναφέρονται για κάθε μοντέλο κινητού τηλεφώνου τείνουν να υπερεκτιμούν σημαντικά τα επίπεδα έκθεσης στην πράξη, καθώς τα μοντέλα τηλεφώνων ελέγχονται σε μέγιστα επίπεδα ισχύος σε εργαστηριακές συνθήκες για να διασφαλιστεί ότι συμμορφώνονται σε κάθε περίπτωση. Μια μέτρηση SAR γίνεται συνήθως με ένα τεχνητό κεφάλι, όπου είναι τοποθετημένοι διάφοροι αισθητήρες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις του SAR γίνονται σε όλες τις δυνατές συχνότητες της συσκευής με πολλούς τρόπους σε πολλά σημεία προσομοιώνοντας έτσι τους περισσότερους τρόπους με τους οποίους οι άνθρωποι κρατάνε ένα κινητό τηλέφωνο κατά την διάρκεια μιας κλήσης. Το SAR μας δείχνει το χειρότερο δυνατό σενάριο και για να μπορεί μια συσκευή να εγκριθεί θα πρέπει το χειρότερο αυτό σενάριο να είναι κάτω από το ανώτερο όριο SAR που τέθηκε από την ICNIRP και την IEEE. Λόγω της φύσεως των μετρήσεων του SAR υπάρχουν ορισμένα ψεγάδια. Συγκεκριμένα:

1. Εφόσον το SAR δείχνει μόνο τις μέγιστες από όλες τις μετρήσεις είναι πολύ πιθανό ένα κινητό Α να έχει μεγαλύτερη τιμή SAR από ένα κινητό Β σε μια μόνο περίπτωση και ταυτοχρόνως να έχει πολύ μικρότερη τιμή SAR στις υπόλοιπες κατηγορίες και κατά συνέπεια μικρότερη μέση τιμή SAR. Το κινητό Α θα θεωρείται πως εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία ωστόσο στην πράξη ένας μέσος χρήστης θα λαμβάνει λιγότερη ακτινοβολία από το κινητό Α.

2. Αν ένα κινητό A επικοινωνεί με τους σταθμούς βάσης πιο εργονομικά και αποδοτικά, θα χρησιμοποιεί λιγότερη ισχύ σε μια πραγματική επικοινωνία. Αυτό σημαίνει πως το κινητό A πολύ πιθανό να παράγει σημαντικά λιγότερη ακτινοβολία στην πράξη σε σύγκριση το κινητό B.
3. Αν ο χρήστης τείνει να χρησιμοποιεί το τηλέφωνο του με συγκεκριμένο τρόπο μέσω του οποίου η λαμβανόμενη ακτινοβολία στο κινητό A είναι μικρότερη από το κινητό B τότε ο χρήστης θα λαμβάνει ακτινοβολία λιγότερη από το κινητό A σε σύγκρισή με το κινητό B ακόμα και αν το SAR του A είναι μεγαλύτερο από το SAR του B.

Ο υπολογισμός της μάζας ιστού σώματος στους υπολογισμούς SAR περιλαμβάνει ένα τυποποιημένο μοντέλο και όχι την πραγματική μάζα ιστού ενός ατόμου. Οι υπολογισμοί του SAR χρησιμοποιούν συνήθως ένα τυποποιημένο μοντέλο ανθρώπινου σώματος γνωστό ως Ειδικό Ανθρωπομορφικό Μανεκέν ή Ειδικό Ανθρωπομορφικό Φάντασμα (SAM Phantom).

Αυτό το μοντέλο αντιπροσωπεύει τα μέσα χαρακτηριστικά των ανθρώπινων ιστών όσον αφορά το μέγεθος, το σχήμα και τις ηλεκτρικές ιδιότητες. Προσομοιώνει διαφορετικούς τύπους ιστών στο σώμα, όπως μυς, λίπος και οστά, με καθορισμένες ηλεκτρικές ιδιότητες. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτό το τυποποιημένο μοντέλο δεν αντιστοιχεί άμεσα στην πραγματική μάζα ιστού ενός ατόμου.

Οι υπολογισμοί SAR βασίζονται σε αυτό το τυποποιημένο μοντέλο για την εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο η ενέργεια ραδιοσυχνότητας (RF) απορροφάται από τους ιστούς όταν εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία από συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα. Αυτοί οι υπολογισμοί βοηθούν να διασφαλιστεί ότι η έκθεση σε ενέργεια ραδιοσυχνότητας παραμένει εντός των ορίων ασφαλείας που έχουν καθοριστεί από ρυθμιστικούς φορείς.

Ο τραυματισμός ασθενών από ραδιοσυχνότητες είναι αποτέλεσμα αυξημένων θερμοκρασιών στους ιστούς και όχι του ίδιου του SAR. Ως ακατέργαστη προσέγγιση, ένα SAR 1 W/kg θα αύξανε τη θερμοκρασία μιας μονωμένης πλάκας ιστού κατά περίπου 1 °C ανά ώρα. Επιπλέον, ορισμένα όργανα (όπως τα μάτια και το κεφάλι) είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε τραυματισμό που προκαλείται από τη θερμότητα, ενώ άλλα όχι.

Αν και το SAR είναι η κυρίαρχη πηγή θέρμανσης των ιστών, είναι μόνο ένας παράγοντας της θερμοκρασίας των ιστών. Άλλοι κρίσιμοι παράγοντες περιλαμβάνουν: τοπική αιμάτωση, αρχική θερμοκρασία σώματος ασθενούς, θερμορρυθμιστική ικανότητα του ασθενούς, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ροή αέρα, σχετική υγρασία, ρούχα και ικανότητα εφίδρωσης. Οι ασθενείς που διατρέχουν κίνδυνο υπερθέρμανσης περιλαμβάνουν εκείνους με μειωμένες θερμορρυθμιστικές ικανότητες — βρέφη, έγκυες γυναίκες, ηλικιωμένους, παχύσαρκους, διαβητικούς, εμπύρετους ασθενείς και εκείνους με καρδιακή ανεπάρκεια. Ορισμένα φάρμακα μπορούν επίσης να επηρεάσουν τις θερμορρυθμιστικές αποκρίσεις. Αυτοί οι παράγοντες θα πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σάρωση ενός ευαίσθητου ασθενούς, ακόμα κι αν οι προβλεπόμενες τιμές SAR φαίνεται να είναι εντός ανεκτών ορίων.

Η ακτινοβολούμενη ισχύς του κινητού τηλεφώνου ποικίλει ανάλογα με την απόσταση του από τον σταθμό βάσης. Μπορεί να κυμανθεί από 1 pWatt μέχρι και 2 Watt σε περιπτώσεις που ο σταθμός βάσης βρίσκεται πολύ μακριά ή υπάρχουν εμπόδια (φυσικά και μη) μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής τελικού χρήστη. Μια τυπική φορητή κεραία τηλεφώνου έχει κέρδος κεραίας που κυμαίνεται από -6 dbi μέχρι

$$P_r = \frac{(P_T G_T G_R \lambda^2)}{(4\pi r)^2} \quad (2.11)$$

0 dbi. 0 dbi (μηδέν dB) επίσης γνωστή ως συχνότητα μοναδιαίου κέρδους (Unity Gain) μιας υποτροπικής κεραίας (Unity Gain Frequency-UGF).

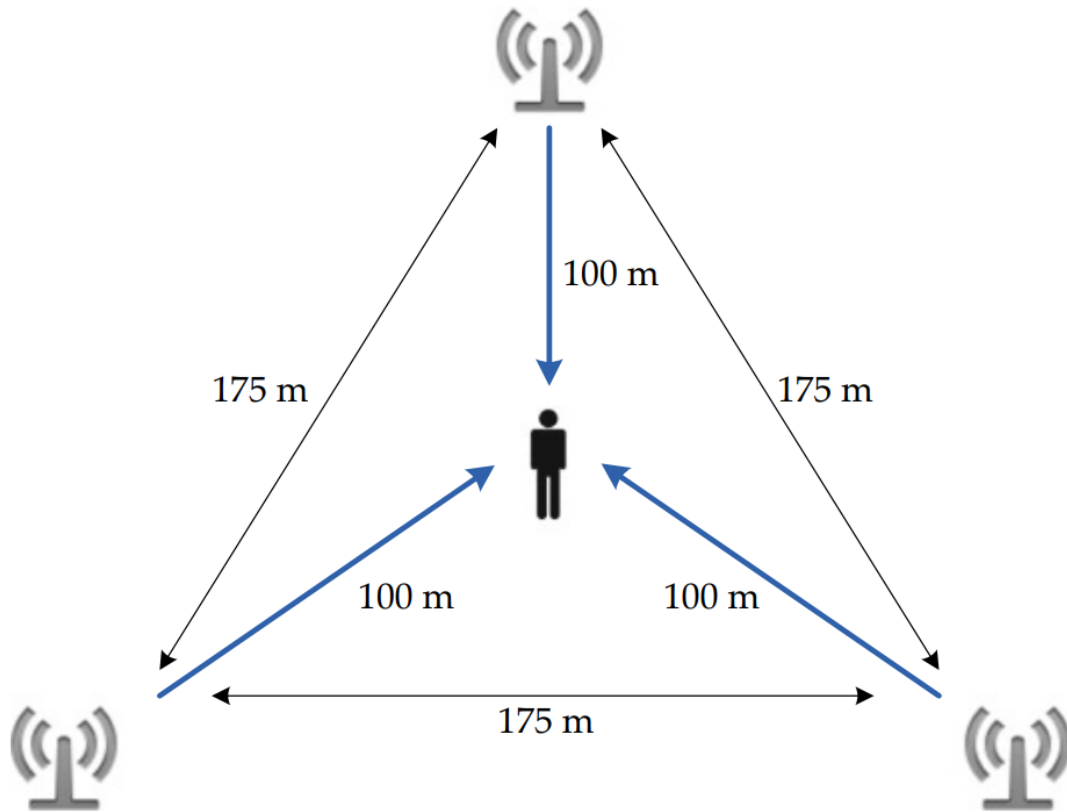
Βέβαια το κέρδος της κεραίας του κινητού τηλεφώνου όπως άλλωστε και το κέρδος μιας κεραίας γενικότερα, μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους εξωτερικούς παράγοντες. Ο σημαντικότερος ίσως για την παρούσα εργασία είναι ο περιορισμός του κέρδους της κεραίας του κινητού τηλεφώνου από το ανθρώπινο σώμα, ο οποίος αυξάνεται σε αξιοσημείωτο βαθμό για κοντινές αποστάσεις [164]. Συγκεκριμένα το κέρδος της κεραίας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (2.10) όπου:

$$y = (ax + b) \quad (2.10)$$

- y είναι η εκτιμώμενη τιμή του κέρδους
- x είναι η απόσταση του ανθρώπινου σώματος από την κεραία (m)
- a και b είναι συντελεστές των οποίων οι τιμές λαμβάνονται με την εφαρμογή του αλγόριθμου διαβάθμισης κλίσης (gradient descent) και κυμαίνονται ανάλογα με την συχνότητα λειτουργίας της κεραίας [165].

Όλες αυτές οι ανησυχίες και μελέτες γίνονται για τις συσκευές του τελικού χρήστη, δηλαδή για τα κινητά τηλέφωνα. Δεν θα έπρεπε να υπάρχουν επίσης προβληματισμοί για τους σταθμούς βάσης; Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1, πολλοί άνθρωποι πίστευαν πως οι κεραίες 5G ήταν επιβλαβείς. Τα τελευταία 20 χρόνια, έχει προκύψει ένας μύθος πως η ακτινοβολία που εκπέμπεται από έναν σταθμό βάσης είναι επιβλαβής για τους ανθρώπους που ζουν κοντά στη βάση. Αν και η ποσότητα ισχύος που εκπέμπεται στο σταθμό βάσης είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή ενός κινητού τηλεφώνου, η ισχύς σε οποιοδήποτε σημείο μακριά από την κεραία μειώνεται δραματικά. Συγκεκριμένα, η εκπεμπόμενη ισχύς και κατά συνέπεια και η ακτινοβολία είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης, όπως φαίνεται και στο (2.11):

όπου P_T είναι η ακτινοβολούμενη ισχύς (W), G_T είναι το κέρδος της κεραίας ακτινοβολίας (dbi ή db), G_R είναι το κέρδος της κεραίας λήψης (dbi, db ή αριθμός-πολλαπλασιαστής), λ το μήκος κύματος (m/s) και r η απόσταση από την κεραία ακτινοβολίας στην κεραία λήψης (m/s). Καθώς το λ είναι αντιστρόφως ανάλογο με την συχνότητα, είναι φανερό πως με την αύξηση της συχνότητας θα αυξάνεται και η απώλειά σήματος. Μπορεί να υποθεθεί ότι το ανθρώπινο σώμα (ή το δέρμα) είναι μια κεραία λήψης με κέρδος λήψης την μονάδα, επομένως, αυτή η εξίσωση μπορεί να εφαρμοστεί σε έναν άνθρωπο που στέκεται σε απόσταση r από την κεραία. Η εξίσωση (2.11) δηλώνει ότι για κάθε δύο μέτρα που απομακρύνεται κανείς από την κεραία, το σήμα θα μειώνεται τέσσερις φορές. Σε απόσταση 10 m από την κεραία, το σήμα είναι το 1/100 του σήματος σε απόσταση 1 m από την κεραία. Ως εκ τούτου, εκτός εάν η κεραία είναι εγκατεστημένη στο σαλόνι του χρήστη, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που λαμβάνει το άτομο που στέκεται στην κυψέλη δικτύου είναι τόσο μικρή που είναι πρακτικά ασήμαντη. Το παραπάνω είναι



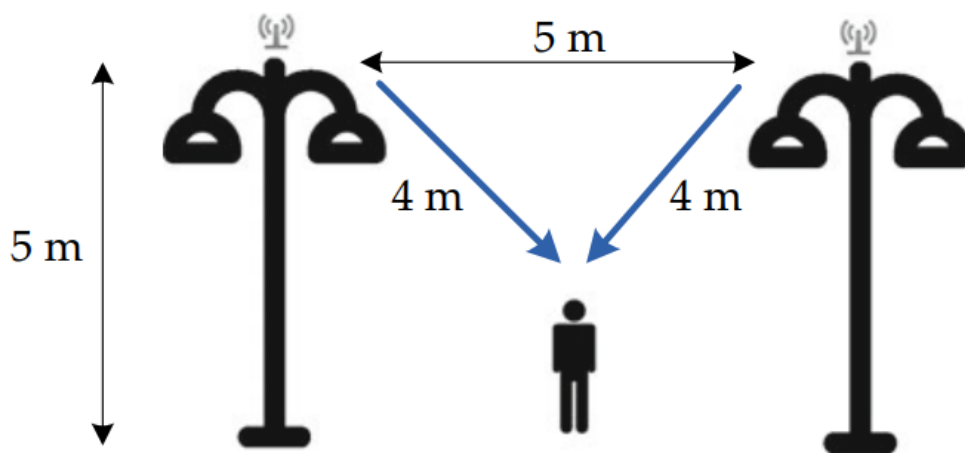
Σχήμα 2.16: Σενάριο στο οποίο ένα άτομο βρίσκεται σε ίση απόσταση από τρεις κυψελοειδείς σταθμούς βάσης [145].

κοινό για όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από την κεραία 5G, καθώς και για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από παλαιότερα δίκτυα, αλλά και για τα ανερχόμενα δίκτυα έκκτης γενιάς. Είναι ενδιαφέρον να ρίξουμε μια ματιά στην εξασθένηση του σήματος από άλλη οπτική γωνία. Αν σκεφτεί κανείς ένα σενάριο όπου 1 W ισχύος μεταδίδεται από ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης και ότι η τυπική ισχύς που αντιλαμβάνεται η συσκευή χρήστη δεν είναι μεγαλύτερη από 1 μW , αυτό σημαίνει ότι το 99,9999% του σήματος χάνεται στην διαδρομή [166]. Εντούτοις, δεν έχει εξεταστεί το ενδεχόμενο ύπαρξης πολλών μικρών στοιχειοκεραιοιών κάτι το οποίο είναι πολύ συχνό στην τεχνολογία του 5G και ακόμα θα είναι ακόμα πιο σύνηθες στο 6G. Το χειρότερο δυνατό σενάριο θα είναι έχει το άτομο να βρίσκεται ακριβώς ανάμεσα στους σταθμούς βάσης. Ας υποθέσουμε ότι το άτομο στέκεται στο κέντρο ενός τριγώνου που αποτελείται από τρεις πύργους σε απόσταση περίπου 175 m μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στο 2.16. Σε αυτό το σημείο το άτομο θα ακτινοβοληθεί εξίσου από κάθε έναν από τους τρεις πύργους. Εφόσον λαμβάνει τρεις φορές την ακτινοβολία που έχει καταγραφεί σε απόσταση 100 m από τον πύργο (το ύψος του πύργου αγνοείται σε αυτήν την περίπτωση), η ποσότητα ισχύος που θα λάβει θα είναι $3 \times 15,1 \mu\text{W} = 45,3 \mu\text{W}$ για την υψηλότερη αντιληπτή ισχύ που σχετίζεται με τη μετάδοση 3 GHz. Παρόλο που εξακολουθεί να είναι τρεις φορές περισσότερο από αυτό που θα λάμβανε αν ήταν μόνο ένας πύργος κοντά, η ισχύς είναι ωστόσο περίπου 33 φορές μικρότερη από ό,τι αν το ίδιο άτομο στεκόταν απλώς στο κάτω μέρος του πρώτου πύργου. Επομένως, το πόσο πυκνά έχουμε κεραίες και σταθμούς βάσης έχει ουσιαστικά μηδενική επίδραση στην ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ρύπανσης.

Απόσταση	Συχνότητα				
	3GHz	30 GHz	60 GHz	300GHz	600GHz
3.16 m	$6.31 \cdot 10^{-6}$	$6.31 \cdot 10^{-8}$	$1.58 \cdot 10^{-8}$	$6.31 \cdot 10^{-10}$	$1.58 \cdot 10^{-10}$
10 m	$6.31 \cdot 10^{-7}$	$6.31 \cdot 10^{-9}$	$1.58 \cdot 10^{-9}$	$6.31 \cdot 10^{-11}$	$1.58 \cdot 10^{-11}$
100 m	$6.31 \cdot 10^{-9}$	$6.31 \cdot 10^{-11}$	$1.58 \cdot 10^{-11}$	$6.31 \cdot 10^{-13}$	$1.58 \cdot 10^{-13}$
1000m	$6.31 \cdot 10^{-11}$	$6.31 \cdot 10^{-13}$	$1.58 \cdot 10^{-13}$	$6.31 \cdot 10^{-15}$	$1.58 \cdot 10^{-15}$

Πίνακας 2.7: Συντελεστής απόσβεσης ισχύος για διάφορες τιμές συχνότητας και απόστασης. [145].

Στην περίπτωση ανάπτυξης φανοστατών που λειτουργούν ως πομποί (κάτι το οποίο συμβαίνει ήδη σε τηλεπικοινωνίες 5G και θα συμβαίνει και στο 6G) υποθέτοντας ότι οι φανοστάτες του δρόμου ύψους 5 μέτρων είναι τοποθετημένοι σε απόσταση 5 μέτρων μεταξύ τους, και ο άνθρωπος βρίσκεται στο κεντρικό σημείο μεταξύ των δύο πόλων του δρόμου, το κεφάλι του ατόμου θα απέχει 4 μέτρα από τον πομπό σε κάθε πόλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17. Η αντιληπτή ακτινοβολία σε αυτό το σημείο θα είναι περίπου 95 μW για το μεμονωμένο σήμα στα 30 GHz, με αποτέλεσμα τη συνολική λαμβανόμενη ισχύ 190 μW εάν ληφθούν υπόψη οι πομποί και από τους δύο πόλους. Αυτό εξακολουθεί να είναι μόνο περίπου 25% υψηλότερο από την ισχύ που λαμβάνεται εάν το άτομο στέκεται ακριβώς κάτω από έναν πόλο. Εάν η απόσταση μεταξύ των φανοστατών αυξηθεί σε περίπου 6 m και πέρα από αυτό το σημείο, η ισχύς που λαμβάνεται στο μεσαίο σημείο θα είναι χαμηλότερη από ό,τι στο κάτω μέρος ενός μεμονωμένου φανοστάτη. Επομένως, οι πυκνές αναπτύξεις, ακόμη και με τη χρήση φανοστάτη, δεν αυξάνουν σημαντικά τη μέγιστη έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ακόμα κι αν οι φανοστάτες είναι τοποθετημένοι πολύ κοντά μεταξύ τους [145]. Στον πίνακα 2.7 παριστάνεται ο συντελεστής απόσβεσης, εν συναρτήσει διαφόρων τιμών συχνότητας και απόστασης.



Σχήμα 2.17: Σενάριο στο οποίο άνθρωπος βρίσκεται ακριβώς ανάμεσα από 2 πόλους-πομπούς [145].

θα πρέπει να είναι σαφές ότι η πιθανή απειλή για την ανθρώπινη υγεία δεν προέρχεται από την πλευρά του σταθμού βάσης. Πιθανώς πιο επιβλαβής είναι η ακτινοβολία που εκπέμπεται από κινητά τηλέφωνα, tablet, φορητούς υπολογιστές και άλλες συσκευές, που κρατούν οι χρήστες κοντά στο πρόσωπό τους ή σε άλλα μέρη του σώματος όταν αυτές οι συσκευές εκπέμπουν ενεργά κατά τη διάρκεια μιας τηλεφωνικής κλήσης ή κατά τη μεταφορά δεδομένων. Η ρύθμιση της έκθεσης στην ακτινοβολία για συσκευές χρήστη είναι πολύ πιο περίπλοκη, τουλάχιστον για δύο λόγους: πρώτον, λειτουργούν συνήθως πολύ κοντά στο ανθρώπινο σώμα και, δεύτερον, παράγοντες όπως το σχήμα από μέρη του σώματος (όπως το κεφάλι)

Συχνότητα (GHz)	Απόσταση πομπού και του ανθρώπινου σώματος	Κριτήριο υπολογισμού
<6	<20 cm	SAR
<6	>20 cm	P_D (μέσω μετρήσεων)
>6	> 6cm	P_D (μέσω μετρήσεων)
>6	< 6cm	P_D (μέσω μοντέλου)

Πίνακας 2.8: Κριτήριο FCC υπολογισμού έκθεσης ανά περίπτωση [152].

πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αυτό επιδεινώνεται από το γεγονός ότι διαφορετικές συχνότητες ακτινοβολίας έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικό βάθος διείσδυσης EMF. Αυτό απαιτεί τη χρήση συνδυασμού των μετρήσεων SAR και πυκνότητας ισχύος κατά τον καθορισμό ορίων έκθεσης.

Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται σήμερα για διαφορετικά σενάρια έκθεσης παρατίθενται στον πίνακα 2.8. Σε συχνότητες κάτω των 6 GHz για μια πηγή ακτινοβολίας που λειτουργεί κοντά στο ανθρώπινο σώμα (απόσταση μικρότερη από 20 cm), όπως ένα κινητό τηλέφωνο, η FCC δίνει οδηγίες ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το SAR για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας. Σε συχνότητες κάτω των 6 GHz για μια πηγή ακτινοβολίας μακριά από το ανθρώπινο σώμα, όπως ένας σταθμός βάσης, θα πρέπει να πραγματοποιείται μέτρηση του P_D για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης. Η FCC δεν θεωρεί ότι η μέτρηση SAR μπορεί να εφαρμοστεί καθόλου σε συχνότητες κυμάτων χιλιοστών, όπως συζητήθηκε στο [167], δεδομένου ότι τα όρια SAR δεν ισχύουν για συσκευές άνω των 6 GHz, το P_D θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση οποιασδήποτε συσκευής άνω των 6 GHz σύμφωνα με τις οδηγίες της FCC. Αξιοπίστες μετρήσεις P_D μπορούν κανονικά να γίνουν σε αποστάσεις 5 cm ή περισσότερο από τον πομπό. Ωστόσο, εάν μια συσκευή λειτουργεί κανονικά σε αποστάσεις μικρότερες από 5 cm από το ανθρώπινο σώμα, η FCC συμβουλεύει ότι η P_D πρέπει να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τεχνικές αριθμητικής μοντελοποίησης, όπως το πεδίο χρόνου πεπερασμένων διαφορών (Finite-difference time-domain method, FDTD) ή η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite element method, FEM), για τον καθορισμό της συνολικής έκθεσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως η ICNIRP, σε αντίθεση με την FCC χρησιμοποιεί το SAR για μετρήσεις ακτινοβολίας μέχρι τα 10 GHz. Βέβαια τα συγκεκριμένα όρια για τον υπολογισμό του SAR και του P_D μαίνεται να διευρυνθούν για να καλύπτουν και τις συχνότητες του 5G και του 6G.

Ένας ακόμα παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει το P_D και κατά συνέπεια την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πηγάζει από την εξίσωση 2.2. Η αντίσταση (η) του ανθρώπινου σώματος, που συχνά αναφέρεται ως ηλεκτρική αντίσταση του σώματος, μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με διάφορους παράγοντες, όπως η διαδρομή του ηλεκτρικού ρεύματος, η περιοχή επαφής, οι δερματικές παθήσεις και η ατομική μεταβλητότητα. Η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος συνδέεται κυρίως με την αντίσταση του δέρματος, καθώς το δέρμα είναι το πιο εξωτερικό στρώμα από το οποίο περνούν τα ηλεκτρικά ρεύματα. Τυπικά, η αντίσταση του ξηρού ανθρώπινου δέρματος κυμαίνεται από 1.000 έως 100.000 ohms (1 kΩ έως 100 kΩ). Το βρεγμένο ή ιδρωμένο δέρμα μπορεί να έχει σημαντικά χαμηλότερη αντίσταση, πιθανώς στην περιοχή από 100 έως 1.000 ohms (0,1 kΩ έως 1 kΩ). Το παραπάνω δεν θα επηρεάσει την έκθεση σε μεγάλες αποστάσεις όπου χρησιμοποιείται η αντίστασή του κενού στο μεγαλύτερο κομμάτι της μετάδοσης ωστόσο σε μικρές αποστάσεις πρέπει να ληφθεί υπόψη και η αντίστασή του ανθρώπινου σώματος, πράγμα που καθιστά δύσκολο τον υπολογισμό του P_D σε μικρές αποστάσεις.

2.5 Επίλογος

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χρησιμοποιείται από τους ανθρώπους για εκατοντάδες χρόνια και έχει φέρει καινοτομίες σε πάρα πολλούς τεχνολογικούς τομείς, είτε όταν μιλάμε για μη-ιοντίζουσες ακτινοβολίες, είτε ακόμη και για ιοντίζουσες. Ο τομέας των κινητών επικοινωνιών συγκεκριμένα, δίχως την χρήση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, θα ήταν πρακτικά αδύνατον να υπάρξει. Λόγο της εξασθένησης από τους πύργους βάσης, είναι φανερό πλέον πως ο μόνος λόγος προβληματισμού επιπτώσεων υπερβολικής έκθεσης θα έπρεπε να είναι για την εκπεμπόμενη ακτινοβολία των συσκευών των χρηστών. Στις τεχνολογίες μέχρι σήμερα (1-4G) όπου η συχνότητα δεν ξεπερνούσε τα 6 GHz, ήταν αρκετό να μετρήσουμε την τιμή SAR ενός οργανισμού για να δούμε αν υπάρχει κάποιος κίνδυνος. Ωστόσο στα δίκτυα 5_{ης} και 6_{ης} γενιάς και συγκεκριμένα σε μεγαλύτερες συχνότητες από 6 ή 10 GHz το SAR χάνει την ακρίβεια του, και γίνεται χρήση της πυκνότητας ισχύος. Το SAR χρησιμοποιείται συνήθως για μέτρηση NIR για RF (100KHZ μέχρι 6 GHz) και για αποστάσεις κάτω των 20 cm (σε συσκευές όπως κινητά tablet και έξυπνα ρολόγια), ενώ η πυκνότητα ισχύος χρησιμοποιείται για αποστάσεις πάνω από 20 cm ή συχνότητες πάνω από 6 GHz. Στην επόμενη ενότητα θα αναπτυχθεί μοντέλο μέτρησης του SAR του P_D και της ακτινοβόλουμένης ισχύος σε διάφορες συνθήκες και διάφορα διαφορετικά μέρη του σώματος για όλες τις γενιές κινητής επικοινωνίας.

Κεφάλαιο 3ο: Ανάλυση επίδρασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον άνθρωπο

3.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, οι επίσημοι κανονισμοί σχετικά με τα όρια έκθεσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας βασίζονται στην Πυκνότητα Ισχύος (P_D) και τον δείκτη του ρυθμού ειδικής απορρόφησης (SAR). Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο που μπορεί να εκδηλώσει με έμμεσο τρόπο την ποσότητα ενέργειας και κατά συνέπεια της ακτινοβολίας που διοχετεύεται είναι η ποσότητα της ακτινοβολούμενης ισχύος και η απόσβεση της. Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθούν τα παραπάνω (σε όποιες συνθήκες είναι το καθένα καταλληλότερο) σε διάφορες καταστάσεις προσομοίωσης στο περιβάλλον της Matlab όπου θα μελετηθούν οι παλιότερες γενιές (2G, 3G) καθώς και οι γενιές που χρησιμοποιούνται σήμερα (4G, 5G) σε διάφορες περιπτώσεις εκπομπής και κατά συνέπεια ακτινοβολίας που ζούμε καθημερινά καθώς και πιο σπάνιες περιπτώσεις, όπως του εργασιακού τομέα και ακραίες καταστάσεις (θεωρητικά μέγιστα που σχεδόν ποτέ δεν λαμβάνουν χώρα) και θα συγκριθούν με τις εκτιμώμενες συνθήκες εκπομπής που αναμένεται να έχει το 6G και τα THz κύματα, σύμφωνα με τα προβλεπόμενα χαρακτηριστικά του. Ειδικότερα θα αναπαρασταθεί γραφικά, το κατά πόσο παράγοντες όπως η διακύμανση της συχνότητας, της απόστασης, της ακτινοβολούμενης ισχύος εισόδου και του κέρδους της κεραίας εκπομπής επηρεάζουν την λαμβανομένη ενέργεια και την ισχύ στο ανθρώπινο σώμα.

3.2 Συλλογή δεδομένων προσομοίωσης

3.2.1 Πυκνότητα ισχύος μακρινής ζώνης

Αρχικά, θα ήταν συνετό να εξεταστεί πως και σε τι βαθμό η ακτινοβολία των σταθμών βάσης είναι σε θέση να επηρεάσει τον άνθρωπο. Μια τυπική κεραία βάσης τεχνολογίας 3ης γενιάς είχε μέση ισχύ εκπομπής (σε περιόδους συμφόρησης) τα 30 W. Ωστόσο υπήρχε θεωρητική μέγιστη ακτινοβολία ίση με 50 W [168]. Οι κεραίες εκείνης της εποχής είχαν κέρδος που συνήθως κυμαινόταν από 5 μέχρι 8 dBi, ωστόσο υπήρχαν και κεραίες με 10 dBi, που είναι πλέον το πιο σύνηθες κέρδος ενός σταθμού βάσης των τωρινών γενεών. Αντίστοιχα μια τυπική κεραία 4G έχει ακτινοβολούμενη ισχύ 30-60 Watt, αλλά σε σενάρια υψηλής συμφόρησης, μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 120 Watt. Το μέγιστο κέρδος της κεραίας αυξήθηκε στα 16 dBi [169]. Από το 5G και μετά, λόγω της ραγδαίας αύξησής των χρηστών και των αναγκών, η θεωρητική μέγιστη ισχύς του σταθμού βάσης μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 240 Watt με το κέρδος να έχει τυπική τιμή κέρδους 18 dBi αξιοποιώντας τεχνικές MIMO [170]. Το 6G (στην αρχική του μορφή τουλάχιστον) αναμένεται να διατηρήσει το ανώτατο όριο των 240 Watt του προκατόχου του με πιθανό ανώτατο τα 300W. Ωστόσο με την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας είναι πιθανό να διαπεραστεί το ακρότατο αυτό ιδίως σε αραιοκατοικημένες περιοχές με περιορισμένη κάλυψη. Λαμβάνοντάς υπόψιν τον διπλασιασμό της θεωρητικής μέγιστης ισχύος από το 4G στο 5G, θεωρήθηκε θεμιτό να θεσπιστεί ένα νέο προληπτικό όριο ίσο με 500 Watt ανα κανάλι (το οποίο ίσως χρησιμοποιηθεί σε αραιοκατοικημένες περιοχές) με σκοπό την υπερκάλυψη της πιθανότητας αυτής. Η επιλογή των 500 Watt δεν είναι τυχαία, καθώς 500 Watt είναι συγκεκριμένα η ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή που οριοθετεί η FCC στις Οδηγίες για τοποθέτηση κεραιών κινητής τηλεφωνίας [171]. Το κέρδος μια τυπικής κεραίας 6G προβλέπεται να είναι 25dBi [170]. Σημειώνεται πως η μετρούμενη ισχύς είναι η ισχύς που εκπέμπουν οι σταθμοί βάσης και όχι η συνολική ισχύς του σταθμού βάσης καθώς υπάρχει μεγάλη ποσότητά ισχύος που μετατρέπεται

Γενιά	Ισχύς εξόδου	Κέρδος
3G	50W	8 dbi
4G	120W	16dbi
5G	240W	18 dbi
6G ελάχιστο	300W	25 dbi
6G μέγιστο	500W	25 dbi

Πίνακας 3.1: Στοιχεία προσομοίωσης Πυκνότητας Ισχύος μακρινής ζώνης [168, 170, 171].

σε θερμότητα πάνω στον σταθμό βάσης και επίσης σημαντική είναι η ποσότητα ισχύος στον μηχανισμό ψύξης του σταθμού βάσης. Στον πίνακα 3.1 παρατίθενται τα στοιχεία για κάθε γενιά συλλογικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος σε συνάρτηση με την ακτινοβολούμενη ισχύ για διάφορες αποστάσεις.

Η μέτρηση της πυκνότητας ισχύος είναι ο ιδανικότερος και ακριβέστερος τρόπος μέτρησης των ανωτάτων ορίων ασφάλειας σε μεγάλες αποστάσεις, δηλαδή σε αποστάσεις από τον σταθμό βάσης μέχρι τον άνθρωπο. Ο άνθρωπος στην συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί γενικότερα να θεωρηθεί ως κεραία λήψης με κέρδος ίσο με την μονάδα. Για την παρακάτω μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (2.3). Προφανώς για μηδενική απόστασή θα έχουμε άπειρη πυκνότητα ισχύος πράγμα που είναι φυσικά αδύνατον. Πάρθηκαν δείγματά του P_D σε απόστασή που κυμαίνεται από 2 με 10 m. Στις μετρήσεις έχει προστεθεί και μια επιπλέον κόκκινη γραμμή που αναπαριστά το ανώτατο όριο της πυκνότητας ισχύος ($10W/m^2$), όπως έχει θεσπιστεί από το FCC και το ICNIRP για το ευρύ κοινό όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.4.

Θα είναι επίσης ορθό να αναλυθούν και τα όρια πυκνότητας ισχύος για άτομα που εργάζονται κοντά σε αυτούς τους σταθμούς βάσης. Είναι θεμιτό να μην εργάζονται σε κοντινές αποστάσεις από τους σταθμούς βάσης όταν αυτοί βρίσκονται σε λειτουργία (ειδικά εάν βρίσκονται σε πλήρη λειτουργία σε περιπτώσεις συμφόρησης) ωστόσο κάτι τέτοιο κάποιες φορές ίσως κριθεί αναγκαίο. Βέβαια με την αυτοματοποίηση των δικτύων 6ης γενιάς (αυτοσυντήρηση, αυτο-επιδιόρθωση) το παραπάνω σενάριο θα είναι σίγουρα σπανιότερο φαινόμενο. Τα όρια πυκνότητας ισχύος σε εργαζομένους είναι 8 φορές μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα για το ευρύ κοινό. Άρα μπορούμε να δούμε ποια θα είναι η μικρότερη επιτρεπόμενη απόσταση για κάθε γενιά (ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κεραίας της κάθε γενιάς) με αυτά τα νέα όρια.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η Ρωσία και η Κίνα έχουν θέσει δικά τους προληπτικά όρια τάξεως 100 φορές μικρότερα από αυτά της FCC ($0.1W/m^2$). Θα χρησιμοποιηθούν τα ίδια στοιχεία του πίνακα 3.1 με τα νέα όρια και θα αναλυθούν οι επιπτώσεις που θα επιφέρουν αυτές οι διαφορές σε σύγκριση με τα όρια FCC στην πράξη.

Ένα ακόμα αξιοσημείωτο σενάριο για ανάλυση είναι αυτό που παριστάνεται στο σχήμα 2.17. Οι πυλώνες φωτισμού κυβελωτών συστημάτων, (λόγω της πυκνότητας με την οποία τοποθετούνται) έχουν όπως αναφέρθηκε χαμηλή ισχύ εκπομπής. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, έχουν μέγιστη ισχύ εκπομπής τα 60 Watt και ισαπέχουν 4 μέτρα από τον άνθρωπο. Στην περίπτωση όπου ένας άνθρωπος βρίσκεται ακριβώς κάτω από έναν τέτοιο πυλώνα φωτισμού θα απέχει περίπου 3 μέτρα από αυτόν. Άρα μπορούμε εύκολα με τα παραπάνω στοιχεία και με την χρήση του τύπου (2.3) να υπολογίσουμε την συνολική πυκνότητα ισχύος του ανθρώπινου σώματος, στις περιπτώσεις όπου ο χρήστης απέχει 4 μέτρα από τους 2 πυλώνες

φωτισμού και εκπέμπουν στο μέγιστο, στην περίπτωση όπου ισαπέχει από τους 2 πυλώνες φωτισμού άλλα είναι σε λειτουργία μονό ο ένας από τους 2 πυλώνες φωτισμού (ή σε πιο ρεαλιστικό σενάριο λειτουργούν και οι 2 στο μισό της μέγιστης ισχύος τους-30 W έκαστος), καθώς και στην περίπτωση όπου ο χρήστης βρίσκεται ακριβώς κάτω από έναν μόνο πυλώνα φωτισμού. Με αυτόν τον τρόπο θα φανεί αν το συγκεκριμένο σενάριο βρίσκεται υπό τα όρια της FCC και κατά συνέπεια κατά πόσο είναι το σενάριο υλοποιήσιμο και ασφαλές.

3.2.2 Ακτινοβολούμενη ισχύς σταθμών βάσης

Ο πιο συνηθισμένος και παλιός τρόπος της μέτρησης της ακτινοβολίας είναι με την μέτρηση της λαμβανομένης δυνατής ισχύος της κεραίας, σε μια απόσταση “x” μέτρα μακριά. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.11). Με την χρήση του (2.1) μπορούμε εύκολα να αναλύσουμε την ακτινοβολούμενη ισχύ καθώς και την εξασθένηση της ισχύος για διάφορες αποστάσεις και ισχύ εξόδου, σε συνάρτηση με την μεταβολή της συχνότητας. Αρχικά θα παρθούν μετρήσεις της ακτινοβολούμενης ισχύος σε συχνότητες της τάξεως των MHz (100-600 MHz). Έπειτα θα μετρηθούν στις συχνότητες 1-6 GHz και τέλος σε συχνότητες 1-6 THz. Η απόσταση θα είναι σταθερή σε όλες τις προσημειώσεις (10 μέτρα), το κέρδος κεραίας θα είναι 10 dbi και θα παρθούν τέσσερις διαφορετικές ισχύς εισόδου 3.1 (50 W, 100W , 250 W και 500 W).

Στην συνέχεια -για σταθερή ισχύ εισόδου 250W, κέρδος κεραίας 10 dbi - θα παρθούν τέσσερις διαφορετικές συχνότητες (1 THz, 2 THz, 3 THz, 4 THz) και θα αναπαρασταθεί η διαφορά της απόσβεσης της κάθε συχνότητας σε συνάρτηση με την μεταβαλλόμενη απόσταση.

Μετά την ανάλυση της ακτινοβολίας όταν ο πομπός είναι ο σταθμός βάσης, εστιάζουμε στην περίπτωση που ο πομπός είναι το κινητό τηλέφωνο και μελετάμε τις επιπτώσεις τους.

3.2.3 Υπολογισμός του SAR μέσω της απορροφούμενης ισχύος

Για να βρεθεί η απορροφώμενη ισχύς πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η ισχύς ακτινοβολίας που διαχέεται στον ιστό (2.5), η οποία με την σειρά της για να υπολογιστεί πρέπει να βρεθεί η προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος (2.2) και η εκτεθειμένη περιοχή του σώματος (A). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εφόσον το SAR μετριέται είτε σε κύβους ενός είτε δέκα γραμμαρίων, θα πρέπει να υπολογιστεί η εκτεθειμένη περιοχή σώματος σε κύβο ενός γραμμαρίου και δέκα γραμμαρίων αντίστοιχα. Θα γίνουν μετρήσεις στα δύο πιο σημαντικά σημεία του σώματος, το κεφάλι και το δέρμα. Στο κεφάλι θα έχουμε μάζα πυκνότητας 1.04 g/cm^3 και στο δέρμα θα έχουμε 1.3 g/cm^3 [172]. Άρα μέσω της (3.1) εύκολα μπορούμε να βρούμε την επιφάνεια του κύβου. Συγκεκριμένα για:

- Μάζα του κύβου μέσα στο ανθρώπινο κεφάλι: 10 γραμμάρια
- Πυκνότητα εγκεφαλικού ιστού: $1,3 \text{ g/cm}^3$

$$Volume = \frac{Mass}{Density} \quad (3.1)$$

$$Volume = \frac{10g}{1.3g/cm^3} = 7.693cm^3 \quad (3.2)$$

Μέρος σώματος	Μάζα κύβου	1 g	10 g
	Κεφάλι		0.975 cm ²
Δέρμα		0.8435 cm ²	3.9221 cm ²

Πίνακας 3.2: Επιφάνεια κύβου (cm²).

Γενιά	Ισχύς	Κέρδος
2 G	2 W	-6 dbi
3 G	1 W	-4 dbi
4 G	0.1 W	-2 dbi
5 G	0.1 W	0 dbi
6 G	0.1 W	1 dbi

Πίνακας 3.3: Στοιχεία υπολογισμού SAR.

$$Length = \sqrt[3]{7.6923cm^3} = 1.9804cm \quad (3.3)$$

$$SurfaceAreaofCube \approx (1.9804cm)^2 = 3.9221cm^2 \quad (3.4)$$

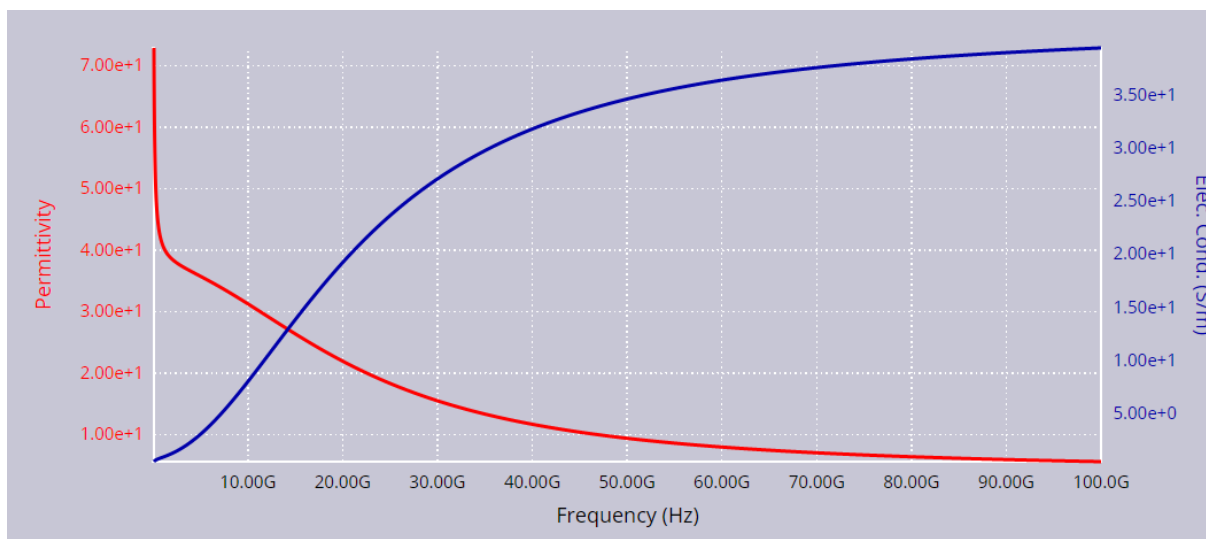
Με τον ίδιο τρόπο διαμορφώνονται και οι υπόλοιπες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων συλλέγονται στον πίνακα 3.2 μέσω των οποίων θα γίνει ο υπολογισμός του SAR στο περιβάλλον της Matlab.

Με όλα τα παραπάνω, μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή του SAR για οποιαδήποτε απόσταση και ισχύ εισόδου του κινητού τηλεφώνου. Θα προσομοιωθούν σενάρια με μεταβαλλόμενη απόσταση και ισχύ εισόδου για την ακτινοβολία στο κεφάλι και στο δέρμα σε όλες τις γενιές επικοινωνιών. Τα χαρακτηριστικά της κάθε γενιάς που θα χρησιμοποιηθούν για κάθε γενιά παρατίθενται στον πίνακα 3.3.

3.2.4 Υπολογισμός του SAR μέσω αγωγιμότητας και πυκνότητας μάζας

Ωστόσο η μέτρησή του SAR με τον παραπάνω τρόπο δεν λαμβάνει υπόψιν την επιρροή που έχει η συχνότητά στην ποσότητα και στον τρόπο διείσδυσης της ακτινοβολίας στο ανθρώπινο σώμα. Η παραπάνω προσέγγιση χρησιμοποιείται συνήθως σε πειραματικά και ερευνητικά περιβάλλοντά, μέσω αισθητήρων και διαφόρων οργάνων και είναι ο τρόπος με τον οποίο οι κατασκευαστές υπολογίζουν τον ρυθμό SAR των συσκευών τους.

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού του SAR είναι μέσω της αγωγιμότητας του ιστού, της πυκνότητας μάζας ιστού (kg/m³), και της έντασης ηλεκτρικού πεδίου (V/m) που διαχέεται. Έστω το σενάριο όπου ένας χρήστης χρησιμοποιεί ένα κινητό τηλέφωνο. Εύκολα μπορεί να βρεθεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε οποιαδήποτε ισχύ του τηλεφώνου (0.0001-2 W) και απόστασή μέσω του τύπου (2.6). Η πυκνότητα μάζας αλλάζει μόνο από τον τύπο του ιστού που τίθεται σε εκπομπή. Αρχικά θα πάρουμε την περίπτωση του δέρματος. Στο δέρμα παρατηρείται πυκνότητα μάζας ίση με 1200kg/m³. Όπως αναφέρθηκε στο 2.3.2, η αγωγιμότητα εξαρτάται από την συχνότητα και μπορεί να υπολογιστεί από το μοντέλο διασποράς Γκάμπριελ (2.9). Μέσω αυτού μπορεί να υπολογιστεί η αγωγιμότητά του δέρματος. Στο 3.1 παριστάνεται η αγωγιμότητά και η επιτρεπτικότητα του ανθρώπινου δέρματος σε συχνότητές από 100 MHz έως 100



Σχήμα 3.1: Αγωγιμότητα και επιτρεπτικότητα του δέρματος σε συχνότητες από 100 MHz μέχρι 100 GHz [158].

Στοιχείο	Συχνότητα			
	850 MHz	900 MHz	1800 MHz	1900 MHz
Πυκνότητα μάζας	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-2	0.01-2	0.01-2	0.01-2
Αγωγιμότητα	0.85 (S/m)	0.867 (S/m)	1.18 (S/m)	1.22 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος κεραίας (dbi)	-6 dbi	-6 dbi	-6 dbi	-6 dbi

Πίνακας 3.4: Στοιχεία συχνοτήτων 2G για τον υπολογισμό του SAR στο δέρμα.

GHz.

Τα κινητά τηλέφωνα (μέχρι και σήμερα) χρησιμοποιούν δίκτυα 2_{ης} γενιάς όταν μεταγενέστερες γενιές δεν είναι διαθέσιμες. Σε μια τέτοια περίπτωση μάλιστα είναι πολύ πιθανό να γίνεται χρήση της πλήρους ισχύος του κινητού τηλεφώνου καθώς για να μην βρίσκει κάλυψη των δικτύων των επόμενων γενιών (4G, 5G), ο χρήστης πιθανώς βρίσκεται σε απομονωμένη περιοχή και η κινητή συσκευή δυσκολεύεται στην εύρεσή σήματος. Συχνότητες του 2G είναι η 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz. Η απόστασή του ανθρωπίνου δέρματος και της κεραίας είναι το λιγότερο 2 εκατοστά λόγω της απόστασής της κεραίας από το εξωτερικό του κινητού τηλεφώνου και μέγιστο 6 εκατοστά καθώς το SAR δεν μπορεί να μετρήσει μεγαλύτερες αποστάσεις [28]. Η αγωγιμότητά μπορεί να υπολογιστεί γραφικά για κάθε συχνότητα. Συγκεκριμένα στα 850 MHz είναι 0.85 Siemens/m, στα 900 MHz είναι 0.867 Siemens/m, στα 1800 MHz είναι 1.18 Siemens/m και στα 1900 MHz είναι 1.22 Siemens/m. Η μέγιστη ισχύς που συνήθως εκπέμπει ένα τυπικό σύγχρονο κινητό που χρησιμοποιεί τα δίκτυα 2G είναι 30dbm (1 Watt). Ωστόσο παλαιότερα τηλέφωνα δικτύου 2G έφταναν μέχρι και τα 33 dbm (2 Watt), λόγω έλλειψης ενεργειακής αποδοτικότητας και περιορισμένης κατευθυντικότητας κεραίας. Η έντασή του ηλεκτρικού πεδίου εφόσον αλλάζει εν συνάρτησή της απόστασής άλλα και της ισχύος εξόδου, θα υπολογίζεται απευθείας στην προσομοίωση λήψης του SAR. Το κέρδος κεραίας ποικίλλει ανά συσκευή, ωστόσο μια τυπική περίπτωση ενός 2G τηλεφώνου της αγοράς κυμαίνονταν στα -6dbi. Όλα τα παραπάνω συλλέχθηκαν στον πίνακα 3.4.

Στοιχείο	Συχνότητα			
	1700 MHz	1900 MHz	2100 MHz	3500 MHz
Πυκνότητα μάζας	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-1	0.01-1	0.01-1	0.01-1
Αγωγιμότητα	1.15 (S/m)	1.22 (S/m)	1.31 (S/m)	2.02 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6cm
Κέρδος Κεραίας	-4 dbi	-4 dbi	-4 dbi	-4 dbi

Πίνακας 3.5: Στοιχεία συχνοτήτων 3G για τον υπολογισμό του SAR στο δέρμα.

Στοιχείο	Συχνότητα				
	1600 MHz	2600 MHz	3500 MHz	5200 MHz	5800 MHz
Πυκνότητα μάζας	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	1200 kg	1200 kg
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	1.11 (S/m)	1.54 (S/m)	2.02 (S/m)	3.22 (S/m)	3.72 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	-2 dbi	-2 dbi	-2 dbi	-2 dbi	-2 dbi

Πίνακας 3.6: Στοιχεία συχνοτήτων 4G για τον υπολογισμό του SAR στο δέρμα.

Από τον πίνακά 3.4 είναι προφανές ότι ο παράγοντας που αλλάζει ανάλογα την συχνότητά και άρα και ο παράγοντας που θα μας δίνει διαφορετικό SAR για ίδια απόστασή και κέρδος κεραίας και ισχύ εξόδου θα είναι η αγωγιμότητα. Στο περιβάλλον προσομοίωσής της Matlab θα προσομοιωθούν οι τέσσερις αυτές συχνότητες αρχικά με σταθερή απόσταση 2 cm και αυξανόμενη ισχύ από 0 Watt μέχρι την μέγιστη δυνατή ισχύ δηλαδή τα 2 Watt. Αν κάποια συχνότητα του 2G ξεπεράσει το ανώτατο όριο SAR της FCC για το δέρμα (4W/kg) τότε θα προσημειωθεί ξανά με σταθερή μέγιστη ισχύ και μεταβαλλόμενη απόσταση ώστε να υπολογιστεί η ελάχιστη δυνατή απόσταση που θα πρέπει να έχει ο χρήστης από το κινητό τηλέφωνό του, για μέγιστη ισχύ εισόδου, ώστε να μην ξεπερνιέται το όριο SAR. Θα παρθεί η ίδια προσέγγισή για κάθε μέρος του σώματος και για κάθε γενιά κινητής τηλεφωνίας.

Η τρίτη γενία μπορεί να έχει σχεδόν ολικώς καταργηθεί, ωστόσο οι συχνότητές της είναι ακόμα σε χρήση από τις επόμενες γενιές. Επιπρόσθετα θα ήταν κάλο να γίνει μια ανασκοπιστική ανάλυσή της ακτινοβολίας των κινητών 3G. Οι επικρατέστερες συχνότητές του 3G είναι οι 1700 MHz, 1900 MHz και 2100 MHz [173]. Από το 3.1 έχουμε 1.15, 1.122 και 1.31 Siemens στα 1700, 1900 και 2100 MHz αντίστοιχα. Το τυπικό κέρδος κεραίας βελτιώθηκε στα -4 dbi ενώ η μέγιστη ισχύς ενός τυπικού τηλεφώνου 3G περιορίστηκε στα 0 dBW (1 W). Τα στοιχεία του 3G συλλέχθηκαν στον πίνακά 3.5 και εκτελέστηκε πανομοιότυπη διαδικασία με το 2G.

Επικρατέστερες συχνότητες του 4G είναι οι 1600 MHz, 2600 MHz, 3500 MHz, 5200 MHz, 5800 MHz [174] με πυκνότητες ισχύος 1.11, 1.54, 2.02, 3.22, και 3.72 (S/m) αντίστοιχα. Όταν ακόμα αναπτύσσονταν το 4G, σκοπίμως επιλέχθηκαν αυτές οι συχνότητες ώστε να είναι μέσα στα όρια του ελεγχόμενου SAR. Τα κινητά τηλέφωνα 4ης γενιάς έχουν μέγιστη ισχύ εισόδου το 0.1 Watt (+20dbm). Η αγωγιμότητά της κάθε συχνότητας για το δέρμα φαίνεται στον πίνακα 3.6.

Στην πέμπτη γενιά βρισκόμαστε αντιμέτωποι με το εξής πρόβλημα όσον αφορά την συχνότητα. Καθώς το 5G με τα mmWaves ξεπερνάει την οριακή συχνότητα 10 GHz για την ICCRIP (6 GHz για την FCC) για την οποία έχουν οριοθετηθεί οι κανονισμοί και τα όρια του SAR, δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι

Στοιχείο \ Συχνότητα	4.5 GHz	26 GHz	28 GHz	39 GHz
Πυκνότητα μάζας	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	2.69 (S/m)	24.4 (S/m)	25.8 (S/m)	31 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	0 dbi	0 dbi	0 dbi	0 dbi

Πίνακας 3.7: Στοιχεία συχνοτήτων 5G για τον υπολογισμό του SAR στο δέρμα.

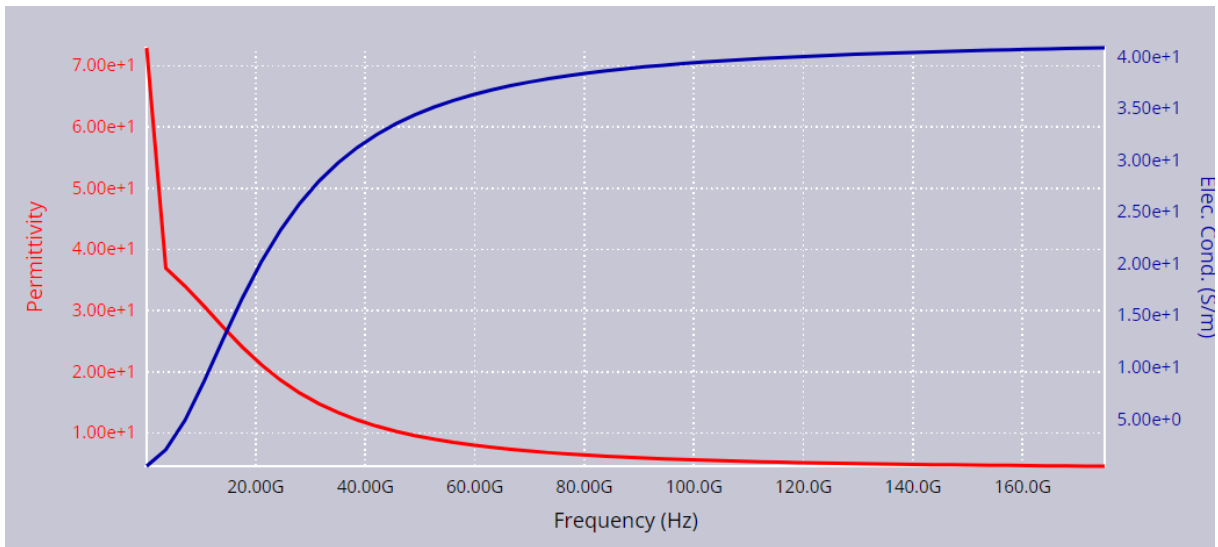
Στοιχείο \ Συχνότητα	95 GHz	114 GHz	148 GHz	164 GHz	174 GHz
Πυκνότητα μάζας	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	1200 kg	1200 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	39.2 (S/m)	39.9 (S/m)	40.6 (S/m)	40.8 (S/m)	40.9 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	0 dbi	0 dbi	0 dbi	0 dbi	0 dbi

Πίνακας 3.8: Στοιχεία συχνοτήτων 6G για τον υπολογισμό του SAR στο δέρμα.

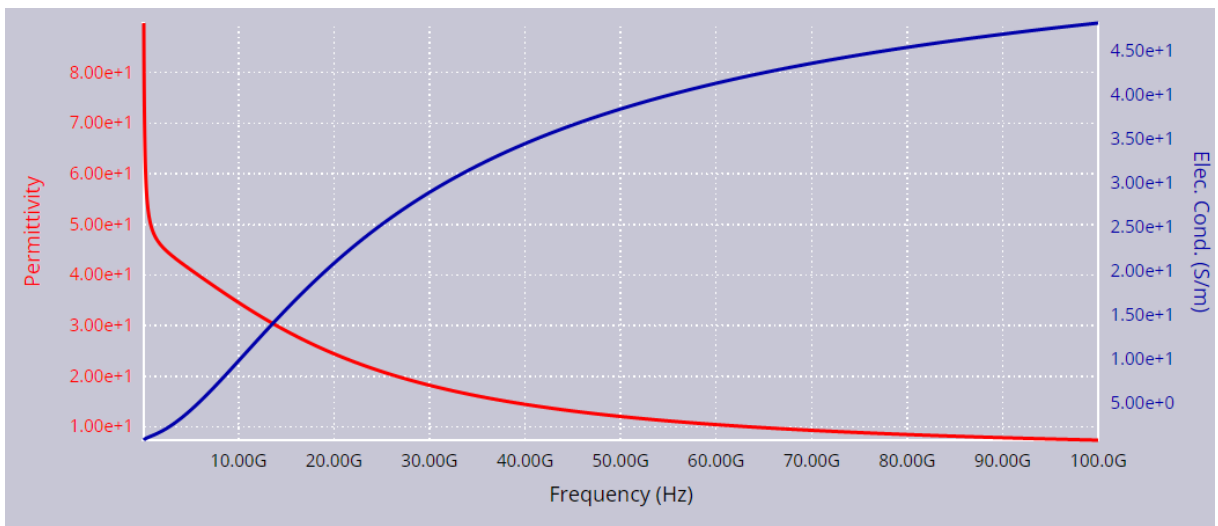
για την ασφάλεια και τις πιθανές επιπτώσεις της ακτινοβολίας, ακόμα και αν το SAR είναι μέσα στα επιθυμητά όρια. Βέβαια, εν καιρό τα όρια στα οποία το SAR έχει ισχύ μένουν να διευρυνθούν αφού άλλωστε τα ήδη υπάρχον όρια οριοθετήθηκαν για το εύρος ζώνης των τότε ενεργών γενιών επικοινωνίας. Οπότε είναι θεμιτό να γίνει ο υπολογισμός του SAR και εκτός των ορίων της ICCRIP και της FCC ακόμα και αν δεν έχει ουσιαστική σημασία την προκειμένη στιγμή. Στο 5G η μέση κεραία βελτιώθηκε ακόμα παραπάνω με μέγιστη ισχύ να παραμένει 0.1 W αλλά με σημαντική βελτίωση του μέσου κέρδους κεραίας. Για το 5G θα χρησιμοποιηθεί κλίμακά τάξεως GHz. Οι δημοφιλέστερες συχνότητες που έφερε το 5G είναι οι εξής: 26 GHz, 28 GHz και 39 GHz [175], για τις οποίες θα έχουμε αγωγιμότητα στο δέρμα ίση με 2.69, 24.4, 25.8 και 31 (S/m) αντίστοιχα τα οποία βρίσκονται στον πίνακα 3.7.

Καθώς δεν είναι ακόμα καθορισμένες οι ακριβείς συχνότητες που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα έκτης γενιάς θα παρθούν ενδεικτικές συχνότητες από το διαθέσιμο φάσμα για τηλεπικοινωνίες από το σχήμα 1.20. Συγκεκριμένα θα παρθούν οι συχνότητες 95 GHz, 114 GHz, 148 GHz, 164 GHz και 174 GHz. Για τις παραπάνω συχνότητες για να μετρηθεί η αγωγιμότητά υπάρχει ανάγκη διεύρυνσης της προσομοίωσης της αγωγιμότητας στα 175 GHz όπως παριστάνεται στο σχήμα 3.2. Η μέγιστη ισχύς εισόδου της κεραίας των κινητών που θα χρησιμοποιούν συχνότητες 6 μείνεται να είναι 0.1 Watt, ακριβώς όπως και το 4G και 5G, αν όχι μικρότερη. Το κέρδος κεραίας και πάλι θα ποικίλλει ανά συσκευή αλλά -2 dbi θα είναι το κατώτατο όριο. Αξιοσημείωτη παρατήρησή αποτελεί το γεγονός πως ο ραγδαίος ρυθμός αύξησης της αγωγιμότητας μειώνεται δραστικά μετά τα 100 GHz. Ωστόσο το κατά ποσό παριστάνει σωστά την αγωγιμότητά το μοντέλο Gabriel πέρα τα 100 GHz αποτελεί αυτεξούσιο θέμα σύγκρισης και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση. Για τις παραπάνω συχνότητες η αγωγιμότητα συλλέχθηκε στον πίνακα 3.8.

Στην περίπτωση όπου ο χρήστης μιλάει στο τηλέφωνο έχοντας το ακουστικό στο αυτί του η μέτρησή του SAR του εγκεφάλου είναι απαραίτητη. Για να μετρηθεί ο δείκτης SAR του εγκεφάλου θα πρέπει πρώτα να μετρηθεί η αγωγιμότητά του ιστού του εγκεφάλου. Ο εγκέφαλος διαχωρίζεται σε 2 διαφορετικές στρώσεις ιστού, την λευκή ύλη (white matter) και την γκρι ύλη (gray matter). Η λευκή ύλη βρίσκεται



Σχήμα 3.2: Αγωγιμότητα και επιτρεπτικότητα του δέρματος σε συχνότητες 100 MHz με 175 GHz [158].



Σχήμα 3.3: Αγωγιμότητα και η επιτρεπτικότητα του εγκεφάλου σε συχνότητες 100 MHz με 100 GHz [158].

στο εσωτερικό του εγκεφάλου και η γκρι ύλη περιμετρικά. Εφόσον η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συσσωρεύεται στο περίβλημα μιας επιφάνειάς και με την προϋπόθεσή πως η αγωγιμότητά της γκρι ύλης είναι μεγαλύτερη σε ίδιες συχνότητες σε σχέση με την λευκή ύλη, ο υπολογισμός της αγωγιμότητας και κατά συνέπεια του SAR στην γκρι ύλη του εγκεφάλου υπερκαλύπτει το παραπάνω σενάριο. Στο σχήμα 3.3 παριστάνεται η αγωγιμότητα της γκρι ύλης του εγκεφάλου ανά την συχνότητα.

Για την κάθε μπάντα συχνοτήτων της κάθε γενιάς θα υπολογιστούν ξανά (με γραφικό τρόπο) οι αγωγιμότητες και θα συλλεχθούν σε σχετικούς πίνακες μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία. Η πυκνότητα μάζας είναι λίγο μικρότερη από ότι στο δέρμα (1030 kg/m^3). Από τους υπολογισμούς της αγωγιμότητας των συχνοτήτων του 2G ακόμα, είναι φανερό ότι η αγωγιμότητά του εγκεφάλου θα είναι σχετικά μεγαλύτερη σε σύγκριση με το δέρμα σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Η διάφορα αυτή διογκώνεται με την αύξησή της συχνότητας. Άρα σίγουρα το SAR θα είναι υψηλότερο. Θα προσομοιωθούν οι τιμές των πινάκων 3.9-3.13 αρχικά για μεταβαλλόμενη ισχύ από 0 Watt μέχρι το μέγιστο της κάθε γενιάς και στη συνέχεια

Στοιχείο	Συχνότητα			
	850 MHz	900 MHz	1800 MHz	1900 MHz
Πυκνότητά μάζας	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-2	0.01-2	0.01-2	0.01-2
Αγωγιμότητα	0.921 (S/m)	0.942 (S/m)	1.39 (S/m)	1.45 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	-6 dbi	-6 dbi	-6 dbi	-6 dbi

Πίνακας 3.9: Στοιχεία συχνοτήτων 2G για τον υπολογισμό του SAR στον εγκέφαλο.

Στοιχείο	Συχνότητα			
	1700 MHz	1900 MHz	2100 MHz	3500 MHz
Πυκνότητά μάζας	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-2	0.01-2	0.01-2 W	0.01-2
Αγωγιμότητα	1.33 (S/m)	1.45 (S/m)	1.57 (S/m)	2.64 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6cm
Κέρδος Κεραίας	-4 dbi	-4 dbi	-4 dbi	-4 dbi

Πίνακας 3.10: Στοιχεία συχνοτήτων 3G για τον υπολογισμό του SAR στον εγκέφαλο.

θα προσημειωθεί το ίδιο για μεταβαλλόμενη απόσταση σε όποιες περιπτώσεις η τιμή του SAR ξεπεράσει το ανώτατο όριο, για να υπολογιστεί για άλλη μια φορά η ελάχιστη δυνατή απόσταση για μέγιστη ισχύ εξόδου της συσκευής.

Στην συνέχεια θα εξεταστεί η τιμή του SAR στα οστά. Η πυκνότητα μάζας κατά μέσο όρο 1700 kg/m³. Όπως φαίνεται στις τιμές των πινάκων που πάρθηκαν από το 3.4, η ηλεκτρική αγωγιμότητά είναι σημαντικά μικρότερη στα κοκάλια σε σύγκριση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Αυτό είναι φυσικό καθώς τα οστά δεν είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Το παραπάνω σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη πυκνότητα μάζας των οστών θα έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της τιμής του SAR πράγμα που θα σημαίνει πως τα οστά δεν θα αποτελούν ευαίσθητο σημείο του ανθρωπίνου σώματος όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Εντούτοις, θα προσομοιωθούν οι τιμές του SAR για μεταβαλλόμενη ισχύ και απόσταση 2 cm ώστε να συγκριθούν με τα υπόλοιπα μέρη του σώματος.

Ένα ακόμα φλέγον κομμάτι του ανθρωπίνου σώματος που είναι ιστορικά επιρρεπή στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι τα μάτια. Πρώτη γραμμή “άμυνας” του ματιού και ίσως και η σημαντικότερη, από ηλεκτρομαγνητικούς κίνδυνους και μη, είναι ο κερατοειδής χιτώνας (Cornea). Με την βοήθεια του σχήματος 3.5, όπου παριστάνεται η αγωγιμότητά στον κερατοειδή κοιλώνα με την μεταβολή της συχνότητας, υπολογίστηκε γραφικά η αγωγιμότητα σε κάθε περίπτωση τα οποία συγκεντρώθηκαν στους

Στοιχείο	Συχνότητα				
	1600 MHz	2600 MHz	3500 MHz	5200 MHz	5800 MHz
Πυκνότητά μάζας	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030 kg	1030 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	1.28 (S/m)	1.91 (S/m)	2.64 (S/m)	4.32 (S/m)	4.99(S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	-2 dbi	-2 dbi	-2 dbi	-2 dbi	-2dbi

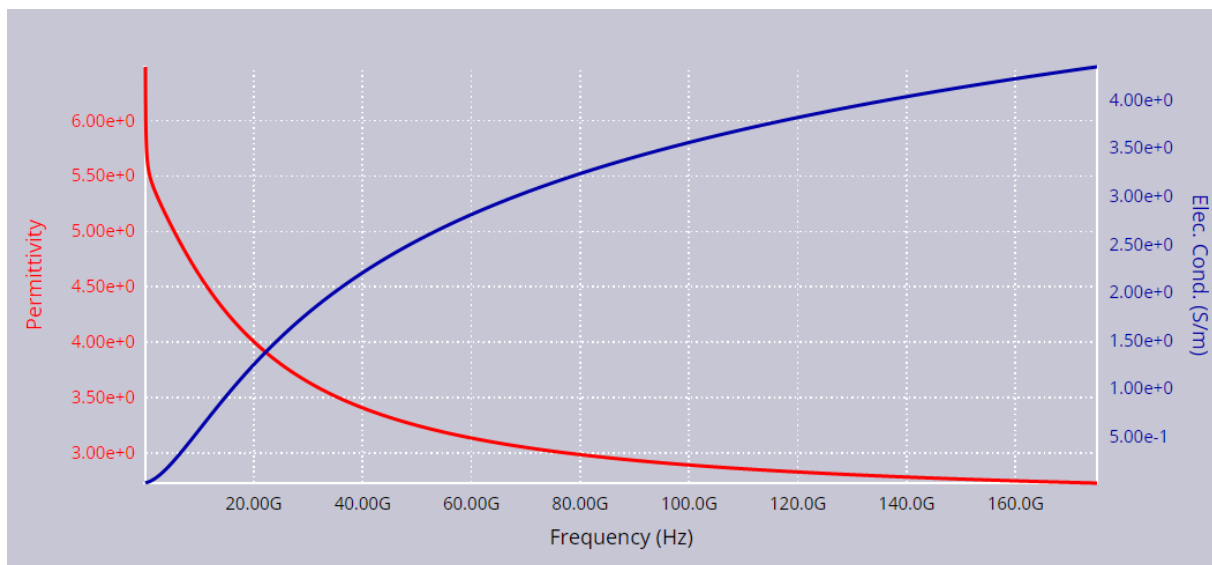
Πίνακας 3.11: Στοιχεία συχνοτήτων 4G για τον υπολογισμό του SAR στον εγκέφαλο.

Στοιχείο \ Συχνότητα	4.5GHz	26 GHz	28 GHz	39 GHz
Πυκνότητά μάζας	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	3.58 (S/m)	28.6 (S/m)	30.2 (S/m)	37.4 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	0 dbi	0 dbi	0 dbi	0 dbi

Πίνακας 3.12: Στοιχεία συχνοτήτων 5G για τον υπολογισμό του SAR στον εγκέφαλο.

Στοιχείο \ Συχνότητα	95 GHz	114 GHz	148 GHz	164 GHz	174 GHz
Πυκνότητά μάζας	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³	1030 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	52.6 (S/m)	54.9 (S/m)	57.9 (S/m)	59 (S/m)	59.8 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	0 dbi	0 dbi	0 dbi	0 dbi	0 dbi

Πίνακας 3.13: Στοιχεία συχνοτήτων 6G για τον υπολογισμό του SAR στον εγκέφαλο.



Σχήμα 3.4: Αγωγιμότητά και η επιτρεπτικότητα των οστών σε συχνότητες 100 MHz με 175 GHz [158].

Στοιχείο \ Συχνότητα	850 MHz	900 MHz	1800 MHz	1900 MHz
Πυκνότητά μάζας	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-2	0.01-2	0.01-2	0.01-2
Αγωγιμότητα	0.0395 (S/m)	0.0407 (S/m)	0.0695 (S/m)	0.0728 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	-6 dbi	-6 dbi	-6 dbi	-6 dbi

Πίνακας 3.14: Στοιχεία συχνοτήτων 2G για τον υπολογισμό του SAR στα οστά.

Στοιχείο \ Συχνότητα	1700 MHz	1900 MHz	2100 MHz	3500 MHz
Πυκνότητα μάζας	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1030 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-2	0.01-2	0.01-2 W	0.01-2 W
Αγωγιμότητα	0.0653 (S/m)	0.0728 (S/m)	0.0807 (S/m)	0.147 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	-4 dBi	-4 dBi	-4 dBi	-4 dBi

Πίνακας 3.15: Στοιχεία συχνοτήτων 3G για τον υπολογισμό του SAR στα οστά.

Στοιχείο \ Συχνότητα	1600 MHz	2600 MHz	3500 MHz	5200 MHz	5800 MHz
Πυκνότητα μάζας	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	0.0618 (S/m)	0.102(S/m)	0.147 (S/m)	0.24 (S/m)	0.285 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	-2 dBi	-2 dBi	-2 dBi	-2 dBi	-2dBi

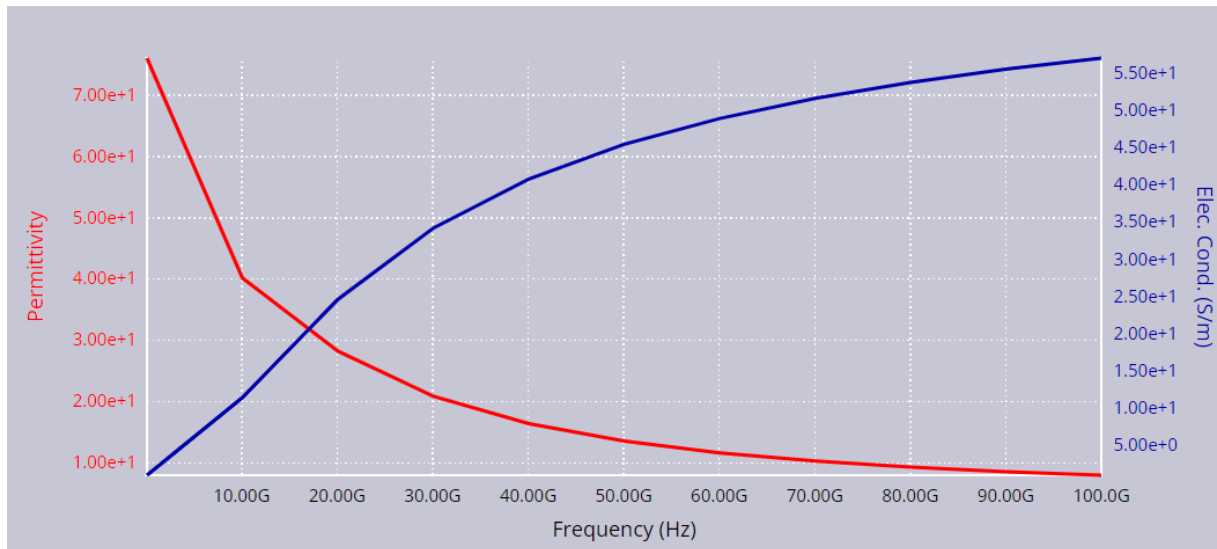
Πίνακας 3.16: Στοιχεία συχνοτήτων 4G για τον υπολογισμό του SAR στα οστά.

Στοιχείο \ Συχνότητα	4.5 GHz	26 GHz	28 GHz	39 GHz
Πυκνότητα μάζας	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	0.204 (S/m)	1.59 (S/m)	1.69 (S/m)	2.17 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	0 dBi	0 dBi	0 dBi	0 dBi

Πίνακας 3.17: Στοιχεία συχνοτήτων 5G για τον υπολογισμό του SAR στα οστά.

Στοιχείο \ Συχνότητα	95 GHz	114 GHz	148 GHz	164 GHz	174 GHz
Πυκνότητα μάζας	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1200/m kg	1700 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	3.49 (S/m)	3.75 (S/m)	4.11 (S/m)	4.26 (S/m)	4.34 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	0 dBi	0 dBi	0 dBi	0 dBi	0 dBi

Πίνακας 3.18: Στοιχεία συχνοτήτων 6G για τον υπολογισμό του SAR στα οστά.



Σχήμα 3.5: Αγωγιμότητα και η επιτρεπτικότητα του κερατοειδή σε συχνότητες 100 MHz με 100 GHz [158].

Στοιχείο	Συχνότητα			
	850 MHz	900 MHz	1800 MHz	1900 MHz
Πυκνότητά μάζας	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-2	0.01-2	0.01-2	0.01-2
Αγωγιμότητα	1.37 (S/m)	1.39 (S/m)	1.86 (S/m)	1.92 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	-6 dbi	-6 dbi	-6 dbi	-6 dbi

Πίνακας 3.19: Στοιχεία συχνοτήτων 2G για τον υπολογισμό του SAR στον κερατοειδή του ματιού.

πίνακες 3.35-3.40 και μέσω των οποίων θα προσομοιωθεί η τιμή του SAR για τα μάτια.

3.2.5 Πυκνότητα ισχύος για μικρές αποστάσεις

Σύμφωνα με τον πίνακα 2.8 πυκνότητα ισχύος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ορθά για να μετρήσει την ακτινοβολία σε συγκεκριμένες οριοθετημένες αποστάσεις. Σε συχνότητες πάνω από 6 GHz και αποστάσεις πάνω από 6 cm μπορεί εύκολα να γίνει εκτενής μέτρηση του P_D . Ωστόσο με χρήση μοντελοποίησης το P_D μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αποστάσεις μικρότερες από 6 cm. Ας υποθέσουμε ότι ένα άτομο χρησιμοποιεί το κινητό τηλέφωνο του τοποθετώντας το στο αυτί του για να μιλήσει. Το κινητό τηλέφωνο θα έχει σε αυτήν την περίπτωση άμεση επαφή με το αυτί και κατ' επέκταση και με το

Στοιχείο	Συχνότητα			
	1700 MHz	1900 MHz	2100 MHz	3500 MHz
Πυκνότητά μάζας	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1030 kg ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-2	0.01-2	0.01-2 W	0.01-2 W
Αγωγιμότητα	1.8 (S/m)	1.92 (S/m)	2.05 (S/m)	3.17 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	-4 dbi	-4 dbi	-4 dbi	-4 dbi

Πίνακας 3.20: Στοιχεία συχνοτήτων 3G για τον υπολογισμό του SAR στον κερατοειδή του ματιού.

Στοιχείο \ Συχνότητα	1600 MHz	2600 MHz	3500 MHz	5200 MHz	5800 MHz
Πυκνότητα μάζας	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	1.74 (S/m)	2.41(S/m)	3.17 (S/m)	4.95 (S/m)	5.66 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	-2 dbi	-2 dbi	-2 dbi	-2 dbi	-2dbi

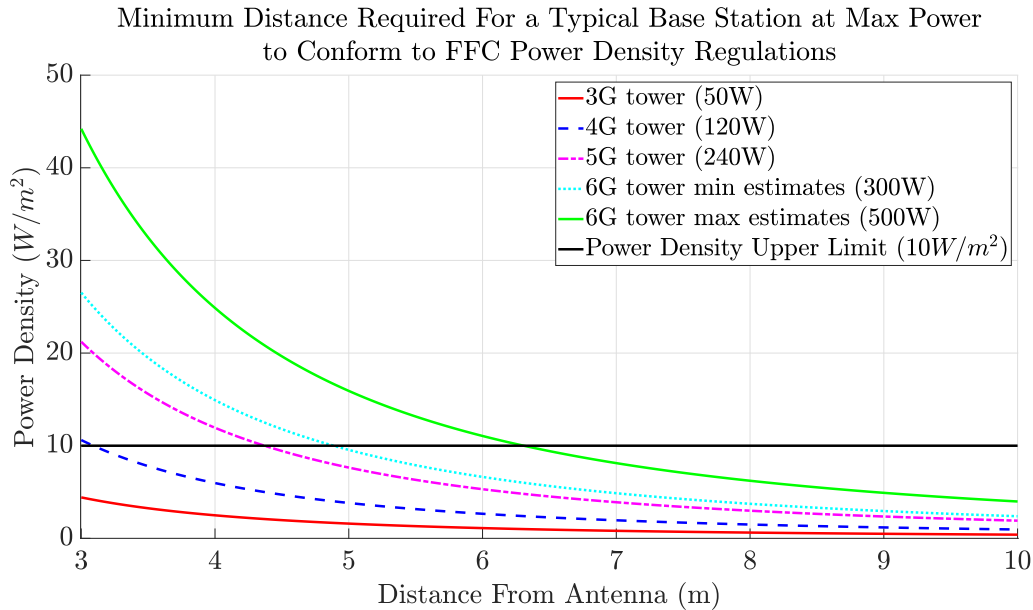
Πίνακας 3.21: Στοιχεία συχνοτήτων 4G για τον υπολογισμό του SAR στον κερατοειδή του ματιού.

Στοιχείο \ Συχνότητα	4.5 GHz	26 GHz	28 GHz	39 GHz
Πυκνότητα μάζας	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	4.17 (S/m)	30.8 (S/m)	32.5 (S/m)	40.2 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	0 dbi	0 dbi	0 dbi	0 dbi

Πίνακας 3.22: Στοιχεία συχνοτήτων 5G για τον υπολογισμό του SAR στον κερατοειδή του ματιού.

Στοιχείο \ Συχνότητα	95 GHz	114 GHz	148 GHz	164 GHz	174 GHz
Πυκνότητα μάζας	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1700 kg/m ³	1200/m ³ kg	1700 kg/m ³
Ισχύς εισόδου (W)	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1	0.01-0.1
Αγωγιμότητα	56.31 (S/m)	58.8 (S/m)	62 (S/m)	63.2 (S/m)	63.8 (S/m)
Απόσταση	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm	2-6 cm
Κέρδος Κεραίας	0 dbi	0 dbi	0 dbi	0 dbi	0 dbi

Πίνακας 3.23: Στοιχεία συχνοτήτων 6G για τον υπολογισμό του SAR στον κερατοειδή του μάτιου



Σχήμα 3.6: Πυκνότητα Ισχύος μακρινής ζώνης ορίων FCC.

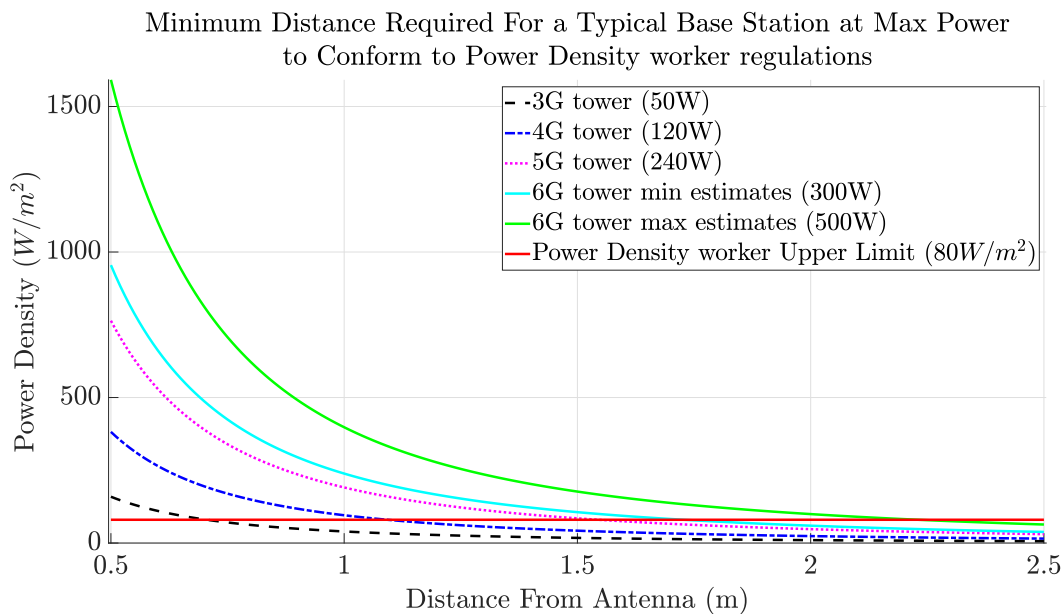
κεφάλι του ατόμου. Ένα κινητό τηλέφωνο, ανάλογα με την απόσταση του από τον σταθμό βάσης και το κέρδος του, εκπέμπει από 0.01 W μέχρι και 2 W, σε περιοχές που το σήμα είναι ιδιαίτερα ασθενές, σχεδόν ανύπαρκτο. Δεδομένου ότι το όριο P_D της ICNIRP είναι 10 W/m^2 μπορούμε να δούμε σε μια τιμή της ισχύος εκπομπής του κινητού υπάρχει πρόβλημα στην ελάχιστη απόσταση 2 cm από το ανθρωπινό σώμα ανάλογα με την γενιά της κινητής συσκευής τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον πίνακα 3.3. Οι μετρήσεις θα γίνουν για τα όρια της FFC και ICMP καθώς και για τα προληπτικά όρια της Ρωσίας και θα είναι οι πιο καθοριστικές και ορθές όσον αφορά την ασφάλειά και την επικινδυνότητα των κινητών τηλεφώνων που εκπέμπουν σε συχνότητες 5G καθώς και τις μελλοντικές που θα εκπέμπουν σε συχνότητες 6G.

3.3 Αποτελέσματα

3.3.1 Πυκνότητα ισχύος μακρινής ζώνης

Όπως φαίνεται και στην γραφική παράστασή 3.6, στην περίπτωση της κεραίας 3G η πυκνότητα ισχύος αγγίζει τα 10 W/m^2 από την στιγμή που απόσταση είναι μόλις 2 m. Η 4G κεραία λόγω της αυξημένης ισχύος εκπομπής της φτάνει στο ανώτερο όριο ακτινοβολίας σε απόσταση λίγο παραπάνω από 3 μέτρα και συγκεκριμένα 3.32 m. Η 5G κεραία με την σειρά του φτάνει το όριο που έθεσε η FCC σε απόσταση 4.4 μέτρα από τον δέκτη. Οι ανερχόμενοι 6G σταθμοί βάσης θα φτάνουν (με την θεωρητική μέγιστη ακτινοβολία 300 W) το όριο της μέγιστης πυκνότητας ισχύος σε απόστασή 4,8 μέτρα. Τέλος ακόμα και στην θεωρητική περίπτωση πως οι σταθμοί βάσης 6G θα εκπέμπουν μέχρι και 500 W, παρατηρείτε ότι η πυκνότητα ισχύος φτάνει στα θεσπισμένα ανώτατα όρια σε απόσταση μόλις 6.3 μέτρα. Προφανώς, σε καμία περίπτωση ένας μεγάλος σταθμός βάσης δεν θα βρίσκεται σε τόσο μικρές αποστάσεις από τους ανθρώπους. Ένας μέσος σταθμός βάσης έχει ύψος τουλάχιστον 10 μέτρα άρα, ακόμα και αν κάποιος βρίσκεται ακριβώς κάτω από την κεραία εκπομπής και η βάση στέλνει με την Μεγίστη ισχύ της, η πυκνότητα ισχύος θα είναι σημαντικά μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη. Τα αποτελέσματα της πυκνότητας ισχύος του ανθρώπου σε απόσταση 10 μέτρα από την κάθε κεραία παρατίθενται στο πίνακά

Γενιά κεραίας	P_D σε 10 μέτρα (W/m^2)	Ελάχιστη απόσταση για το όριο P_D
3G	0.42	2 m
4G	0.97	3.09 m
5G	1.9	4.37 m
6G ελάχιστο	2.4	4.85 m
6G μέγιστο	4.43	6.31m

Πίνακας 3.24: Αποτελέσματα P_D για τα όρια FCC για κοινούς ανθρώπους.

Σχήμα 3.7: Πυκνότητα Ισχύος μακρινής ζώνης ορίων FCC για εργαζομένους.

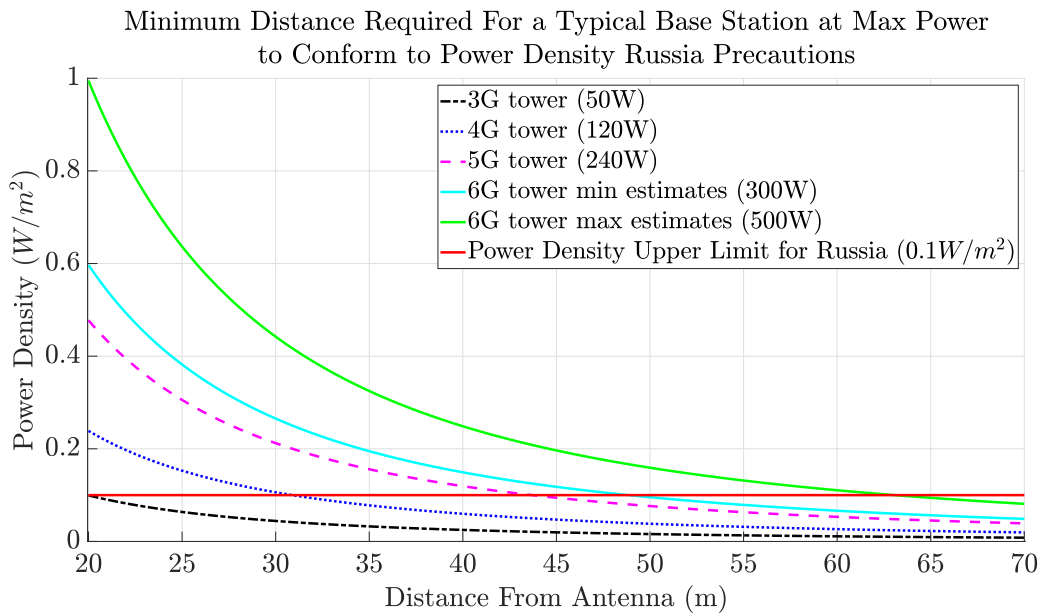
3.24, καθώς και η ελάχιστη απόσταση ώστε κάθε κεραία να συμμορφώνεται με τα όριά της FCC.

Είναι φανερό λοιπόν, πως ακόμα και στην χειρότερη δυνατή περίπτωση δηλαδή στην περίπτωση όπου ο σταθμός βάσης εκπέμπει στο μέγιστο των δυνατοτήτων του με την μικρότερη δυνατή απόσταση, δεν θα παρατηρηθεί πρόβλημά στον άνθρωπο σε καμία γενιά.

Στην γραφική παράσταση 3.7 φαίνονται οι τιμές της συχνότητας ισχύος σε σύγκριση με τα όρια εργατών. Η απόσταση κυμαίνεται από 0.5 μέχρι 2.5 μέτρα. Στον πίνακα 3.25 συγκεντρώνεται η ελάχιστη υπολογισμένη απόσταση που θα πρέπει να έχουν οι εργαζόμενοι από έναν σταθμό βάσης όταν είναι αυτός σε πλήρη λειτουργία ανάλογα με την γενιά του κάθε σταθμού βάσης. Σημειώνεται ότι οι παρενέργειες της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αρχίζουν να εμφανίζονται με μόλις 30 λεπτά συνεχόμενης έκθεσής πράγμα που σημαίνει πως αν οι συνθήκες δεν είναι μακροπρόθεσμα ευνοϊκές για εργασία θα εμφανιστούν πολύ σύντομα προβλήματα. Θα πρέπει κάθε εταιρία και οργανισμός να συμμορφώνεται με αυτά τα όρια. Η ελάχιστη απόσταση των εργαζομένων έχει αυξηθεί ανά τις γενιές (συγκεκριμένα για το 6G 1.72 μέτρα ελάχιστο και 2.2 μέτρα μέγιστο), ωστόσο αυτό δεν θα πρέπει να αποτελεί πρόβλημά, καθώς πέρα από τους ποικίλους τρόπους αυτοσυντήρησης και αυτόματης επίλυσης προβλημάτων που θα διαθέτουν τα δίκτυα 6ης γενιάς, θα υπάρχουν επιπρόσθετα τρόποι απομακρυσμένης συντήρησης και οργάνωσής, καθιστώντας έτσι την ανάγκη μιας τόσο κοντινής συνύπαρξης με τον ενεργό σταθμό βάσης ένα σπάνιο φαινόμενο που σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 30 λεπτά.

Γενιά κεραίας	Ελάχιστη απόσταση
3G	0.66 m
4G	1.09 m
5G	1.53 m
6G ελάχιστο	1.72 m
6G μέγιστο	2.2 m

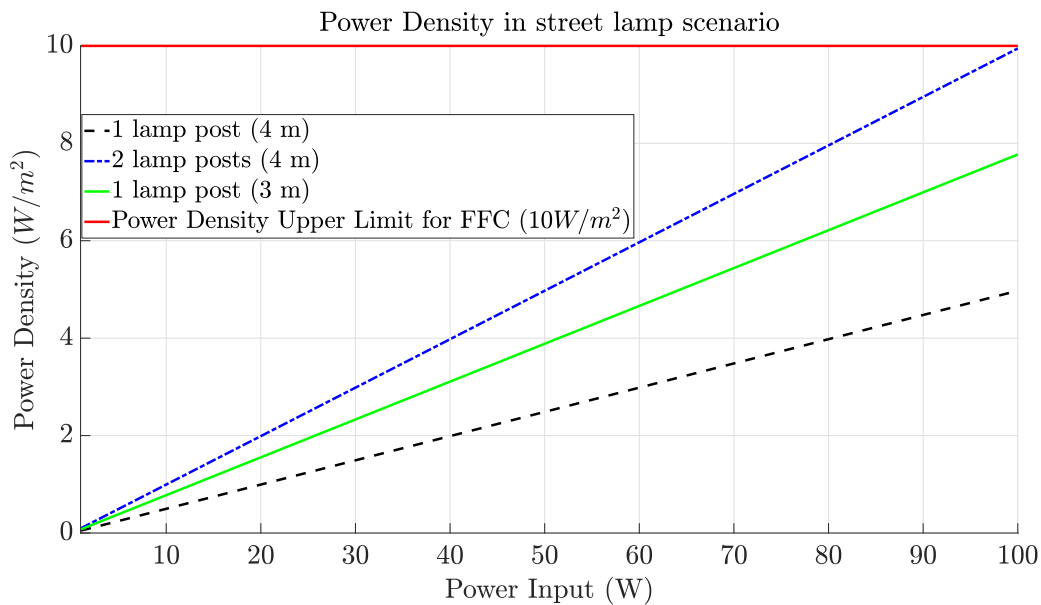
Πίνακας 3.25: Αποτελέσματα P_D για όρια FFC για εργαζόμενους.



Σχήμα 3.8: Πυκνότητα ισχύος με όρια Ρωσίας.

Γενιά κεραιάς	Ελάχιστη απόσταση
3G	20.1 m
4G	30.9 m
5G	43.6 m
6G ελάχιστο	49.2 m
6G μέγιστο	64 m

Πίνακας 3.26: Ελάχιστη απόσταση συμμόρφωσής με όρια Ρωσίας για τον απλό πολίτη.



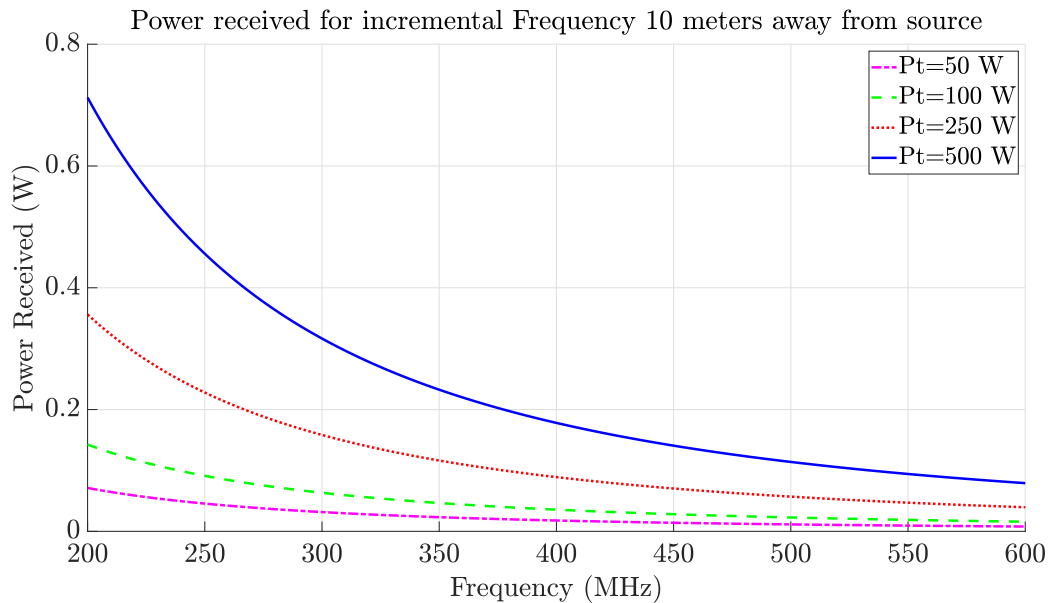
Σχήμα 3.9: Πυκνότητα ισχύος πυλώνα φωτισμού.

Για την περίπτωση των ορίων της Ρωσίας τέθηκε μεγαλύτερο εύρος απόστασης όπως αυτό είναι φυσικό (30 με 70 μέτρα). Η μικρότερη απόσταση για την 3G κεραιά είναι 20.1 μέτρα. Η τυπική 4G κεραιά απαιτεί ελάχιστη απόσταση τα 30.9 μέτρα. Για την 5G είναι στα 43.6 μέτρα, ενώ για την 6G είναι 49.2 μέτρα και 64 μέτρα για πυκνοκατοικημένες και αραιοκατοικημένες περιοχές αντίστοιχα. Είναι φανερό λοιπόν, ότι οι κεραιές μετάδοσης των δικτύων 6G για αυτές τις χώρες θα πρέπει να έχουν μια απόστασή 50 με 63 μέτρα (ανάλογά με την τελική μέγιστη ισχύ των κεραιών 6G) ώστε να συμμορφώνονται με τα ανώτατα θεσπισμένα προληπτικά όρια. Κάτι τέτοιο συμβαίνει ήδη σε χώρες όπως η Ρωσία και η Κίνα στο 5G και στο 4G, όπου και λόγω των αυστηρότερων μέτρων είναι αρκετά δυσκολότερο να τοποθετηθούν σταθμοί βάσης κοντά σε κατοικημένες περιοχές καθιστώντας έτσι δυσκολότερη στην κυψελώτη κάλυψή των χωρών αυτών ιδίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Στην απεικόνιση του σεναρίου με τους πυλώνες φωτισμού έχει χαραχτεί με κόκκινο η περίπτωση όπου

Σενάριο	Ισχύς		
	30W	50W	100W
1 Πυλώνας	1.497 W/m ²	2.487 W/m ²	4.974 W/m ²
2 Πυλώνες	2.994W/m ²	4.984 W/m ²	9.99 W/m ²
Ακριβώς κάτω από 1 πυλώνα	2.331 W/m ²	3.893 W/m ²	7.771 W/m ²

Πίνακας 3.27: Πυκνότητα ισχύος για τα σενάρια με τους πυλώνες φωτισμού.



Σχήμα 3.10: Λαμβανόμενη ισχύς σε συχνότητες MHz με σταθερή απόσταση 10 μέτρων.

το άτομο βρίσκεται ανάμεσα στους 2 πόλους άλλα μόνο ο ένας εκπέμπει. Η περίπτωση που εκπέμπουν και οι δυο πόλοι απεικονίζεται με την μπλε κυματομορφή. Τέλος η πιθανότητα ο χρήστης να βρίσκεται ακριβώς κάτω από έναν πόλο απεικονίζεται στην πράσινη κυματομορφή. Είναι φανερό ότι η διαφορά στο να βρίσκεται ακριβώς κάτω από μια κεραία-πόλο και να βρίσκεται ανάμεσα σε δυο φανοστάτες δεν είναι πολύ μεγάλη. Ακόμα και στο σενάριο όπου ο χρήστης βρίσκεται ανάμεσα στις 2 κεραίες-πόλους οι κεραίες θα πρέπει να εκπέμπουν με ισχύ με 100 Watt έκαστη ώστε να φτάσουν το ανώτατο όριο της FCC.

Με όλα τα παραπάνω εύκολα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ακτινοβολία των κεραιών των σταθμών δεν επιδρά με κάποιον επιβλαβή τρόπο στον άνθρωπο λόγω της μεγάλης απόσβεσης του σήματος που προκαλείται λόγω της απόστασής.

3.3.2 Ακτινοβλούμενη ισχύς

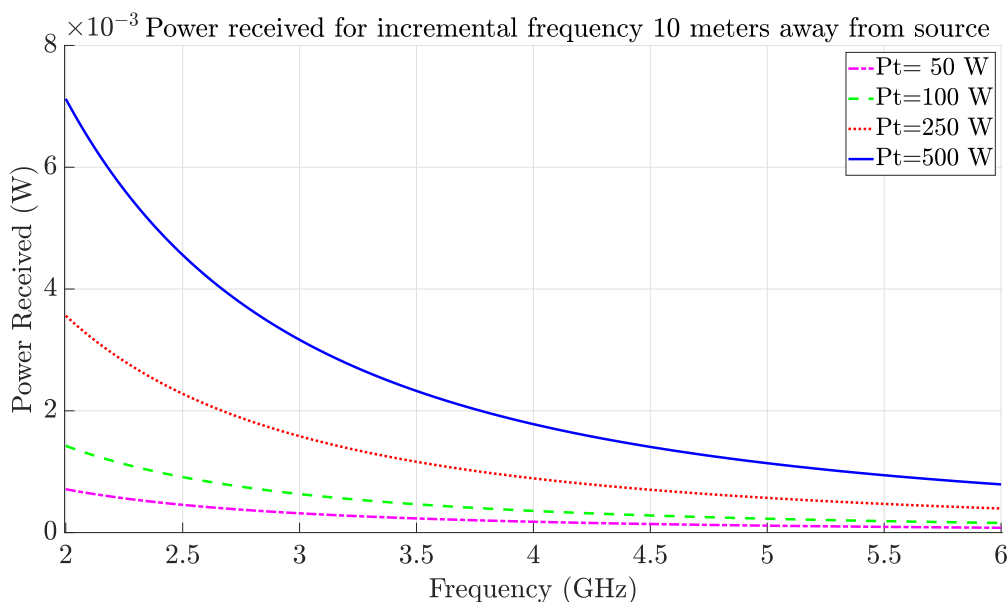
Στις κυματομορφές 3.10,3.11,3.12 βλέπουμε την μεταβολή της ακτινοβλούμενης ισχύος όσο μεταβάλλεται η συχνότητα με σταθερή απόσταση 10 μέτρα. Πέρα από το αναμενόμενο γεγονός ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα μειώνεται η ισχύς, παρατηρείται ότι οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων πηγών ισχύς σταδιακά μειώνονται με την αύξηση της συχνότητας (ποτέ όμως δεν θα ισοσταθμίσουν), καθώς όπως είναι φυσικό η απόσβεση έχει σημαντικότερες επιπτώσεις στα ισχυρότερα σήματα. Αρχικά στον πίνακα 3.28 απεικονίζεται η ακτινοβλούμενη ισχύς σε εύρος συχνότητας 200 με 600 MHz, με βήμα συχνότητας 50 MHz.

Στον πίνακα 3.29 φαίνονται οι διάφορες τιμές της ακτινοβλούμενης ισχύος για συχνότητες από 2 GHz μέχρι 6 GHz με βήμα 0.5 GHz.

Στην περίπτωση όπου οι ίδιες πηγές εκπέμπουν στην ίδια απόστασή d αλλά με αυτήν την φορά εύρος συχνοτήτων 2 με 6 THz, όπως παριστάνεται στο σχήμα 3.12, η διάφορα τάξης μεγέθους της συχνότητας

Συχνότητα	Ισχύς εισόδου			
	50W	100 W	250 W	500 W
200 MHz	72.4 mW	142,8 mW	352 mW	712 mW
250 MHz	45.02 mW	91.5 mW	218 mW	452 mW
300 MHz	32.6 mW	63.7 mW	158 mW	315 mW
350 MHz	23 mW	47 mW	116 mW	232 mW
400 MHz	17.4 mW	35.6 mW	89.5 mW	178 mW
450 MHz	14.5 mW	28.8 mW	70.3 mW	140 mW
500 MHz	11 mW	22.5 mW	57 mW	114 mW
550 MHz	9.4 mW	18.8 mW	47 mW	94.2 mW
600 MHz	8.2 mW	16.5 mW	39.58 mW	80 mW

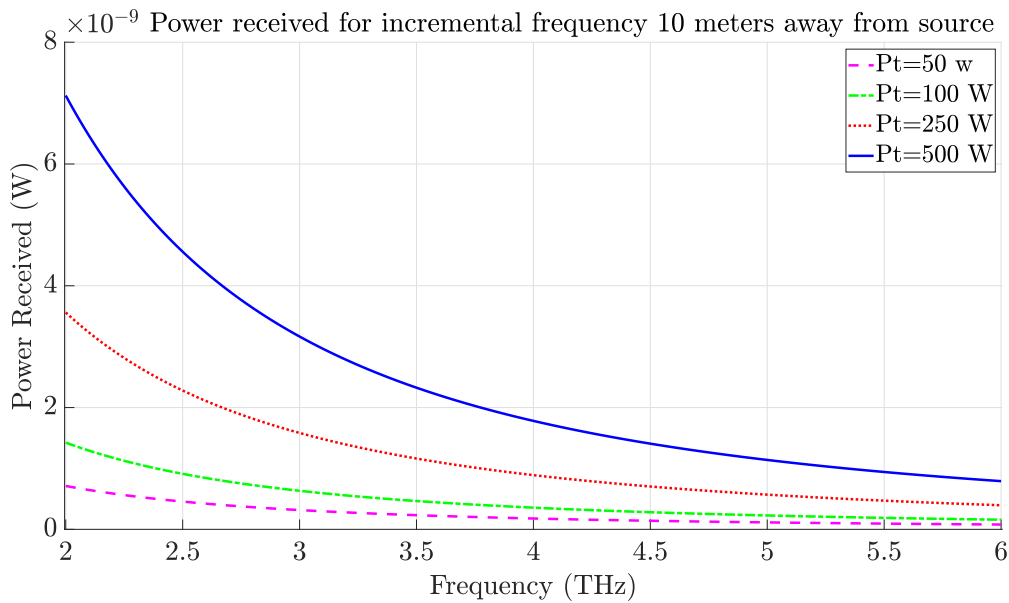
Πίνακας 3.28: Λαμβανόμενη ισχύς σε συχνότητες MHz.



Σχήμα 3.11: Λαμβανόμενη ισχύς σε συχνότητες GHz με σταθερή απόσταση 10 μέτρων.

Συχνότητα	Ισχύς εισόδου			
	50W	100 W	250 W	500 W
2 GHz	721 μW	1,425 mW	3.562 mW	7.124 mW
2.5 GHz	452 μW	911 μW	2.28 mW	4.559 mW
3 GHz	316 μW	633 μW	1.158 mW	3.166 mW
3.5 GHz	230 μW	465 μW	1.14 mW	2.326 mW
4 GHz	177 μW	356 μW	895 μW	1.781 mW
4.5 GHz	141 μW	281 μW	703 μW	1.407 mW
5 GHz	114 μW	228 μW	569 μW	1.14 mW
5.5 GHz	94.2 μW	188 μW	471 μW	942 μW
6 GHz	80.7 μW	161 μW	403 μW	807 μW

Πίνακας 3.29: Λαμβανόμενη ισχύς σε συχνότητες GHz.



Σχήμα 3.12: Λαμβανόμενη ισχύς για διαφορετικές πηγές ισχύς σε συχνότητες THz με σταθερή απόσταση 10 μέτρων.

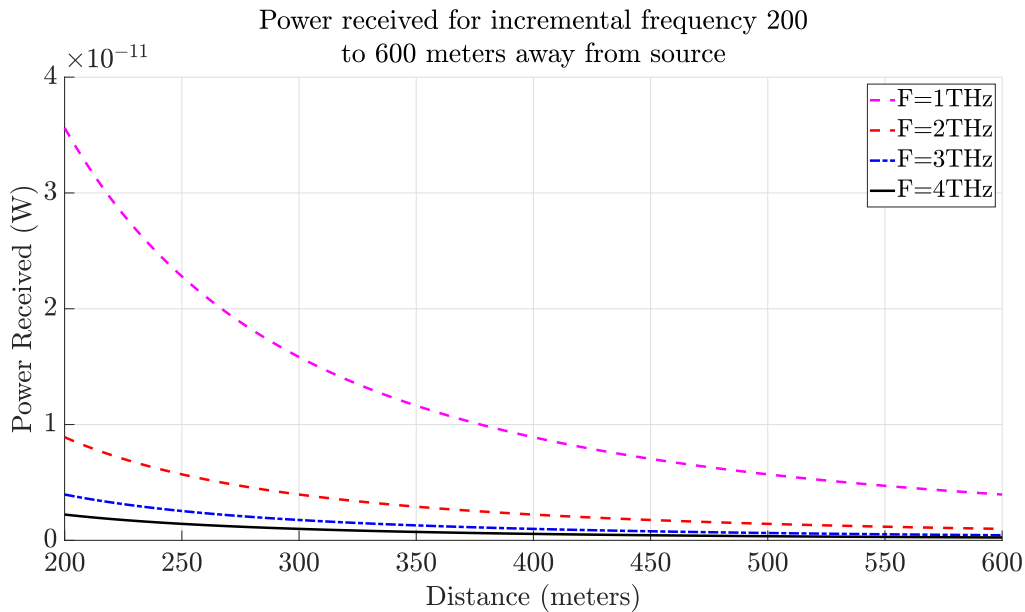
Συχνότητα	Ισχύς εισόδου			
	50W	100 W	250 W	500 W
2 THz	753 pW	1.4 nW	3.5 nW	7.124 nW
2.5THz	450 pW	939 pW	2.27 nW	4.6 nW
3 THz	315 pW	633 pW	1.6 nW	3.16 nW
3.5 THz	232 pW	465 pW	1.16 nW	2.3 nW
4 THz	178 pW	357 pW	890 pW	1.78 nW
4.5 THz	141 pW	281 pW	706 pW	1.405 nW
5 THz	110 pW	227 pW	560 pW	1.14 nW
5.5 THz	93pW	188 pW	471 pW	948 pW
6 THz	79 pW	158 pW	397 pW	810 pW

Πίνακας 3.30: Λαμβανόμενη ισχύς σε συχνότητες THz.

σε σύγκριση με τις συχνότητες GHz θα είναι 10^3 , ωστόσο η ακτινοβολούμενη ισχύς θα είναι μικρότερη κατά 10^{-6} , (3.30). Με άλλα λόγια η ακτινοβολούμενη ισχύς σε κάθε περίπτωση είναι ίδια αλλά μικρότερη κατά 10^{-6} . Στον πίνακα 3.30 έχουμε συλλέξει τις τιμές της ακτινοβολούμενης ισχύος από 2 μέχρι 6 THz με βήμα τα 0.5 THz.

Με όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως η συχνότητα είναι καταλυτικός παράγοντάς της απόσβεσης. Όσο αυξάνεται η συχνότητα, τόσο μειώνεται η επιρροή της απόστασης καθώς οι κυματομορφές αρχίζουν να πλησιάζουν μεταξύ τους.

Από το σενάριο όπου έχουμε είσοδο σταθερή 250 W και για συχνότητες 1,2,3 και 4 THz με μεταβαλλόμενη απόσταση (3.13) συμπεραίνουμε πως η απόσταση είναι εξίσου σημαντική με την συχνότητα όσον αφορά την εκπεμπόμενη ισχύ. Στην κυματομορφή 3.13, βλέπουμε πως ακόμα και για μια σαφώς μικρότερη συχνότητα του 1 THz (σε σύγκριση με τις 2,3,4,5 THz) όσο αυξάνεται η απόσταση, τόσο οι κυματομορφές τείνουν να συγκλίνουν μεταξύ τους. Με άλλα λόγια για μια πάρα πολλή μεγάλη από-



Σχήμα 3.13: Ακτινοβολούμενη ισχύς για διάφορες συχνότητες για απόσταση 200 με 600 μέτρα.

σταση η συχνότητα θα γίνεται ολοένα και πιο αμελητέα και το αντίστροφο, δηλαδή όσο μειώνεται η απόσταση τόσο παραπάνω επηρεάζει η συχνότητα την λαμβανόμενη ισχύ.

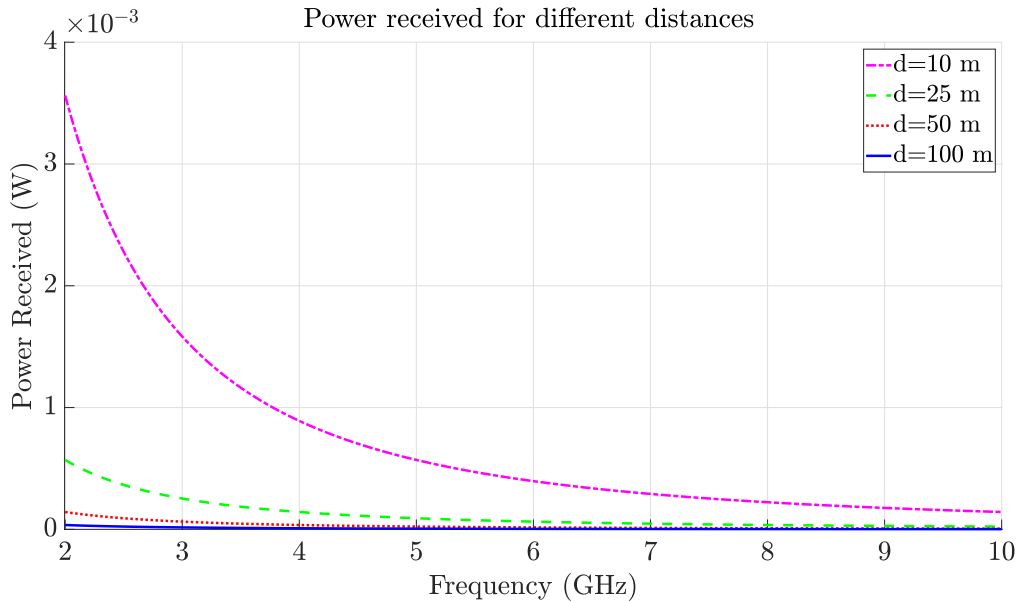
Και το αντίστροφο βέβαια μπορεί να συμβεί, δηλαδή για μια πολύ μεγάλη συχνότητα να συγκλίνουν οι διαφορετικές αποστάσεις όπως παριστάνεται στο σχήμα 3.14 όπου με σταθερή Πηγή 250 W, η γραφική παράσταση της περίπτωσης της απόστασης των 10 m (σε σύγκρισή με τις 25, 50 και 100 m), με την αύξηση της συχνότητας αρχίζει να πλησιάζει τις υπόλοιπες κυματομορφές.

Εν κατακλείδι, οι δυο σημαντικότεροι παράγοντες της απόσβεσης της ακτινοβολούμενης ισχύος είναι η απόσταση και η συχνότητα. Όταν ένας από τους 2 παραπάνω παράγοντες είναι πολύ μεγάλος περιορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιρροή του άλλου.

3.3.3 Υπολογισμός του SAR μέσω της απορροφούμενης ισχύος.

Αρχικά στην κυματομορφή για 1g δέρματος (3.15) παρατηρείται πως τα κινητά 3G και 2G είναι στο άνω άκρο του ορίου, ενώ χάρες την δραστική μείωσή της μέγιστης ισχύος που εισήχθη από το 4G και έπειτα το SAR είχε σημαντική μείωση. Ωστόσο λόγω των αυξημένων απαιτήσεων του 5G, υπήρχε μια μικρή αύξηση του SAR σε σύγκριση με το 4G. Το αναμενόμενο 6G συνεχίζει αυτήν την ανοδική πορεία χωρίς όμως να φτάνει τις τιμές του 2G και του 3G. Οι μέγιστες τιμές του SAR για μέγιστη ισχύ της κάθε γενιάς και ελάχιστη απόσταση 2 cm συλλέχθηκαν στον πίνακα 3.31. Εφόσον στην περίπτωση του δέρματος (το οποίο υπάγεται στους κανονισμούς για το υπόλοιπο σώμα) το όριο SAR είναι 4W/kg, καμία γενία σε καμία περίπτωση δεν θα ξεπερνάει το όριο. Στην περίπτωση της μέτρησής για κύβο 10 γραμμαρίων ιστού, θα έχουμε σαφώς μικρότερο δείκτη SAR για κάθε γενιά όπως και φαίνεται στο σχήμα 3.16.

Και στο κεφάλι για κύβο 1g και 10g, όπως παριστάνεται και στα σχήματα 3.17 και 3.18, δεν θα έχουμε υπερβολή του ορίου του δείκτη SAR, αν και το 2G φτάνει πολύ κοντά στο όριο για 10g, συγκεκριμένα



Σχήμα 3.14: Ακτινοβολούμενη ισχύς για διάφορες αποστάσεις.

Γενιά	1g δέρμα	10g δέρμα	1g Κεφάλι	10g Κεφάλι
2G	1.639 W/kg	0.765 W/kg	1.89 W/kg	1.289 W/kg
3G	1.678 W/kg	0.774 W/kg	1.92 W/kg	1.309 W/kg
4G	0.93 W/kg	0.449 W/kg	1.034 W/kg	0.54 W/kg
5G	1.02 W/kg	0.49 W/kg	1.132 W/kg	0.58 W/kg
6G	1.294 W/kg	0.642 W/kg	1.432 W/kg	0.74 W/kg

Πίνακας 3.31: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης για δέρμα και κεφάλι για απόσταση 2 cm.

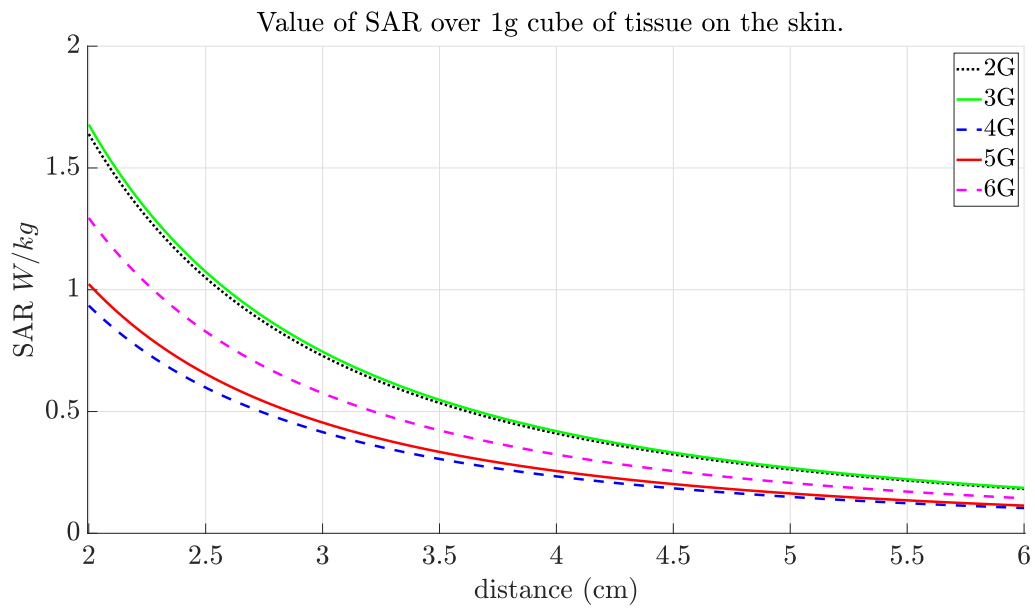
1.89 W/kg. Η τιμές του μέγιστου SAR κάθε γενιάς και για κάθε υποπερίπτωση για απόσταση 2 cm καθώς και για 6 cm, παριστάνονται στους πίνακες 3.31 και 3.32 αντίστοιχα.

3.3.4 Υπολογισμός του SAR μέσω αγωγιμότητας και πυκνότητας μάζας.

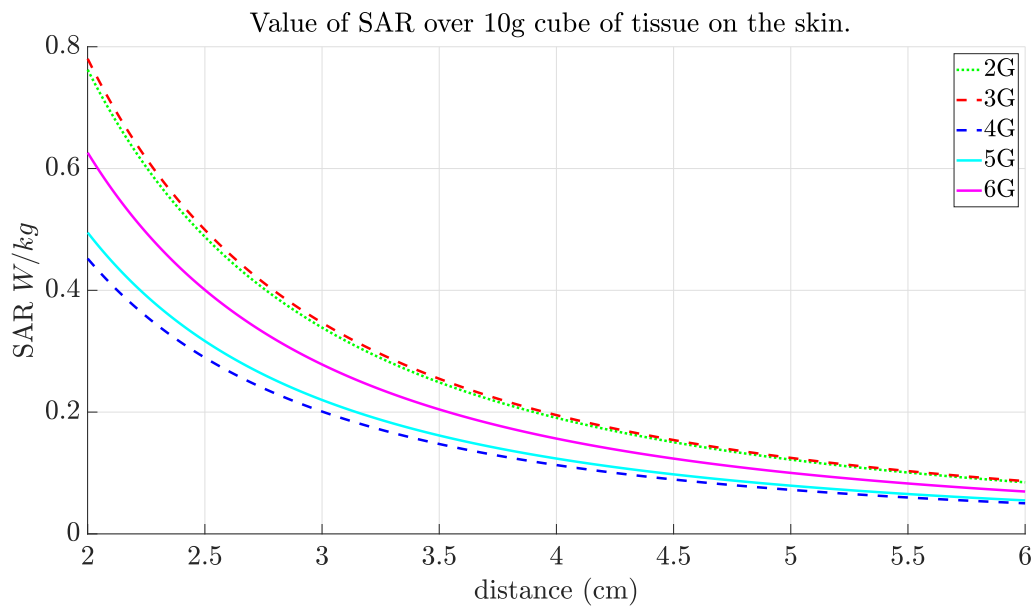
Το δέρμα είναι ίσως η σημαντικότερη γραμμή άμυνας από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καθώς περικλείει το μεγαλύτερο ποσοστό των ανθρωπίνων μηχανισμών και οργάνων. Στα σχήματα 3.19-3.23 παρίστανται οι κυματομορφές της κάθε μια γενιάς (από το 2G μέχρι και το 6G) για τα χαρακτηριστικά του λαμβανόμενου ρυθμού ειδικής απορρόφησης του δέρματος. Το τριχωτό της κεφαλής παρουσιάζει την ίδια αγωγιμότητά με το δέρμα άρα θα έχει και τον ίδιο βαθμό SAR. Όπως είναι φυσικό από την αύξηση της αγωγιμότητας που προκαλείται με την αύξηση της συχνότητας κάθε μεταγενέστερης γενιάς,

Γενιά	1g δέρμα	10g δέρμα	1g Κεφάλι	10g Κεφάλι
2G	0.182 W/kg	0.084 W/kg	0.205 W/kg	0.1421 W/kg
3G	0.185 W/kg	0.086 W/kg	0.2155 W/kg	0.1454 W/kg
4G	0.143 W/kg	0.068 W/kg	0.159 W/kg	0.082 W/kg
5G	0.113 W/kg	0.055 W/kg	0.1258 W/kg	0.065 W/kg
6G	0.103 W/kg	0.050 W/kg	0.1149 W/kg	0.058 W/kg

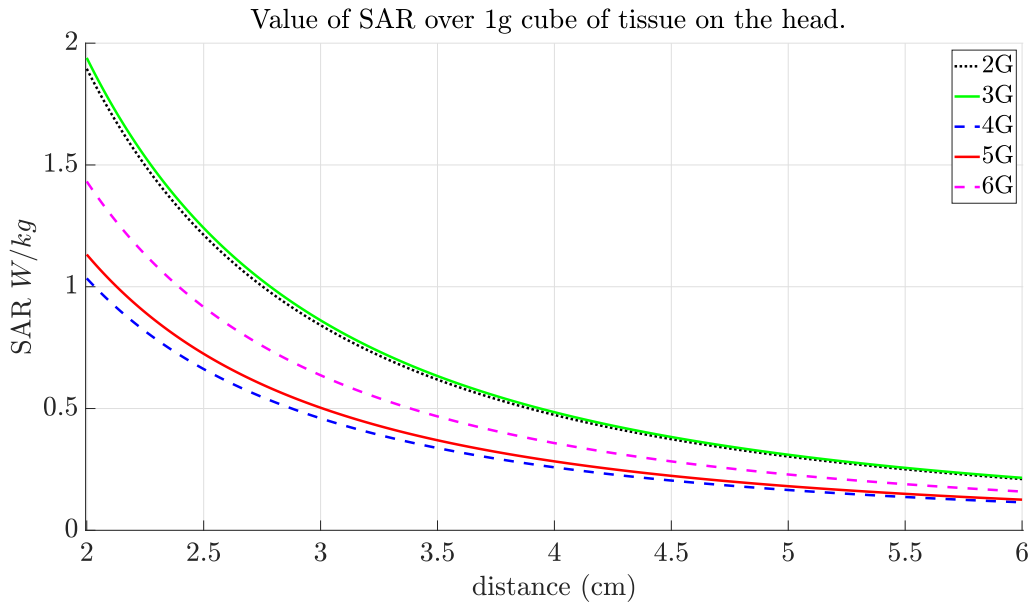
Πίνακας 3.32: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης για δέρμα και κεφάλι για απόσταση 6 cm.



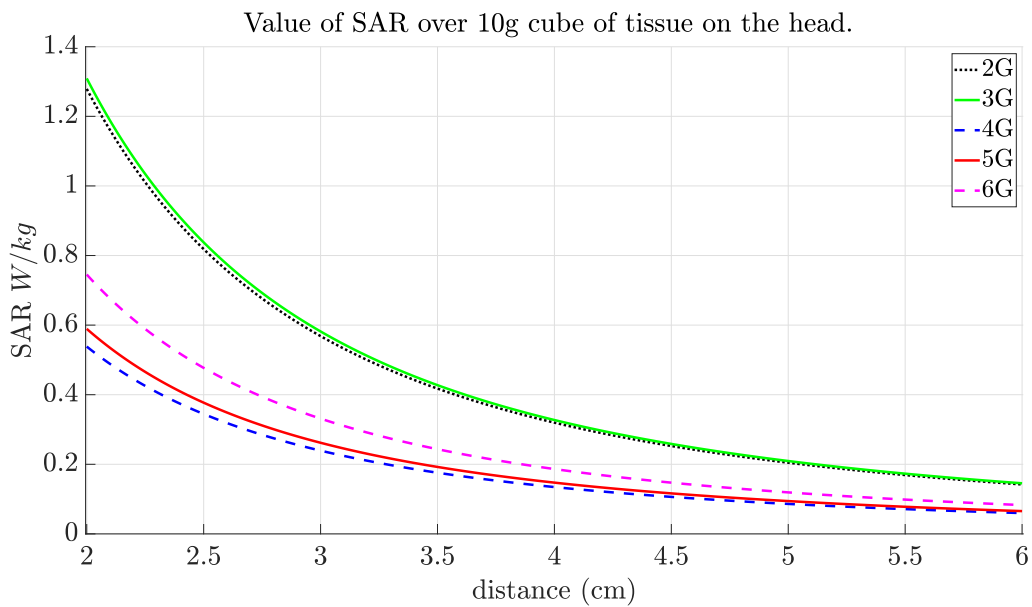
Σχήμα 3.15: SAR σε κάθε γενιά για κύβο 1g δέρματος.



Σχήμα 3.16: SAR σε κάθε γενιά για κύβο 10g δέρματος.



Σχήμα 3.17: SAR σε κάθε γενιά για 1g ιστού του κεφαλιού.



Σχήμα 3.18: SAR σε κάθε γενιά για 10g ιστού του κεφαλιού.

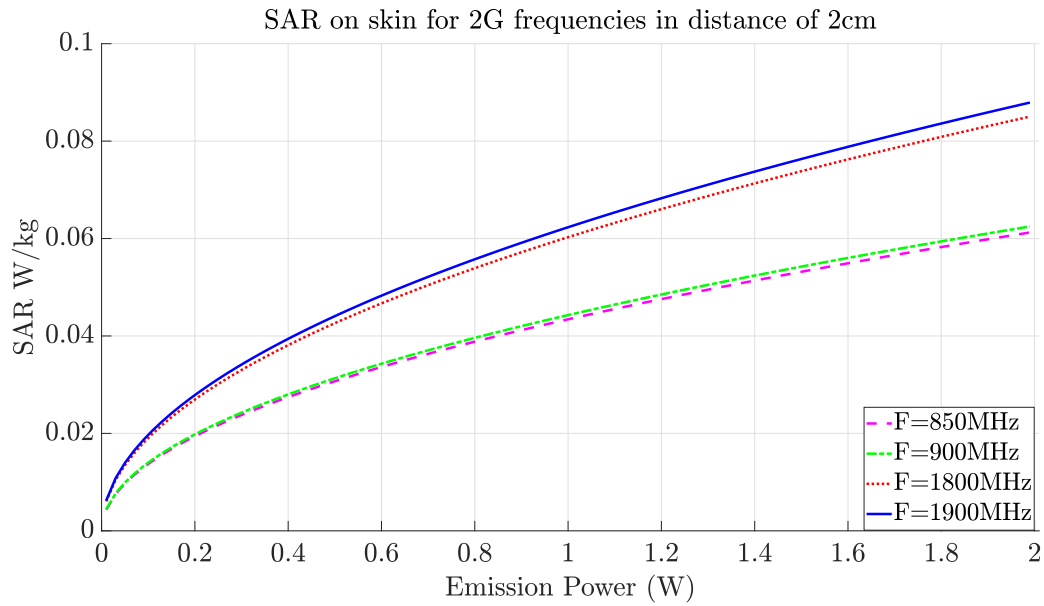
ο ρυθμός ειδικής απορρόφησης θα έπρεπε να ανεβαίνει δραστικά για κάθε γενιά. Ωστόσο, με την μείωση της ισχύος που παρατηρείται στις τελευταίες γενιές η αύξηση του SAR περιορίζεται μερικώς. Το όριο SAR για το δέρμα είναι 4 W/kg μια τιμή την οποία δεν φτάνει καμία γενιά. Στον πίνακα 3.35 παρατίθενται οι τιμές του SAR της υψηλότερης συχνότητας της κάθε γενιάς για το δέρμα.

Στην περίπτωση του εγκεφάλου που είναι από τα πιο ευαίσθητα (σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) και σημαντικά σημεία του ανθρώπινου σώματος έχουμε γενικότερα μεγαλύτερες τιμές SAR. Το παραπάνω σε συνδυασμό με την μικρότερη πυκνότητα μάζας του εγκεφάλου έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της τιμής του SAR. Οι κυματομορφές του SAR του εγκεφάλου παριστάνονται στα σχήματα 3.24-3.29. Το ανώτατο όριο για την έκθεση για το κεφάλι είναι 1.6 W/kg. Από την συχνότητα 10 GHz και πέρα η αγωγιμότητά στον εγκέφαλο αυξάνεται ραγδαία με αποτέλεσμα η τιμή SAR του εγκεφάλου στις μεγάλες συχνότητες του 5G να πλησιάζει σημαντικά το ανώτατο όριο. Συγκεκριμένα στην συχνότητα των 39 GHz το SAR φτάνει στα 1.518 W/kg. Η διαφορά αυτή (σε σύγκριση με το δέρμα) διογκώνεται στην 6^η γενιά όπου για συχνότητα F=178 GHz σε απόσταση 2 cm και με μέγιστη ισχύ εξόδου, ξεπερνιέται το θεσπισμένο όριο SAR (1.951 W/kg). Από το σχήμα 3.29 συμπεραίνουμε πως για να μέγιστη ισχύ 0.1 Watt απαιτείται ελάχιστη απόσταση 2.9, 3.1, 3.3, 3.35 και 3.4 cm ώστε οι συχνότητες 114, 148, 164, 177 και 178 αντίστοιχα να είναι εντός των ορίων. Σε περίπτωση που δεν μπορεί να ικανοποιηθεί η συγκεκριμένη απαίτηση, θα πρέπει να ρυθμιστεί η μέγιστη ισχύς αναλόγως. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να περιοριστεί στα 0.0446-0.0345 Watt για συχνότητες 114-178 GHz, δηλαδή περίπου στο 35% με 45% της θεωρητικής μέγιστης ισχύος. Ο παραπάνω περιορισμός είναι εύκολα εφαρμόσιμος με την χρήση αισθητήρων που υπολογίζουν την απόστασή του ατόμου από την συσκευή τους. Τα ακριβή αποτελέσματά για κάθε συχνότητα που μελετήθηκε βρίσκονται στον πίνακα 3.33.

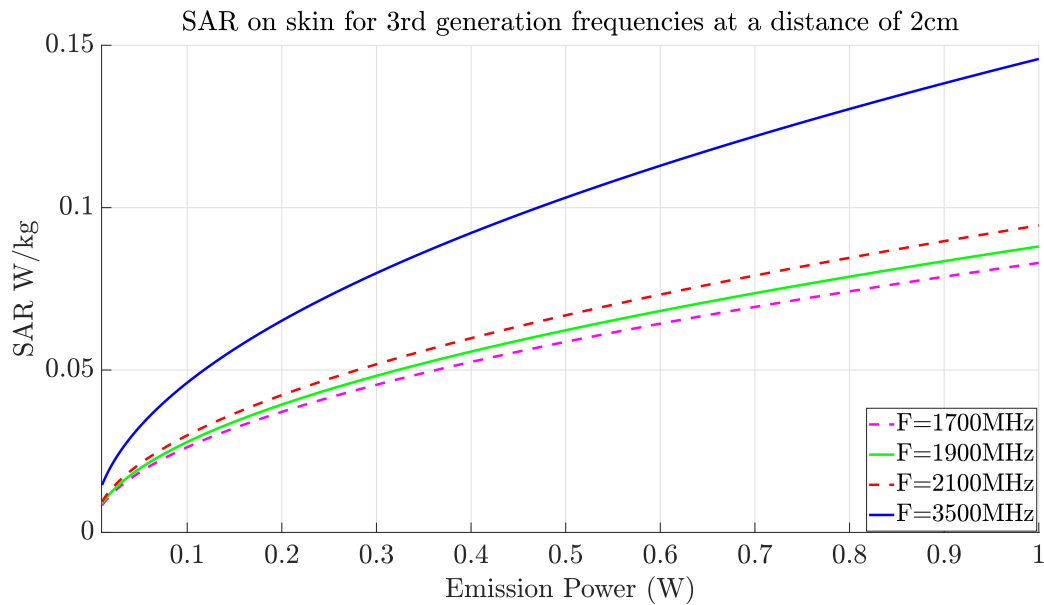
Όσον αφορά τα οστά, είναι φανερό από τις κυματομορφές πως δεν υπάρχει και δεν θα υπάρξει κανένα πρόβλημα σχετικό με την ακτινοβολία στις συχνότητες 6G καθώς η αγωγιμότητα και άρα το SAR είναι πολλών τάξεων μικρότερο από τις υπόλοιπες περιπτώσεις και έτσι ακόμα στις πιο μεγάλες συχνότητες δεν υφίσταται κίνδυνος. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα της μεγαλύτερης συχνότητας κάθε γενιάς συλλέχθηκαν στον πίνακα 3.35.

Ο κερατοειδής χιτώνας του ματιού σε αντίθεση με τα οστά είναι πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Για αυτόν τον λόγο στα μάτια παρατηρείται ο μεγαλύτερος αριθμός SAR των εξεταζόμενων τμημάτων του σώματος. Ακόμα και σε συχνότητες 5G (συγκεκριμένα στην υψηλότερη συχνότητα των 38 GHz) όταν το κινητό τηλέφωνο ακτινοβολεί την πλήρη ισχύ του ξεπερνάει το όριο της FCC, καθώς φτάνει τα 1.63 W/kg. Βέβαια διαφορά τάξεως 0.03 είναι μικρή και μπορεί εύκολα να αντιμετωπιστεί είτε με τον περιορισμό της ισχύος στο 95% της μέγιστης, είτε με διεύρυνση της ελάχιστης απόστασης της κεραίας από το μάτι κατά 0.2 cm (2.2 cm), όπως παριστάνεται στο 3.39.

Στις συχνότητες της 6^{ης} γενιάς παρατηρείται σημαντική αύξηση του SAR, καθώς για πλήρη ισχύ το SAR κυμαίνεται από 2.6 μέχρι 2.9 W/kg. Για να αποφευχθεί η υπέρβαση των ορίων θα πρέπει είτε να περιοριστεί η μέγιστη ισχύς στα 0.04-0.03 Watt, ανάλογα με την συχνότητα, ή να αυξηθεί η ελάχιστη απόσταση για τις συχνότητες 114, 148, 164, 174 και 178 GHz στα 3.199, 3.347, 3.527, 3.602 και 3.625 cm αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.34.



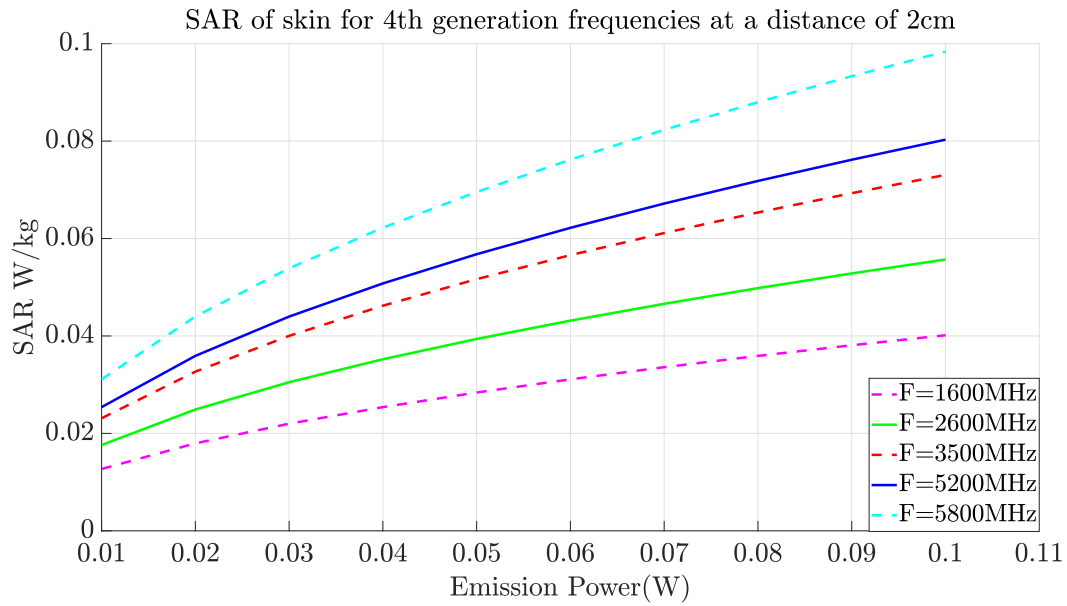
Σχήμα 3.19: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για το δέρμα σε συχνότητες 2G.



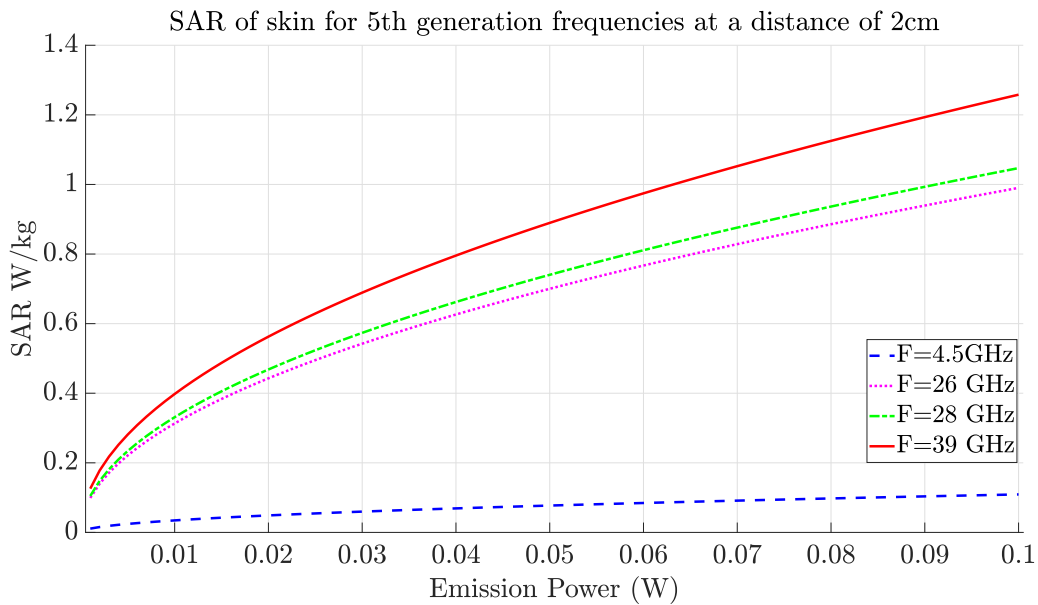
Σχήμα 3.20: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για το δέρμα σε συχνότητες 3G.

Συχνότητα	Ελάχιστη ισχύ, d=2 cm	Ελάχιστη απόσταση, P=0.1 W
114 GHz	44.6 mW	2.993 cm
148 GHz	40.9 mW	3.124 cm
165 GHz	36.8 mW	3.295 cm
174 GHz	35.5 mW	3.359 cm
178 GHz	34.5 mW	3.404 cm

Πίνακας 3.33: Ελάχιστη ισχύς/απόσταση για να είναι εντός των ορίων οι συχνότητες του 6G για τον εγκέφαλο.



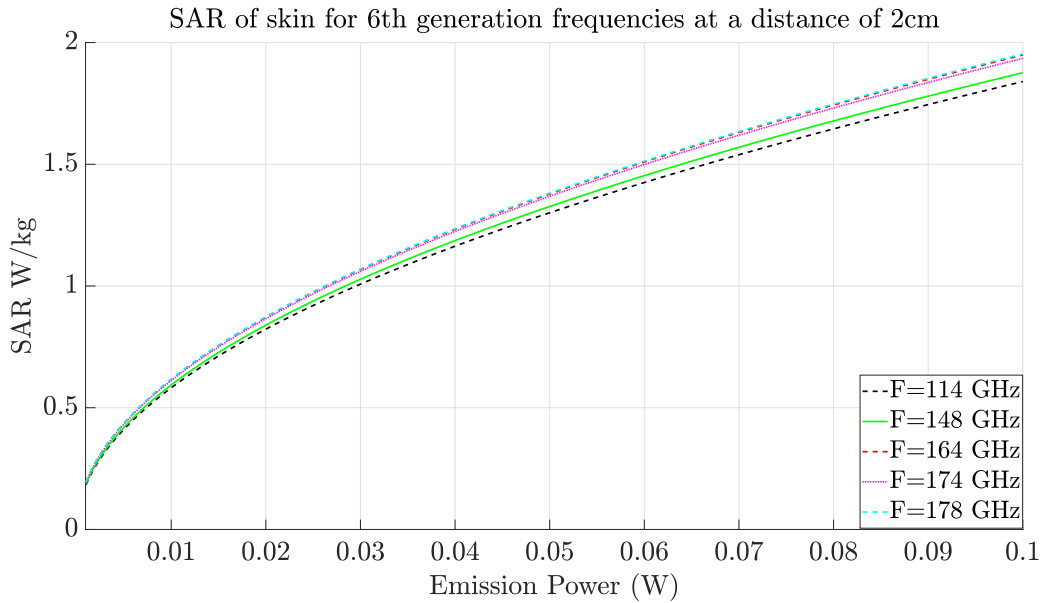
Σχήμα 3.21: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για το δέρμα σε συχνότητες 4G.



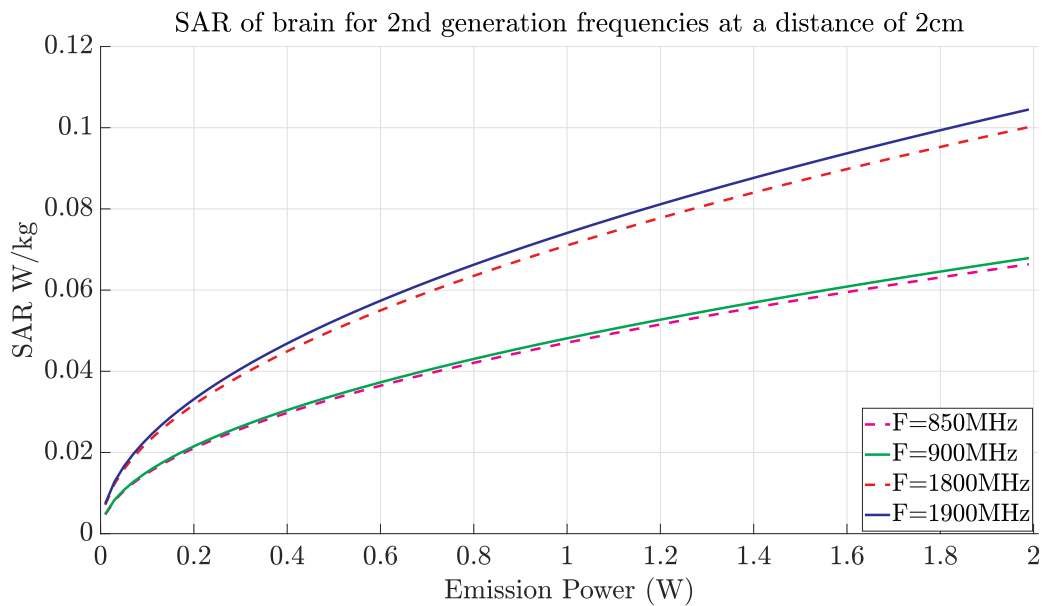
Σχήμα 3.22: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για το δέρμα σε συχνότητες 5G.

Συχνότητα	Ελάχιστη ισχύς, d=2 cm	Ελάχιστη απόσταση, P=0.1 W
114 GHz	39.2 mW	3.199 cm
148 GHz	35.7 mW	3.347 cm
165 GHz	32.2 mW	3.527 cm
174 GHz	30.9 mW	3.602 cm
178 GHz	30.3 mW	3.625 cm

Πίνακας 3.34: Ελάχιστη ισχύς/απόσταση για να είναι εντός των ορίων οι συχνότητες του 6G για τον κερατοειδή.



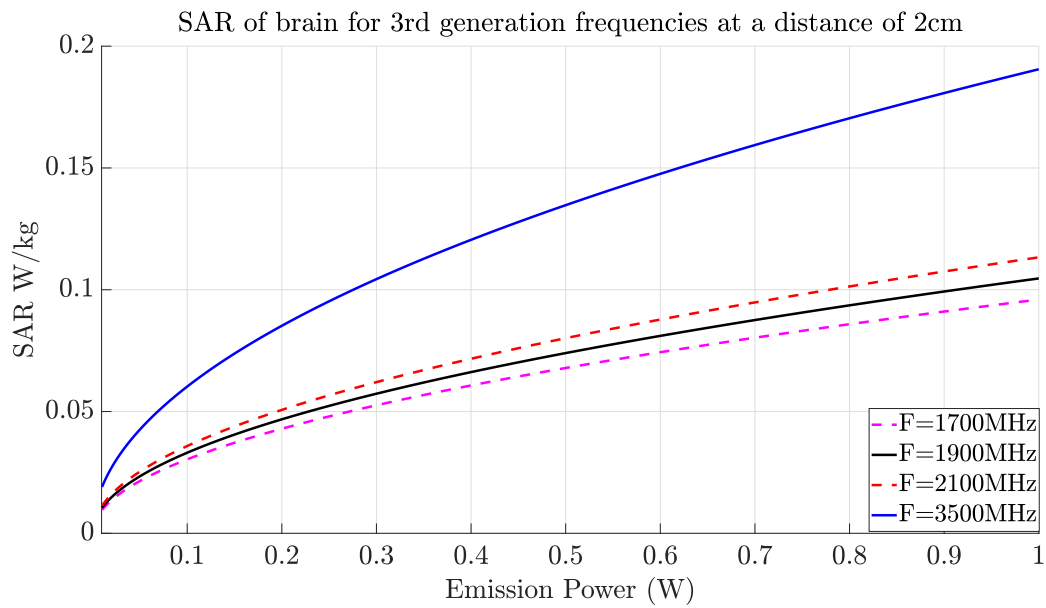
Σχήμα 3.23: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για το δέρμα σε συχνότητες 6G.



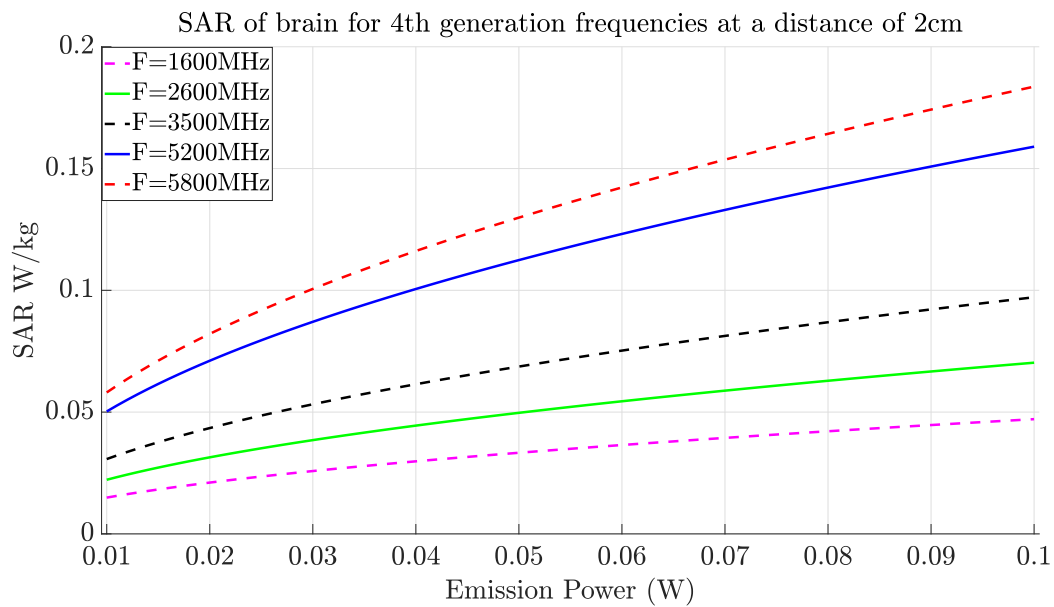
Σχήμα 3.24: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 2G.

Γενιά	Μέγιστο SAR				
	Δέρμα	Εγκέφαλος	Οστά	Μάτια	
2G	0.087 W/kg	0.104W/kg	5.246 mW/kg	0.14 W/kg	
3G	0.14 W/kg	0.1905 W/kg	10.61 mW/kg	0.22 W/kg	
4G	0.09 W/kg	0.159 W/kg	10.31 mW/kg	0.204 W/kg	
5G	1.252 W/kg	1.518 W/kg	27.1 mW/kg	1.63 W/kg	
6G	1.951 W/kg	2.7 W/kg	197mW/kg	2.9W/kg	

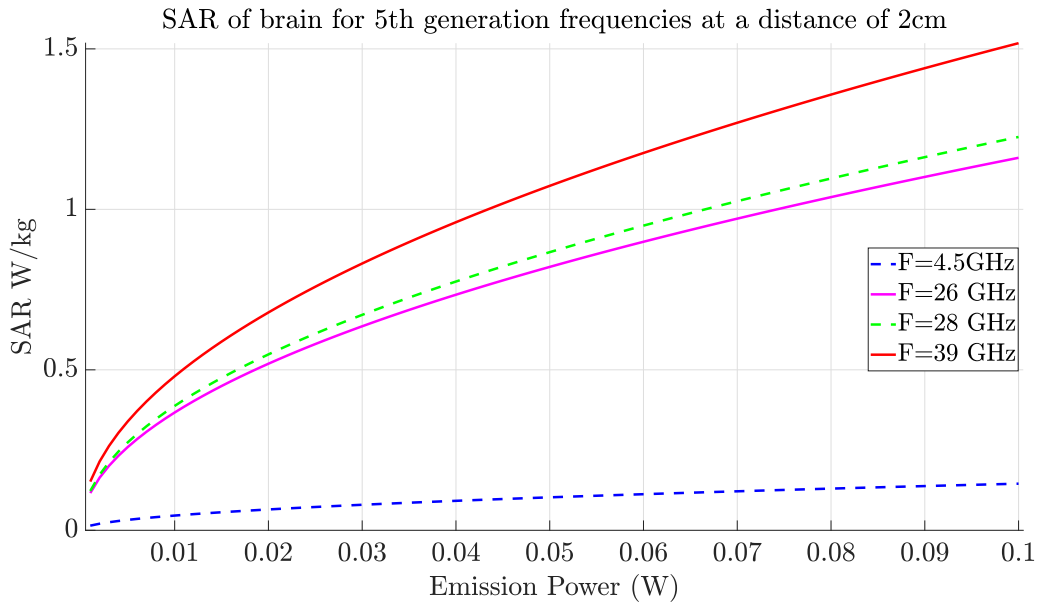
Πίνακας 3.35: Μέγιστος ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για διάφορα μέρη τους σώματος.



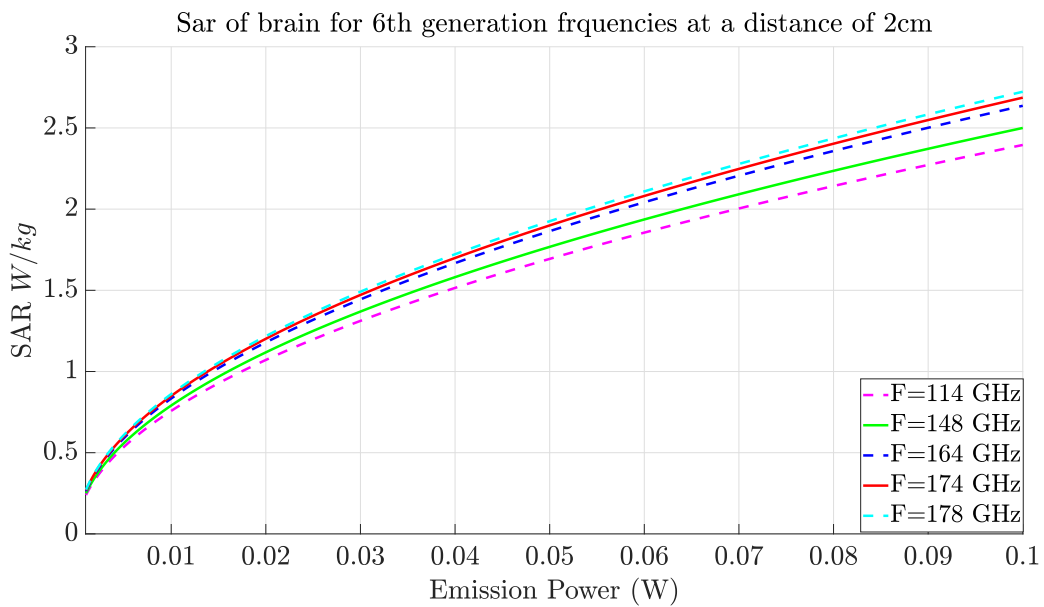
Σχήμα 3.25: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 3G.



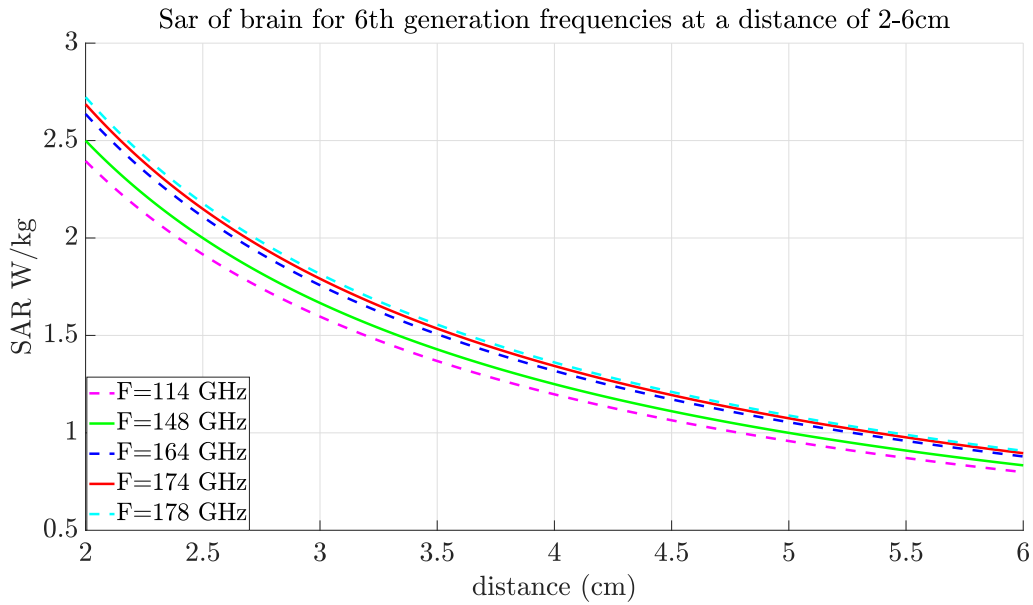
Σχήμα 3.26: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 4G.



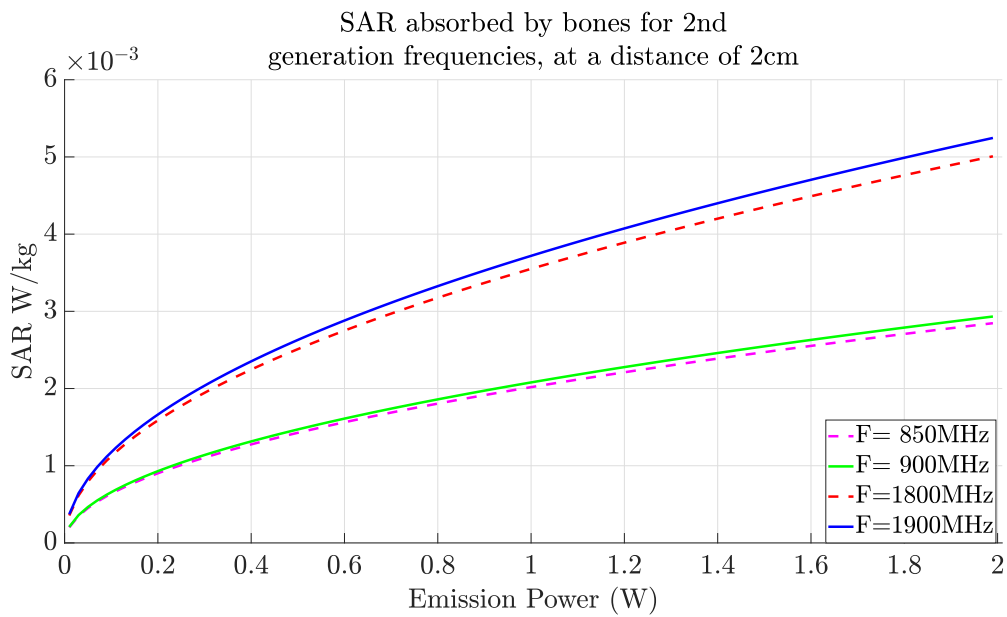
Σχήμα 3.27: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 5G.



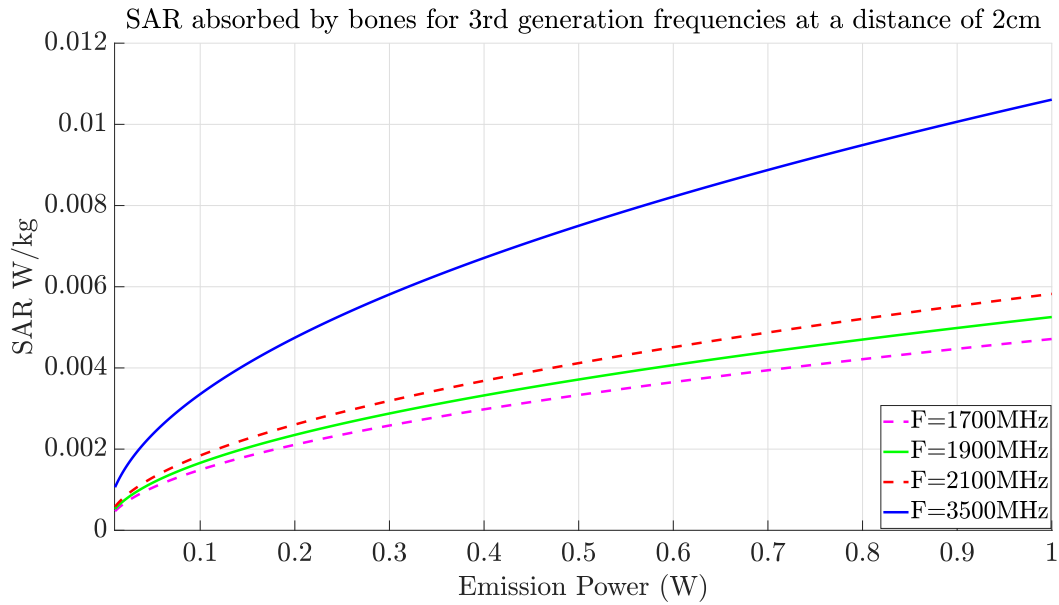
Σχήμα 3.28: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 6G.



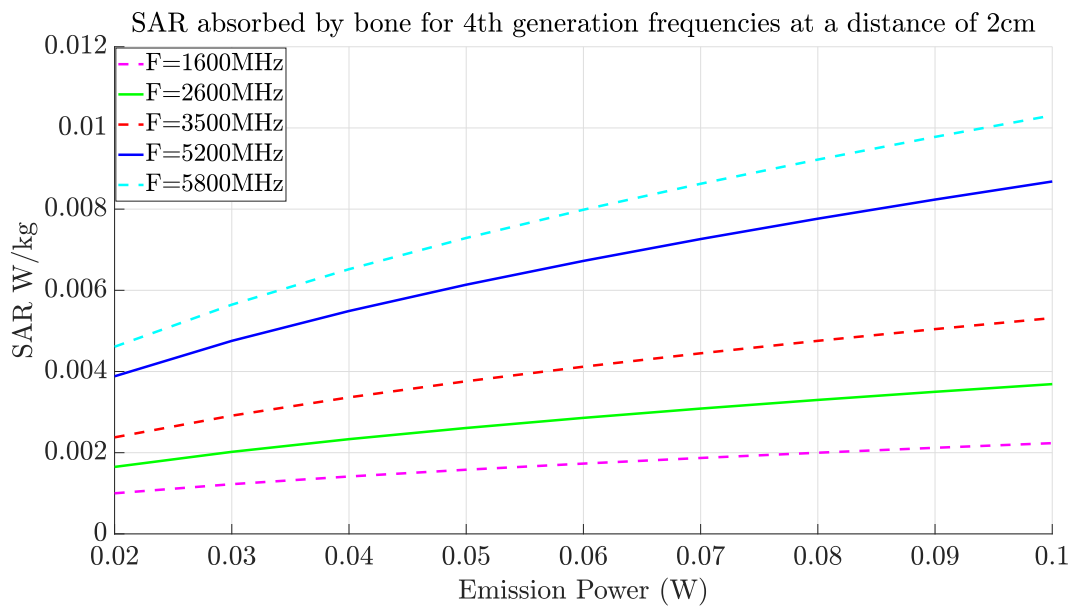
Σχήμα 3.29: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον εγκέφαλο σε συχνότητες 6G σε απόσταση 2-6 cm.



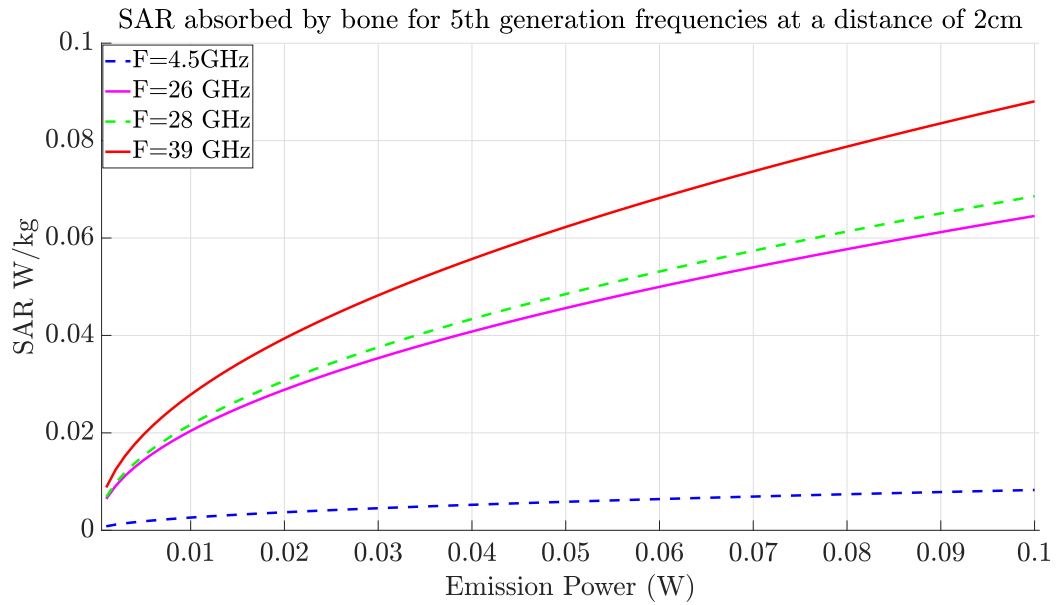
Σχήμα 3.30: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τα οστά σε συχνότητες 2G.



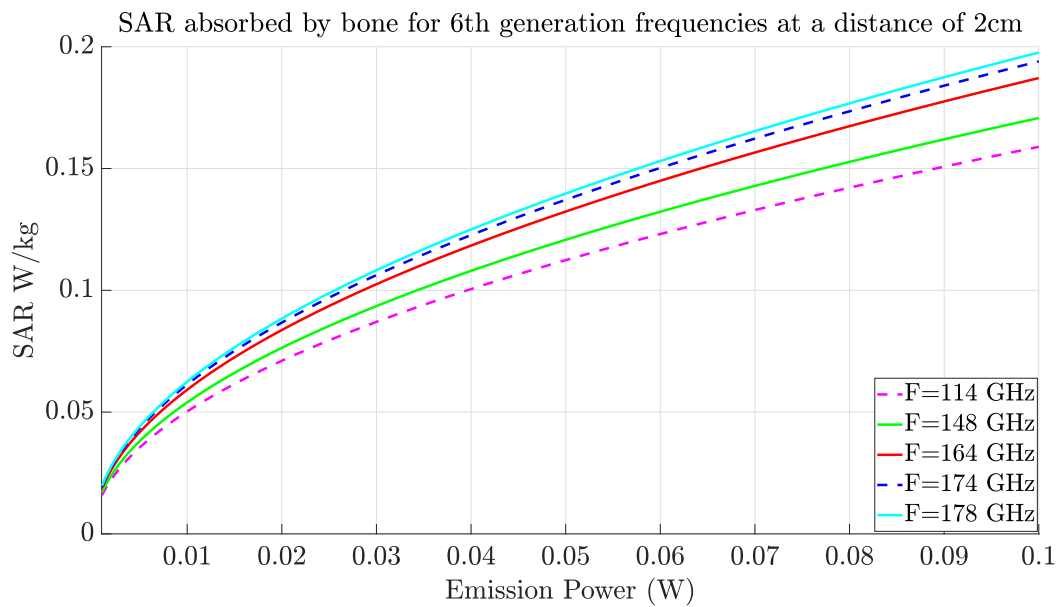
Σχήμα 3.31: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τα οστά σε συχνότητες 3G.



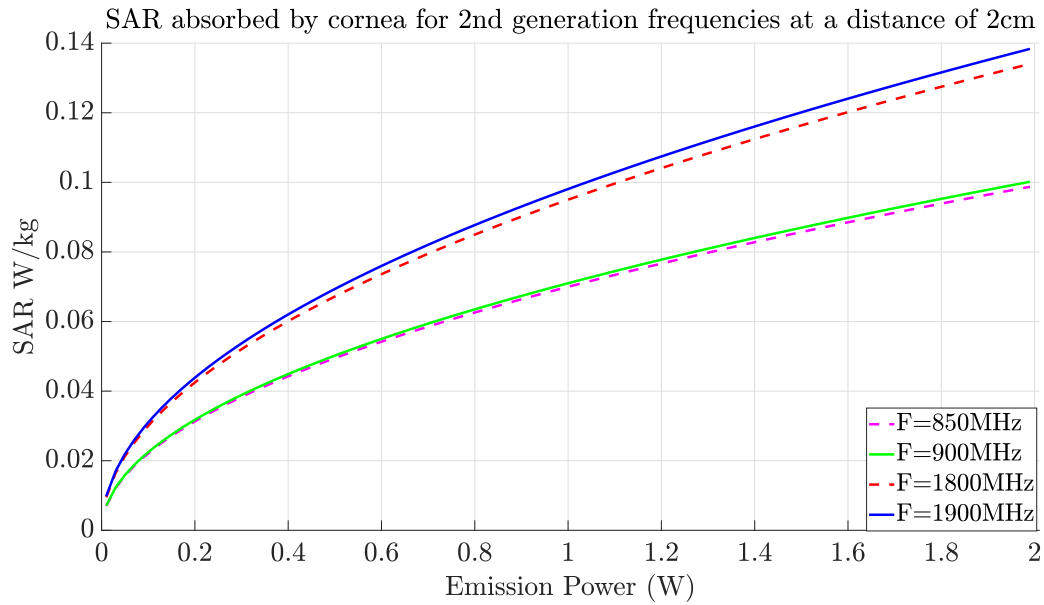
Σχήμα 3.32: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τα οστά σε συχνότητες 4G.



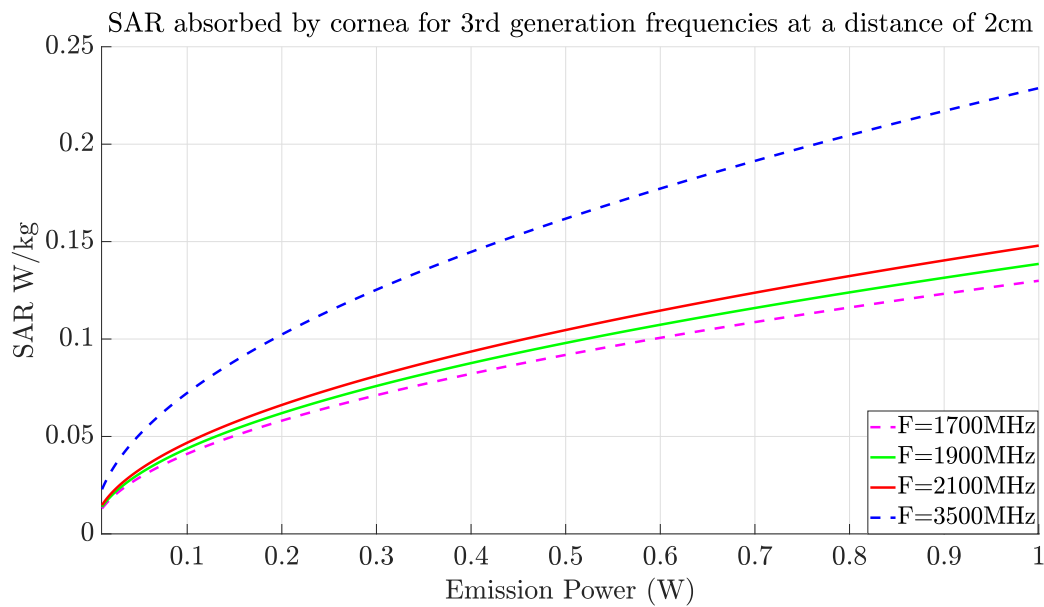
Σχήμα 3.33: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τα οστά σε συχνότητες 5G.



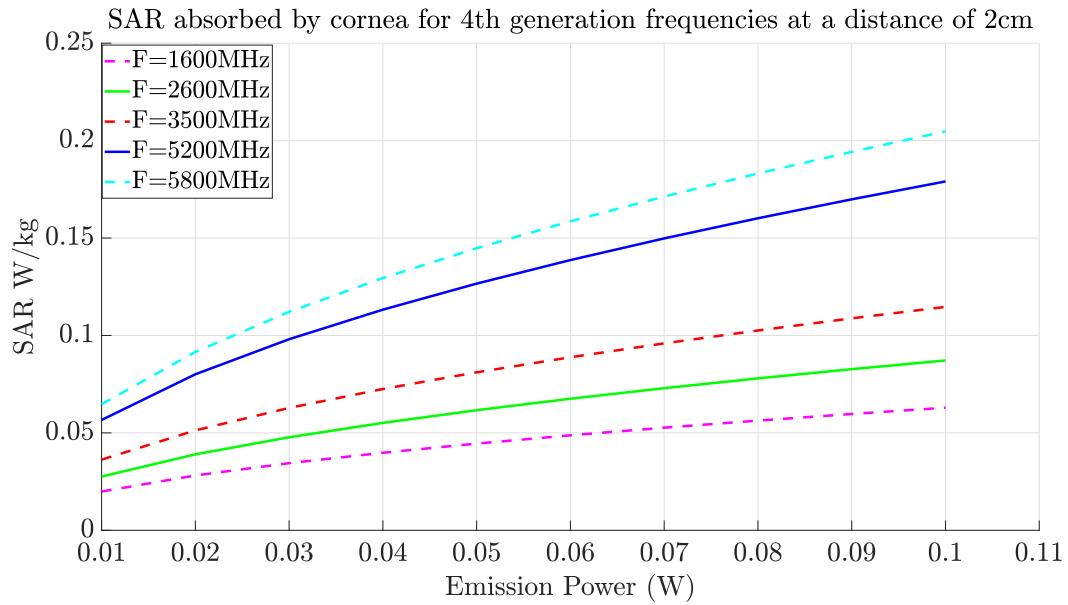
Σχήμα 3.34: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τα οστά σε συχνότητες 6G.



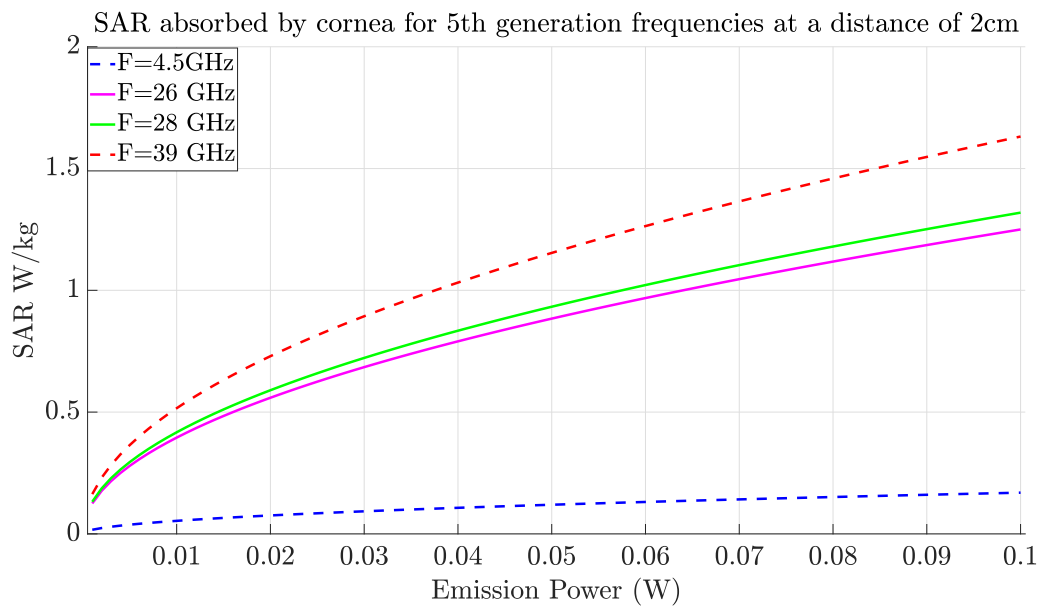
Σχήμα 3.35: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 2G.



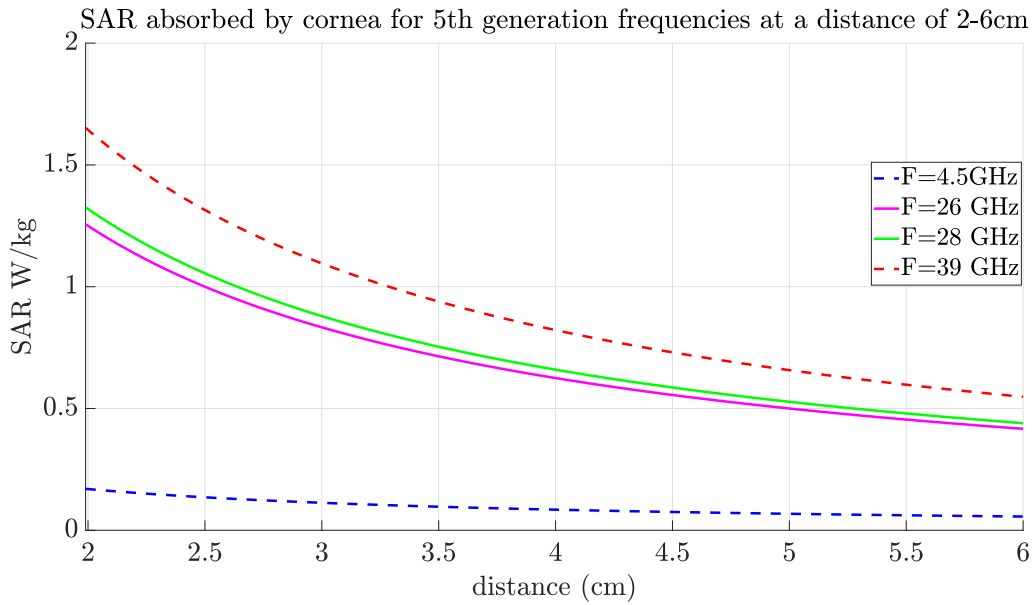
Σχήμα 3.36: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 3G.



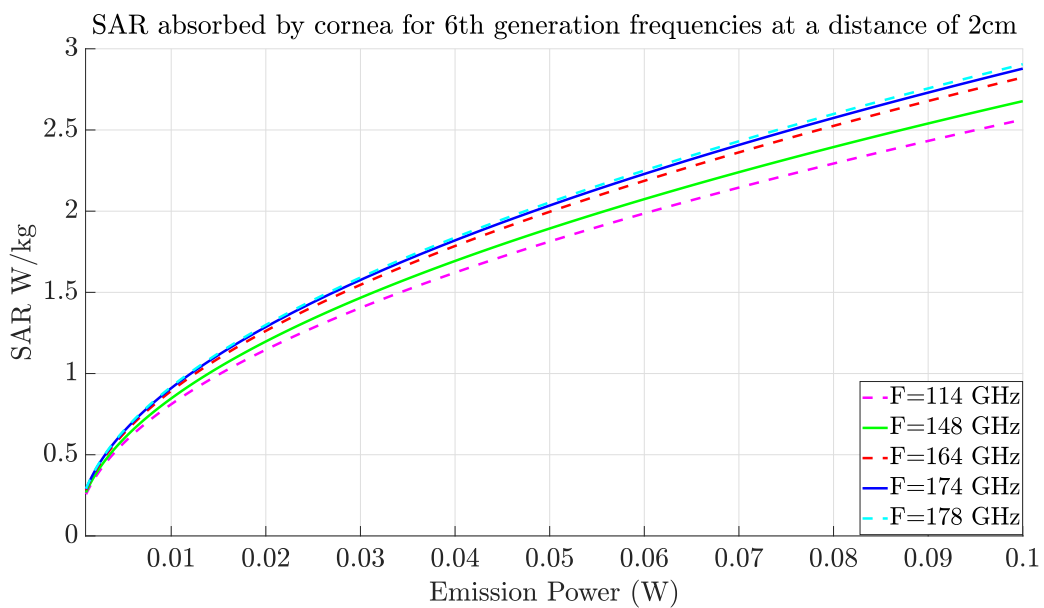
Σχήμα 3.37: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 4G.



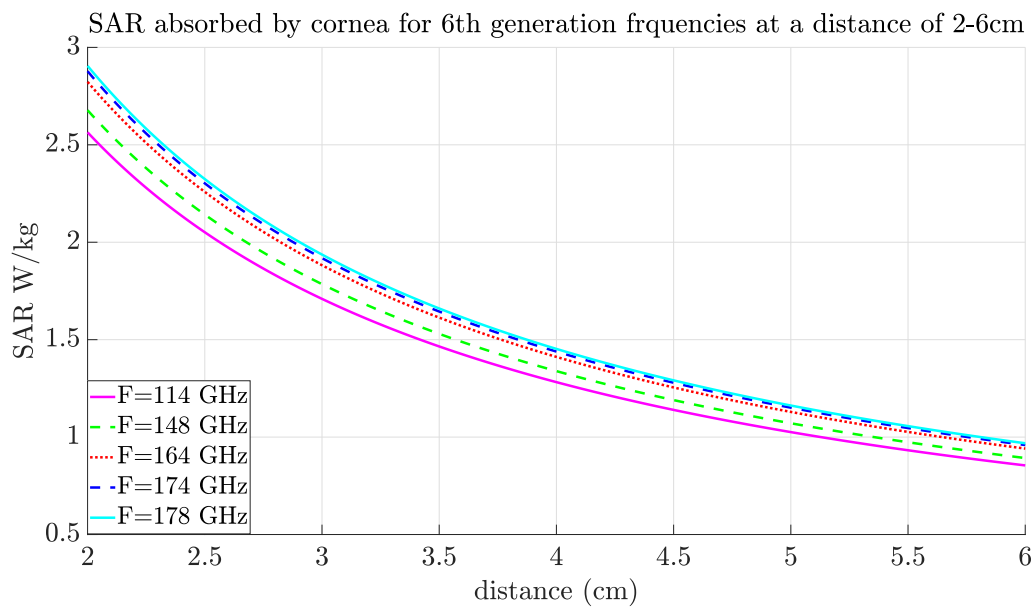
Σχήμα 3.38: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 5G.



Σχήμα 3.39: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 5G σε απόσταση 2 με 6 cm.



Σχήμα 3.40: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 6G.



Σχήμα 3.41: Ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR για τον κερατοειδή χιτώνα σε συχνότητες 6G σε απόσταση 2 με 6 cm.

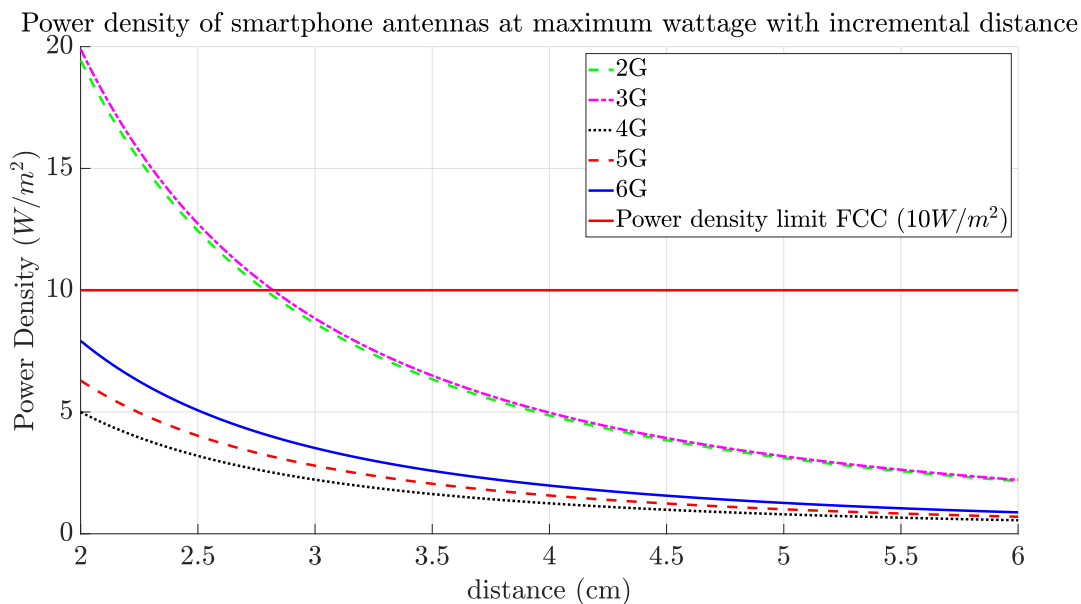
Γενιά	Ελάχιστη απόσταση για $P_D=10 \text{ W/m}^2$	$P_D, d=2 \text{ cm}$	$P_D, d=6 \text{ cm}$
2G	2.782 cm	19.87 W/m^2	2.16 W/m^2
3G	2.82 cm	19.42 W/m^2	2.21 W/m^2
4G	1.4 cm	7.92 W/m^2	0.553 W/m^2
5G	1.552 cm	6.26 W/m^2	0.669 W/m^2
6G	1.789 cm	7.9 W/m^2	0.889 W/m^2

Πίνακας 3.36: Ελάχιστη απόσταση/ισχύς για συμμόρφωσή με τα όρια της FCC.

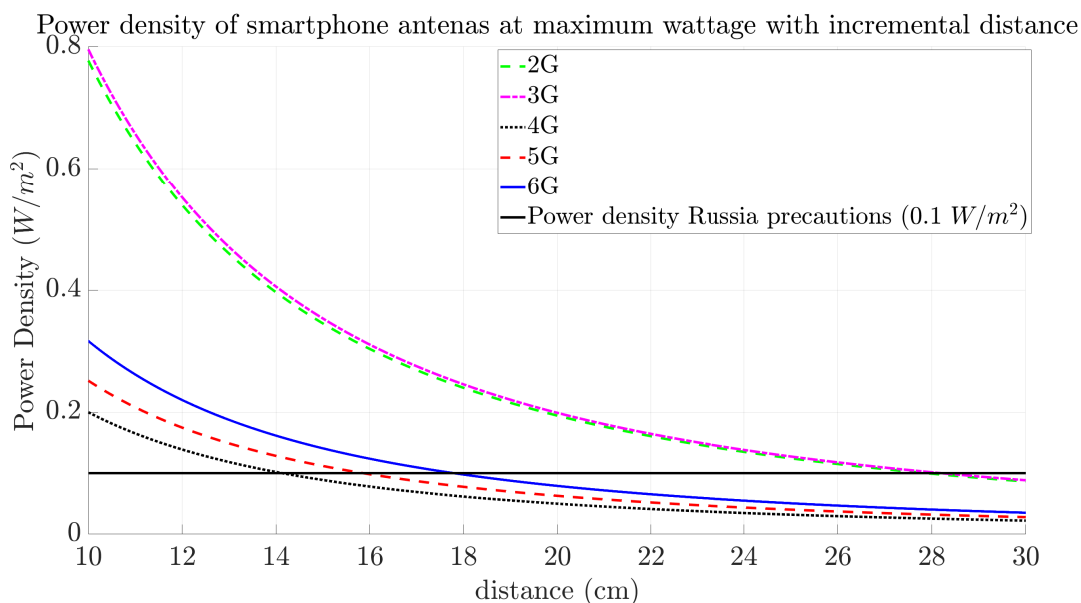
3.3.5 Πυκνότητα Ισχύος για μικρές αποστάσεις.

Στο σχήμα 3.42 η πράσινη γραφική κυματομορφή απεικονίζει την εκπομπή ενός τυπικού τηλεφώνου 2ης γενιάς. Η μοβ η μαύρη και η κόκκινη απεικονίζουν ένα τυπικό τηλέφωνο 3G, 4G και 5G αντιστοίχως. Το ανερχόμενο 6G παριστάνεται στην μπλε κυματομορφή. Όπως βλέπουμε, ακόμα και για απόσταση 2 cm από την πηγή, η πυκνότητα ισχύος είναι σημαντικά χαμηλότερη από το όριο της FCC για το 4G το 5G και το 6G. Το παραπάνω οφείλεται λόγω της καλύτερης αποδοτικότητας της ενέργειας, του περιορισμού της μέγιστης ισχύος των συσκευών καθώς και της αύξησής του κέρδους των κεραιών ανά τα χρόνια. Στον πίνακα 3.36 παρατίθενται η απόσταση στην οποία κάθε γενιά φτάνει στο όριο πυκνότητας ισχύος 10 W/m^2 καθώς και η πυκνότητα ισχύος της κάθε γενιάς στα 2 και 6 cm. Παρόλο που οι κυματομορφές του 3G και του 2G βρίσκονται πάνω από το όριο για απόσταση μέχρι και 2.82 και 2.782 εκατοστά αντίστοιχα, θα πρέπει να σημειωθεί πως κάτι τέτοιο συνέβαινε σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις όπου υπήρχε σημαντικά ασθενές σήμα καθώς η ακτινοβολούμενη ισχύς των συσκευών αυτών ήταν συνήθως πολύ χαμηλότερη από την μέγιστη. Είναι φανερό λοιπόν πως με την ευαισθητοποίηση που υπάρχει πλέον σχετικά με τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας καθώς και την συνεχώς αυξανόμενη πυκνότητα τοποθέτηση καθώς και βελτίωση ποιότητας των κεραιών, η πυκνότητά ισχύος του 6G θα είναι σίγουρα κάτω των ανωτάτων ορίων.

Στην περίπτωση τώρα των ορίων της Ρωσίας όπως φαίνεται στο σχήμα 3.43 η ελάχιστη απόσταση για να φτάσει κάθε γενιά κεραιάς στα όρια διευρύνεται σημαντικά. Συγκεκριμένα η ελάχιστη απόσταση για να βρίσκεται στα όρια κάθε κεραιά είναι στον πίνακα 3.37. Το 6G τηλέφωνο συγκεκριμένα απαιτεί 17.64 cm ελάχιστη απόσταση από τον άνθρωπο για τον περιορισμό πιθανού κινδύνου. Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι αναπάντεχα και ανησυχητικά. Ωστόσο πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι στην πράξη τα κινητά τηλέφωνα σε μια επαρκώς καλυμμένη περιοχή δεν χρειάζεται να εκπέμπουν παραπάνω από 200-300 μWatt . Με άλλα λόγια είναι ζωτικής σημασίας, είτε η πυκνή υπερκάλυψη του κόσμου με το δίκτυο, είτε ο περιορισμός της μέγιστης ισχύος της κάθε κεραιάς κινητού τηλεφώνου με σκοπό την τήρηση των ορίων σε απόσταση 2 cm. Στον πίνακα 3.37 παρίσταται επίσης η ελάχιστη αυτή ισχύ για κάθε γενιά ώστε να επιτευχθεί το παραπάνω, η οποία πάρθηκε από την κυματομορφή 3.44, όπου παριστάνεται η πυκνότητα ισχύος για μεταβαλλόμενη ισχύ εκπομπής της συσκευής του χρήστη. Βέβαια ένας τέτοιος περιορισμός θα έχει ως αποτέλεσμα την δυσκολία εύρεσης σήματος των συσκευών του δικτύου. Επιπρόσθετα το παραπάνω σενάριο προϋποθέτει ότι ο χρήστης έχει το τηλέφωνο του στο κεφάλι του και συγκεκριμένα στο αυτί του. Η μέση πυκνότητα ισχύος του ανθρωπίνου σώματος θα είναι αρκετά χαμηλότερη. Παρόλα αυτά, συνίσταται η χρήση ακουστικών ιδιαίτερα όταν γίνεται χρήση πολλών υπηρεσιών (φωνητικής κλήσης, δεδομένων) σε περιοχή όπου το σήμα είναι ασθενές ειδικά για κλήσεις μεγάλης διάρκειας.



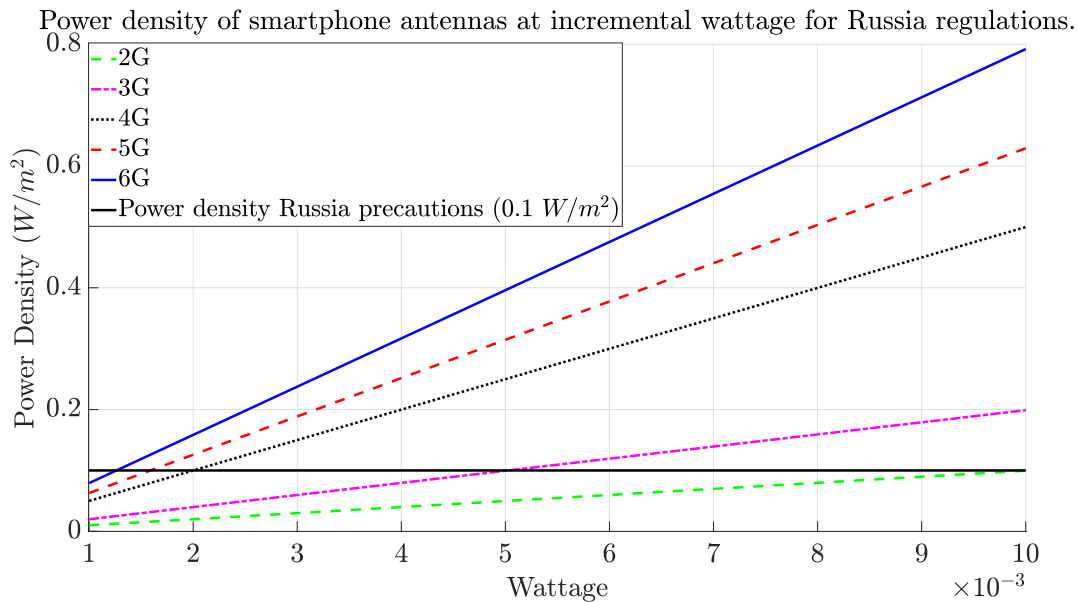
Σχήμα 3.42: Πυκνότητα Ισχύος για μικρές αποστάσεις με όρια της FCC.



Σχήμα 3.43: Πυκνότητα Ισχύος για μικρές αποστάσεις με όρια της Ρωσίας.

Γενιά	Ελάχιστη απόσταση για $P_D=0.1 \text{ W/m}^2$	Ελάχιστη ισχύς για $P_D=0.1 \text{ W/m}^2$ για 2 cm
2G	27.88 cm	10 mW
3G	28.21 cm	5 mW
4G	14 cm	2mW
5G	16 cm	1.58 mW
6G	17.64 cm	1.26 mW

Πίνακας 3.37: Ελάχιστη απόσταση/ισχύς για συμμόρφωση με τα όρια Ρωσίας.



Σχήμα 3.44: Πυκνότητα Ισχύος για απόσταση 2 cm με όρια της Ρωσίας.

3.4 Επίλογος

Στην παρούσα ενότητα συλλέχθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία με σκοπό υλοποίησης εκτενής ανάλυσης της επικινδυνότητας της ακτινοβολίας των κεραιών κάθε γενιάς ξεχωριστά. Τα στοιχεία κάθε γενιάς συλλέχθηκαν με γνώμονα τα χαρακτηριστικά μιας τυπικής κεραιάς σταθμού βάσεως καθώς και κινητού τηλεφώνου της εκάστοτε εποχής, με σκοπό επίτευξης μιας ακριβούς προσομοίωσης της εκπομπής ακτινοβολίας της εκάστοτε εποχής. Για το 6G συγκεκριμένα, πάρθηκαν τα χαρακτηριστικά τυπικών κεραιών που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν, καθώς και ανώτερα χαρακτηριστικά από το αναμενόμενο που σκοπεύουν στην πρόληψη.

Με την χρήση της πυκνότητας ισχύος και της ακτινοβολουμένης ισχύος εύκολα καταλήγουμε σε ξεκάθαρο συμπέρασμα πως οι σταθμοί βάσης δεν θα μπορούν σε καμία περίπτωση να βλάψουν το ανθρώπινο σώμα ανεξαρτήτου γενιάς και ισχύος. Καταλυτικός παράγοντάς του παραπάνω είναι η τεράστια απόσβεση της ακτινοβολίας που προκαλείται λόγω της απόστασης. Ένας ακόμα συντελεστής ελάττωσης της ακτινοβολουμένης ενέργειας είναι η συχνότητα καθώς παρατηρήθηκε σημαντικά δραστική απόσβεση της ενέργειας με την αύξηση της συχνότητας. Αυτό σημαίνει πως η ακτινοβολουμένη ενέργεια των υψηλών συχνοτήτων από τους σταθμούς βάσης του αναμενόμενου 6G (ακριβώς όπως παρατηρείται και στο 5G με τις ακτίνες χλιοστού) θα είναι σημαντικά εξασθενημένη. Η ακτινοβολία που εκπέμπει το κινητό τηλέφωνο είναι ένα αρκετά πιο πολύπλοκο ζήτημα. Από την μια μεριά, όσο ανεβαίνει η συχνότητα, τόσο ανεβαίνει ο βαθμός ειδικής απορρόφησής SAR. Από την άλλη μεριά η ενεργειακή αποδοτικότητα καθώς και το συνεχώς αυξανόμενο κέρδος της κεραιάς των κινητών συσκευών έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της μέγιστης ισχύος των μεταγενέστερων γενναίων (4G, 5G) και είναι πολύ πιθανό να υπάρξει περαιτέρω βελτίωση στα δίκτυα 6ης γενιάς, η οποία θα ελαττώσει το SAR. Στις μετρήσεις πυκνότητας ισχύος κοντινής ζώνης έγινε φανερό το κατά πόσο οι βελτιώσεις του 4G, 5G και του 6G περιορίζουν την ποσότητα της ακτινοβολίας. Οι συχνότητες των επικοινωνιών δεν είναι επιβλαβής από μόνες τους αρκεί να παρθούν τα σχετικά μέτρα όσον αφορά την ακτινοβολία των κινητών συσκευών, συγκεκριμένα για τυχόν επιπτώσεις στα μάτια και στον εγκέφαλο. Καθώς και η αύξηση της συχνότητας προκαλεί

σημαντική αύξηση της απόσβεσης της ακτινοβολούμενης ενέργειας, και για να αποφευχθεί η ανάγκη ακτινοβολίας μεγάλης ισχύς (και άρα μεγάλου δείκτη SAR), είναι αναγκαίο το 6G να είναι ένα δίκτυο με πυκνή κάλυψη κάτι στο οποίο η χρήση φανοστατών θα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Τα όριά που έχει θεσπίσει η Ρωσία, πολύ πιθανό να αποφέρουν προβλήματα στην επικοινωνία και στην κάλυψή, καθώς οι σταθμοί βάσης θα πρέπει να είναι πιο μακριά μεταξύ τους και από τους ανθρώπους με αποτέλεσμα να μην πληρούνται οι παραπάνω απαιτήσεις πυκνής κάλυψής. Επιπρόσθετα, τα κινητά τηλέφωνα τους θα πρέπει να περιορίσουν την μέγιστη ισχύ τους 10 με 100 φορές παραπάνω από αυτά του υπόλοιπου κόσμου καθιστώντας έτσι την εγκαθίδρυση ενός γρήγορου και λειτουργικού δικτύου 6ης γενιάς στην Ρωσία ένα δύσκολο ζήτημα.

Κεφάλαιο 4ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα θα συγκεντρωθούν τα συμπεράσματα των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων της πτυχιακής εργασίας καθώς και τυχόν προτάσεις βελτίωσης και επιπλέον μελέτες που θα μπορούσαν να βασιστούν σε αυτήν. Τέλος θα γίνει μια γενική ανασκόπηση του σκοπού και της θεματολογίας της εργασίας.

4.2 Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Όπως φαίνεται στους πίνακες 3.24,3.25,3.26, είναι πλέον ξεκάθαρο πως οι σταθμοί βάσης δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να βλάψουν τον απλό πολίτη καθώς η απόσβεση που προκαλείται από την απόσταση είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα. Το παραπάνω (με την προϋπόθεσή πως ένας σταθμός βάσης απέχει τουλάχιστον 100 μέτρα από έναν κοινό πολίτη) είναι γεγονός σε οποιαδήποτε γενιά τηλεπικοινωνιών τόσο για τους κανονισμούς της FCC και της ICNRIP όσο και της Ρωσίας. Στην περίπτωση των εργαζομένων των σταθμών βάσεων θα πρέπει να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα, ώστε να μην υπάρχει καμία περίπτωση ένας εργαζόμενος να πλησιάσει περισσότερο από τα όρια σύμφωνα με τον πίνακα 3.25. Το παραπάνω καθιστά την αυτοδιόρθωση σφαλμάτων μέσω αλγορίθμων και τεχνητής νοημοσύνης αναγκαία προϋπόθεσή για την δημιουργία ενός αδιάλειπτου δικτύου 6^{ης} γενιάς υψηλής συχνότητάς και κατά συνέπεια και ρυθμού δεδομένων.

Ενδεχόμενο κίνδυνου υπάρχει μόνο στην περίπτωση των κινητών τηλεφώνων λόγω της μικρής απόστασης εκπομπής από τον άνθρωπο. Τα κινητά τηλέφωνα θα πρέπει να συνεχίζουν να εξετάζονται και να ελέγχονται από την FCC και την ICNRIP όπως γίνεται και σήμερα, ώστε να είναι σίγουρο ότι κάθε συσκευή συμμορφώνεται με τους εκάστοτε κανονισμούς. Μη επαρκής και ελλιπώς υπολογισμένη κάλυψή του 6G θα μπορούσε να επιφέρει περιορισμένες επιπτώσεις στην σωματική υγεία. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός πως κάθε μέρος του σώματος αντιδρά διαφορετικά στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Όπως φάνηκε και από την ενότητα 4, τα μάτια, ο εγκέφαλος και το κεφάλι γενικότερα είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στην ακτινοβολία, σε αντίθεση με τα οστά και το δέρμα. Καθώς ο μέσος χρήστης τοποθετεί το ακουστικό του κινητού τηλεφώνου στο κεφάλι για να μιλήσει, η απόσταση μεταξύ πομπού (κεραίας τηλεφώνου) και δέκτη (ανθρώπινο σώμα-κεφάλι) είναι ιδιαίτερα μικρή. Παρόλα αυτά, η εκτιμώμενη ακτινοβολία που θα απορροφάται από το ανθρώπινο κεφάλι δεν θα είναι επιβλαβής για τα όρια της FCC και της INCRIP. Ωστόσο καθώς πολλές χώρες τείνουν να έχουν μικροτέρα όρια, όπως η Ρωσία, θα ήταν συνετή η εφαρμογή ενός προληπτικού αλγορίθμου με την δυνατότητα περαιτέρω περιορισμού της ισχύος όταν ο χρήστης μιλάει στο τηλέφωνο και δεν χρησιμοποιεί κάποιο ασύρματο τρόπο επικοινωνίας όπως τα ακουστικά. Μία διαφορετική προσέγγιση είναι η αξιοποίηση των ολοένα και αυξανόμενων αισθητήρων των έξυπνων κινητών τηλεφώνων με σκοπό την εξακρίβωση αν ο χρήστης ακουμπά ή έχει κοντά στο κεφάλι του την συσκευή και να γίνεται περιορισμός της ισχύος μόνο τότε. Με την προϋπόθεση ενός πυκνού δικτύου, οι παραπάνω περιορισμοί θα λαμβάνουν χώρα μόνο σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται εκτενή χρήση και ο χρήστης εκτελεί διαδικασίες δικτύου με ανάγκη μεγάλου ρυθμού δεδομένων καθώς πραγματοποιεί την κλήση. Σε αυτήν και μόνο την περίπτωση το κινητό θα περιορίσει την ισχύ και κατά συνέπεια τον ρυθμό δεδομένων για την προληπτική προφύλαξη του χρήστη. Σε σενάριο όπου ο χρήστης

βρίσκεται σε απομακρυσμένη περιοχή όπου δεν υπάρχει επαρκής κάλυψη και η κεραία του κινητού θα πρέπει να αυξήσει την ισχύ της στο μέγιστο, δεν θα γίνεται χρήση υψηλών συχνοτήτων (λόγω της περιορισμένης εμβέλειας τους) άρα η ποσότητα απορροφούμενης ακτινοβολίας θα είναι μειωμένη, όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις στην ενότητα 3.2.4.

Ίσως τον πιο σημαντικό περιορισμό της παρούσας εργασίας αποτελεί η έλλειψη κανονισμών για τον ρυθμό ειδικής απορρόφησης σε συχνότητες πάνω από 10 GHz. Τα όρια του SAR υπολογίστηκαν με έμμεσο τρόπο υπολογίζοντας πειραματικά την ακτινοβολία που απογραφόταν από το σώμα σε συγκεκριμένη, κάθε φορά, συχνότητα. Με τον ίδιο τρόπο θα πρέπει να υπολογιστεί και για τις συχνότητες χιλιοστόμετρου (mmWave) καθώς και για τις συχνότητες THz και να θεσπιστούν νέα όρια για τις προαναφερόμενες συχνότητες, παρέχοντας έτσι την δυνατότητα εύκολου εντοπισμού τυχόν ηλεκτρομαγνητικών κινδύνων στις υψηλές συχνότητες. Όταν πραγματοποιηθεί το παραπάνω, και με υποστήριξη των αποτελεσμάτων της προκειμένης πτυχιακής, εύκολα μπορούν να βγουν σαφή συμπεράσματα για το ποιες συχνότητες είναι ασφαλείς και για ποια μέγιστη ισχύ. Επιπρόσθετα, θα ήταν συνετό να γίνει ανάλυση των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών και κατά συνέπεια της απορροφούμενης ακτινοβολίας και για άλλα σημεία του ανθρώπινου σώματος, όπως το αίμα και όργανα όπως η καρδιά ώστε να υπάρχει μια λεπτομερής εικόνα για το ποια μέλη του σώματος είναι ευάλωτα και κατά ποσό και να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα, εάν και όπου κριθεί αυτό απαραίτητο. Επιπρόσθετα, όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί κοντινής ζώνης θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν πειραματικά και να συγκριθούν τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά της προσομοίωσης.

4.3 Επίλογος

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκε αναδρομικά η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών γενικότερα, καθώς και οι ιδιότητες τα χαρακτηριστικά οι δυνατότητές και τα προβλήματά της κάθε γενιάς τηλεπικοινωνιών. Όπως είδαμε κάθε γενιά έφερνε νέες καινοτομίες, ιδέες και βελτιώσεις άλλα προέκυπταν ολοένα και περισσότερες απαιτήσεις, ανησυχίες και ανοιχτά προβλήματα που συνήθως έσπευδε να αντιμετωπίσει η επόμενη γενιά. Για παράδειγμα η ασφάλεια και η κρυπτογράφηση δεν ήταν μια κύρια ανησυχία κατά την εγκαθίδρυση του δικτύου 2^{ης} γενιάς καθώς δόθηκε εστίαση στην πανταχού επίγεια κάλυψη του δικτύου. Ωστόσο με την επίτευξη του στόχου του 2G, τα κενά ασφαλείας του 2G γρήγορα έγιναν αντιληπτά τα οποία δρομολογήθηκαν να καλυφθούν με το 3G. Παρομοίως το 3G και το 4G δεν δημιουργήθηκαν με σκοπό την κάλυψη τεράστιου αριθμού χρηστών, καθώς και την υλοποίηση του αυτοματισμού (έξυπνων πόλεων), AI και IOE και κατά συνέπεια του ρυθμού δεδομένων που απαιτείται. Τις παραπάνω απαιτήσεις τείνει να αντιμετωπίσει σε ένα βαθμό το 5G και εκτενέστερα το 6G. Για την επίτευξη αυτών στον στόχων είναι αναγκαία η διεύρυνση του ρυθμού δεδομένων και του διαθέσιμου εύρους ζώνης, όπως και θα γίνει με το 6G. Για αυτόν τον σκοπό έγινε μελέτη των ιδιοτήτων των εφαρμογών και των πιθανών κινδύνων του 6G. Όπως ακριβώς συνέβη και στο 5G, αλλά και τους προκατόχους του, έτσι και κατά την μετάβαση στο 6G θα υπάρχουν εντάσεις και προβληματισμοί από το ευρύ κοινό, κάτι το οποίο είναι λογικό. Ωστόσο, μετά από την λεπτομερή ανάλυση που έγινε όσον αφορά τις συχνότητες THz αλλά και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και των ιδιοτήτων της γενικότερα. Από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, συμπεραίνουμε πως δεν υπάρχει λόγος ανησυχίας. Βέβαια, εφόσον αναφερόμαστε σε ζητήματα υγείας, χρήζει αναγκαίο να συνεχιστούν οι μελέτες περαιτέρω, και να εξεταστούν τυχόν θερμικές επιπλοκές που ενδεχομένως να προκαλέσει η ακτινοβολία THz στον άνθρωπο και ιδίως στην

ομοιότητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] H. Zhang, *The History of Microwave Heating*, p. 13. Woodhead Publishing Series, 01 2017.
- [2] J. H. Reed, J. T. Bernhard, and J.-M. Park, “Spectrum access technologies: The past, the present, and the future,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1676–1684, 2012.
- [3] H. Mehta, D. Patel, B. Joshi, and H. Modi, “0g to 5g mobile technology: A survey,” in *ASCIET*, 09 2014.
- [4] M. S. Sim, M. Chung, D. Kim, J. Chung, D. K. Kim, and C.-B. Chae, “Nonlinear self-interference cancellation for full-duplex radios: From link-level and system-level performance perspectives,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 158–167, 2017.
- [5] J. Gomez, “0g: Mobile radio telephone,” in *Third generation mobile technology and its evolution towards fourth generation*, 2009.
- [6] S. Ray, “Beyond lte (part 1): 0g and the birth of the mobile radio phone.” https://www.phonearena.com/news/Beyond-LTE-Part-1-0G-and-the-birth-of-the-mobile-radio-phone_id37843, 2013. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Απριλίου 2023.
- [7] A. Solyman and K. Yahya, “Evolution of wireless communication networks: from 1g to 6g and future perspective,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 12, p. 3943, 08 2022.
- [8] M. P. Museum, “Motorola dynatac 8000x.” <https://www.mobilephonemuseum.com/phone-detail/dynatac-8000x>. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Μαρτίου 2023.
- [9] A. F. M. Shahen Shah, “A survey from 1g to 5g including the advent of 6g: Architectures, multiple access techniques, and emerging technologies,” in *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, pp. 1117–1123, 2022.
- [10] S. A. A. Hakeem, H. H. Hussein, and H.-C. Kim, “Security requirements and challenges of 6g technologies and applications,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 22, 2022.
- [11] VIJAY, “20 most influential mobile phones of all time.” <https://www.twodecimal.com/featured/20-most-influential-mobile-phones-of-all-time/>, 14 Φεβρουαρίου, 2017. Ημερομηνία πρόσβασης: 11 Οκτωβρίου 2023.
- [12] Z. W. Liu, “What is gsm?.” <https://www.linkedin.com/pulse/what-gsm-stone-liu>. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Μαρτίου 2023.
- [13] desertchart, “1pmobile 2g sim card - pre-loaded with £10 credit.” <https://www.desertcart.in/products/67727385-1-p-mobile-2-g-sim-card-pre-loaded-with-10-credit>. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Νοεμβρίου 2023.
- [14] A. Lamba, J. Yadav, and G. U. Devi, “Analysis of technologies in 3g and 3.5g mobile networks,” in *2012 International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, pp. 330–333, 2012.

- [15] Vodafone, “25 years since the world’s first text message.” <https://www.vodafone.com/news/technology/25-anniversary-text-message>. Ημερομηνία πρόσβασης: 24 Φεβρουαρίου 2024.
- [16] D. Flair, “Cdma vs gsm – difference between gsm and cdma.” <https://data-flair.training/blogs/cdma-vs-gsm/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 1 Νοεμβίου 2023.
- [17] D. A. A. Mat, F. K. W. Tat, K. Kipli, A. Joseph, K. Lias, and A. S. W. Marzuki, “Visualization and analytical measurement of electromagnetic radiation from handheld mobile phones,” in *2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications*, vol. 2, pp. 246–250, 2010.
- [18] I. M. TELECOMMUNICATIONS, “Imt-2000 network aspects.” <https://www.itu.int/en/ITU-T/imt-2000/Pages/default.aspx>. Ημερομηνία πρόσβασης: 10 Απριλίου 2024.
- [19] R. Zeqiri, F. Idrizi, and H. Halimi, “Comparison of algorithms and technologies 2g, 3g, 4g and 5g,” in *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, pp. 1–4, 2019.
- [20] X. Li, J. Niu, S. Kumari, K. Khan, J. Liao, and W. Liang, “Design and analysis of a chaotic maps-based three-party authenticated key agreement protocol,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 80, 05 2015.
- [21] Cablefree, “Lte-a carrier aggregation ..” <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-carrier-aggregation/>, 2022. Ημερομηνία πρόσβασης: 28 Νοεμβίου 2023.
- [22] G. team, “A global partnership.” <https://www.3gpp.org/component/sppagebuilder/?view=page&id=56&Itemid=159>. Ημερομηνία πρόσβασης: 20 Φεβρουαρίου 2024.
- [23] G. Ray, “How iot devices operates and communicates itself: A brief explanation.” <https://www.eetasia.com/how-iot-devices-operates-and-communicates-itself-a-brief-explanation/>, 2022. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Μαΐου 2023.
- [24] B. M. Shah, M. Murtaza, and M. Raza, “Comparison of 4g and 5g cellular network architecture and proposing of 6g, a new era of ai,” in *2020 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA)*, pp. 1–10, 2020.
- [25] A. Freedman, “International mobile telecommunications - advanced tutorial highlights,” in *2009 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems*, pp. 1–2, 2009.
- [26] S. Kumar and N. Marchetti, “Imt-advanced: Technological requirements and solution components,” in *2009 Second International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management*, pp. 1–5, 2009.
- [27] T. Sharma, K. Ritesh, N. Chauhan, and S. Agarwal, “Analogous study of 4g and 5g,” in *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, pp. 2137–2140, 2016.

- [28] Navita and Amandeep, “Performance analysis of ofdma, mimo and sc-fdma technology in 4g lte networks,” in *2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering (Confluence)*, pp. 554–558, 2016.
- [29] A. Networks, “Ofdma (orthogonal frequency division multiple access).” <https://www.artizanetworks.com/resources/tutorials/ofdma.html>, 2018. Ημερομηνία πρόσβασης: 15 Απριλίου 2023.
- [30] C. S. Analysis, “Fundamentals of mimo communication in wireless systems.” <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/fundamentals-of-mimo-communication-in-wireless-systems>. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Απριλίου 2023.
- [31] A. M. Elbir, K. V. Mishra, S. A. Vorobyov, and R. W. Heath, “Twenty-five years of advances in beamforming: From convex and nonconvex optimization to learning techniques,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 40, no. 4, pp. 118–131, 2023.
- [32] N. Gupta and A. K. Jagannatham, “Multiuser successive maximum ratio transmission (ms-mrt) for video quality maximization in unicast and broadcast mimo ofdma-based 4g wireless networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 7, pp. 3147–3156, 2014.
- [33] N. R. Deepak and S. Balaji, “Performance analysis of mimo-based transmission techniques for image quality in 4g wireless network,” in *2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)*, pp. 1–5, 2015.
- [34] X. Gao, O. Edfors, F. Rusek, and F. Tufvesson, “Linear pre-coding performance in measured very-large mimo channels,” in *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp. 1–5, 2011.
- [35] A. Alamayreh, N. Qasem, and J. S. Rahhal, “Pre-coding oam based mimo system for multi-user communications,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 125411–125420, 2022.
- [36] A. Younis, N. Serafimovski, R. Mesleh, and H. Haas, “Generalised spatial modulation,” in *2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 1498–1502, 2010.
- [37] S. B. Patel, D. V. Chauhan, and J. D. Patel, “Spatial modulation: Challenges and potential solutions,” in *2021 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*, pp. 1–8, 2021.
- [38] M. Watwani, “4 antennas help lte achieve 1 gigabit per second speeds allowing for novel applications.” <https://www.telit.com/blog/4x4-mimo-antennas-for-lte-gigabit-speed/>, 2018. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Απριλίου 2023.
- [39] F. Al-Turjman, E. Ever, and H. Zahmatkesh, “Small cells in the forthcoming 5g/iot: Traffic modelling and deployment overview,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 28–65, 2019.
- [40] I. Rubin, Y.-Y. Lin, A. Baiocchi, F. Cuomo, and P. Salvo, “Micro base station aided vehicular ad hoc networking,” in *2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pp. 231–235, 2014.

- [41] M. Belkin, T. Bakhvalova, and D. Fofanov, “Studying 5g pico-cell base station as fiber to millimeter-band wireless interface,” in *2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, pp. 1–5, 2019.
- [42] M. Cudak, W. J. Hillery, A. Ghosh, Z. Huang, and B. Vejlgaard, “Addressing 4g demand: Picos vs. macros, a suburban case study,” in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–5, 2013.
- [43] N. Obaid and A. Czylik, “The impact of deploying pico base stations on capacity and energy efficiency of heterogeneous cellular networks,” in *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1904–1908, 2013.
- [44] Q. Alsafasfeh, O. A. Saraereh, A. Ali, L. Al-Tarawneh, I. Khan, and A. Silva, “Efficient power control framework for small-cell heterogeneous networks,” *Sensors*, vol. 20, no. 5, 2020.
- [45] M. F. Abughalia, S. Tasmeeh Ahsan, and S. Saha, “Comparative study of microcell’s performance using different models in different regions,” in *2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, pp. 517–521, 2019.
- [46] L. Wang and A. M. Wyglinski, “Detection of man-in-the-middle attacks using physical layer wireless security techniques,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 16, no. 4, pp. 408–426, 2016.
- [47] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, “6g wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957–975, 2020.
- [48] A. P. K. Reddy, M. S. Kumari, V. Dhanwani, A. K. Bachkaniwala, N. Kumar, K. Vasudevan, S. Selvaganapathy, S. K. Devar, P. Rathod, and V. B. James, “5g new radio key performance indicators evaluation for imt-2020 radio interface technology,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 112290–112311, 2021.
- [49] F. Gebreyohannes, *Scalable Digital-to-RF Processor for Multi-standard and Multi-band Low Power Wireless Transmitter in 5 GHz and 60 GHz*. PhD thesis, Atomic Energy and Alternative Energies Commission, 12 2016.
- [50] EITC, “Millimeter wave spectrum..” <http://www.eitc.org/research-opportunities/5g-and-beyond-mobile-wireless-technology/5g-and-beyond-technology-roadmap/radio-spectrum-signal-processing-and-beamforming/millimeter-wave-spectrum>, 2012. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Νοεμβρίου 2023.
- [51] A. Gupta, O. J. Pandey, M. Shukla, A. Dadhich, S. Mathur, and A. Ingle, “Computational intelligence based intrusion detection systems for wireless communication and pervasive computing networks,” in *2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, pp. 1–7, 2013.

- [52] I. Parvez, A. Rahmati, I. Guvenc, A. I. Sarwat, and H. Dai, “A survey on low latency towards 5g: Ran, core network and caching solutions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3098–3130, 2018.
- [53] Deepender, Manoj, U. Shrivastava, and J. K. Verma, “A study on 5g technology and its applications in telecommunications,” in *2021 International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)*, pp. 365–371, 2021.
- [54] M. Nekovee, “Transformation from 5g for verticals towards a 6g-enabled internet of verticals,” in *2022 14th International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS)*, pp. 1–6, 2022.
- [55] X. Shen, J. Gao, W. Wu, K. Lyu, M. Li, W. Zhuang, X. Li, and J. Rao, “Ai-assisted network-slicing based next-generation wireless networks,” *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 1, pp. 45–66, 2020.
- [56] S. A. AlQahtani, “Cooperative-aware radio resource allocation scheme for 5g network slicing in cloud radio access networks,” *Sensors*, vol. 23, no. 11, 2023.
- [57] M. Tahir, M. H. Habaebi, M. Dabbagh, A. Mughees, A. Ahad, and K. I. Ahmed, “A review on application of blockchain in 5g and beyond networks: Taxonomy, field-trials, challenges and opportunities,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 115876–115904, 2020.
- [58] Q. Waseem, W. Isni Sofiah Wan Din, A. Aminuddin, M. Hussain Mohammed, and R. F. Alfa Aziza, “Software-defined networking (sdn): A review,” in *2022 5th International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, pp. 30–35, 2022.
- [59] H. Abdelgader Eissa, K. A. Bozed, and H. Younis, “Software defined networking,” in *2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, pp. 620–625, 2019.
- [60] P. K. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess, and A. Benjebbour, “Design considerations for a 5g network architecture,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 11, pp. 65–75, 2014.
- [61] R. Liu, H. Lin, H. Lee, F. Chaves, H. Lim, and J. Sköld, “Beginning of the journey toward 6g: Vision and framework,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 10, pp. 8–9, 2023.
- [62] G. Liu, Y. Huang, N. Li, J. Dong, J. Jin, Q. Wang, and N. Li, “Vision, requirements and network architecture of 6g mobile network beyond 2030,” *China Communications*, vol. 17, no. 9, pp. 92–104, 2020.
- [63] A. A. Z. Ibrahim, F. Hashim, A. Sali, N. K. Noordin, and S. M. E. Fadul, “A multi-objective routing mechanism for energy management optimization in sdn multi-control architecture,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 20312–20327, 2022.
- [64] J. Kaur and M. A. Khan, “Sixth generation (6g) wireless technology: An overview, vision, challenges and use cases,” in *2022 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, pp. 1–6, 2022.

- [65] M. Alsabah, M. A. Naser, B. M. Mahmmod, S. H. Abdhussain, M. R. Eissa, A. Al-Baidhani, N. K. Noordin, S. M. Sait, K. A. Al-Utaibi, and F. Hashim, “6g wireless communications networks: A comprehensive survey,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 148191–148243, 2021.
- [66] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow, and M. N. Hindia, “An overview of internet of things (iot) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3758–3773, 2018.
- [67] C. S. More and N. T. Markad, “A systematic overview of high speed communication,” in *2023 International Conference on Advances in Computing, Communication and Applied Informatics (ACCAI)*, pp. 1–9, 2023.
- [68] S. Elmeadawy and R. Shubair, “6g future wireless communications: Future technologies and research challenges,” 02 2020.
- [69] M. . S. Ikram, K. . Lateef, M. F. . Alqadami, and A. S. M., “A Road towards 6G Communication□a Review of 5G Antennas, Arrays, and Wearable Devices,” *Electronics 2022*, vol. 11, no. 169., 2022.
- [70] S. Jabo, “Machine vision for wood defect detection and classification,” in *Materials Science*, 2011.
- [71] M. Wu, Y. Xiao, Y. Gao, and X. Lei, “Design of quality-of-experience criteria for resource allocation toward 6g wireless networks: A review and new directions,” in *2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*, pp. 1–7, 2022.
- [72] N. Rajatheva, I. Atzeni, E. Bjornson, A. Bourdoux, S. Buzzi, J.-B. Doré, S. Erkucuk, M. Fuentes, K. Guan, Y. Hu, X. Huang, J. Hulkkonen, J. M. Jornet, M. D. Katz, R. Nilsson, E. Panayirci, K. M. Rabie, N. Rajapaksha, M. J. Salehi, H. Sardeddeen, T. Svensson, O. Tervo, A. Tolli, Q. Wu, and W. Xu, “White paper on broadband connectivity in 6g,” *arXiv: Signal Processing*, 2020.
- [73] Y. Qian, H. Deng, A. Guo, H. Xiao, C. Peng, and Y. Zhang, “Beamforming design for cooperative intelligent reflecting surface-assisted mmwave communication,” *Sensors*, vol. 22, no. 16, 2022.
- [74] H. Zhang, L. Song, and Z. Han, *Overview of 5G and Beyond Communications*, pp. 1–25. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [75] G. Karabulut Kurt, M. G. Khoshkholgh, S. Alfattani, A. Ibrahim, T. S. J. Darwish, M. S. Alam, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, “A vision and framework for the high altitude platform station (haps) networks of the future,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 729–779, 2021.
- [76] Q. Ren, O. Abbasi, G. K. Kurt, H. Yanikomeroglu, and J. Chen, “High altitude platform station (haps) assisted computing for intelligent transportation systems,” in *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, 2021.
- [77] X. Shen, Z. Wei, and Z. Feng, *A Novel Algorithm of UAV-Mounted Base Station Placement and Frequency Allocation*, pp. 182–193. Beijing University of Posts and Telecommunications, 01 2018.
- [78] X. Zhu and C. Jiang, “Creating efficient integrated satellite-terrestrial networks in the 6g era,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 29, no. 4, pp. 154–160, 2022.

- [79] R. Ding, T. Chen, L. Liu, Z. Zheng, Y. Hao, H. Zheng, W. Wang, and L. You, “5g integrated satellite communication systems: Architectures, air interface, and standardization,” in *2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp. 702–707, 2020.
- [80] X. Zhu and C. Jiang, “Creating efficient integrated satellite-terrestrial networks in the 6g era,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 29, no. 4, pp. 154–160, 2022.
- [81] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, “A vision of 6g wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2020.
- [82] E. C. Strinati, S. Barbarossa, J. L. Gonzalez-Jimenez, D. Kténas, N. Cassiau, and C. Dehos, “6g: The next frontier,” *2019*, 2019.
- [83] J. Erfanian, D. Lister, Q. Zhao, G. Wikström, and Y. Chen, “6g vision & analysis of potential use cases,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 4, pp. 12–14, 2023.
- [84] T. A. Kuzovkova, O. I. Sharavova, V. O. Tikhvinskiy, and E. E. Devyatkin, “Matching of 6g network capabilities to digital services requirements,” in *2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 1–5, 2022.
- [85] E. Peltonen, M. Bennis, M. Capobianco, M. Debbah, A. Ding, F. Gil-Castiñeira, M. Jurmu, T. Karvonen, M. Kelanti, A. Kliks, T. Leppänen, L. Lovén, T. Mikkonen, A. Rao, S. Samarakoon, K. Seppänen, P. Sroka, S. Tarkoma, and T. Yang, “6g white paper on edge intelligence,” 2020.
- [86] H. Cao, W. Zhu, W. Feng, and J. Fan, “Robust beamforming based on graph attention networks for irs-assisted satellite iot communications,” *Entropy*, vol. 24, no. 3, 2022.
- [87] P. Research, “Edge computing market forecast 2023 to 2032.” <https://www.precedenceresearch.com/edge-computing-market/>, 2022. Ημερομηνία πρόσβασης: 28 Ιουνίου 2023.
- [88] Y. Zhao, “(2020),” *A Survey of 6G Wireless Communications: Emerging Technologies*, vol. 10., 2020.
- [89] F. Tariq, M. Khandaker, K.-K. Wong, M. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, “A speculative study on 6G,” *2019*, 2019.
- [90] IEEE, “Ieee recommended practices for modulating current in high-brightness leds for mitigating health risks to viewers,” *IEEE Std 1789-2015*, pp. 1–80, 2015.
- [91] G. Xin, P. Fan, and K. B. Letaief, “Semantic communication: A survey of its theoretical development,” *Entropy*, vol. 26, no. 2, 2024.
- [92] S. Nayak and R. Patgiri, “6g communication: Envisioning the key issues and challenges,” *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, vol. 6, p. 166959, 11 2020.
- [93] Y. Siriwardhana, P. Porambage, M. Liyanage, and M. Ylianttila, “Ai and 6g security: Opportunities and challenges,” in *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, pp. 616–621, 2021.

- [94] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, “Vision, requirements, and technology trend of 6g: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, 2020.
- [95] W. Brown, “The history of power transmission by radio waves,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1230–1242, 1984.
- [96] H. Behrens, “Artist’s impression of a gamma-ray burst..” <https://www.quora.com/What-was-the-range-of-the-WWII-so-called-walkie-talkie-and-what-two-way-radio-deployed-by-the-US-had-a-greater-range-than-the-walkie-talkie>, 2023. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Ιουνίου 2023.
- [97] A. Zlotorzynski, “The application of microwave radiation to analytical and environmental chemistry,” *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, vol. 25, no. 1, pp. 43–76, 1995.
- [98] Panasonic, “Panasonic’s first household microwave launched in 1966..” <https://blogs.panasonic.com.au/consumer/flashing-back-to-the-humble-microwave-oven/>, 2018. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Μαΐου 2023.
- [99] R. Buderer, *The Invention That Changed the World: How a Small Group of Radar Pioneers Won the Second World War and Launched a Technical Revolution*. New York, NY, USA: Simon and Schuster, 1996.
- [100] D. R. Slocombe and A. Porch, “Microwaves in chemistry,” *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 32–42, 2021.
- [101] S. Lab, “Lab continuous radiation microwave chemical reactor.” <https://stonylab.com/products/sb-hj-wbxfyq-microwave-chemical-reactor>. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Δεκεμβρίου 2023.
- [102] R. W. World, “Infrared communication basics | irda | ir,infrared tutorial..” <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/Infrared-Communication-IrDA-tutorial.html/>, 2019. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Μαΐου 2023.
- [103] S.-R. Tsai and M. R. Hamblin, “Biological effects and medical applications of infrared radiation,” *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 170, pp. 197–207, 2017.
- [104] T. Yamasaki, T. Nakamura, K. Baba, and H. Yasuura, “A door access control system with mobile phones,” *0*, 01 2007.
- [105] W. Li, C. Zhao, Z. Lv, Z. Cheng, and Z. Liu, “The study of visible light communication based on led array cube display,” in *2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, pp. 1–4, 2020.
- [106] T. Wang and Z. Zhao, “An implementation of visible light communication based on raspberry pi,” in *2018 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)*, pp. 218–219, 2018.
- [107] J. Hisert, “How indium is used to make leds..” <https://www.indium.com/blog/how-indium-is-used-to-make-leds.php/>, 2017. Ημερομηνία πρόσβασης: 25 Ιουνίου 2023.

- [108] M. Hulea and X. Tang, “Mitigation method for the solar irradiation effect in visible light communications,” in *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, pp. 1–5, 2020.
- [109] B. Bhad and K. Akant, “Experimental cansat for measurment of uv radiation,” in *2019 9th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology - Signal and Information Processing (ICETET-SIP-19)*, pp. 1–4, 2019.
- [110] M. C. Jain, M. Alijani, B. D. Wiltshire, J. M. Macak, and M. H. Zarifi, “High resolution ultra-violet radiation detection using tnt-integrated wireless passive microwave resonator,” in *2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2022*, pp. 133–136, 2022.
- [111] P. T. Strickland, “Photocarcinogenesis by near-ultraviolet (UVA) radiation in sencar mice,” *Journal of Investigative Dermatology*, vol. 87, pp. 272–275, Aug. 1986.
- [112] M. B. Mustapha, B. Mrabet, L. Bouslimi, A. Chammam, and M. Stambouli, “Effect of a pulsed power supply on the ultra violet radiation and electrical characteristics of low pressure mercury discharge,” in *2008 3rd International Design and Test Workshop*, pp. 319–324, 2008.
- [113] R. K. Moozhipurath, L. Kraft, and B. Skiera, “Evidence of protective role of ultraviolet-b (UVB) radiation in reducing COVID-19 deaths,” *Scientific Reports*, vol. 10, Oct. 2020.
- [114] P. Chanprakon, T. Sae-Oung, T. Treebupachatsakul, P. Hannanta-Anan, and W. Piyawattanametha, “An ultra-violet sterilization robot for disinfection,” in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, pp. 1–4, 2019.
- [115] “Uvc led light sterilizer box 59s).” <https://www.pinkglambox.com/products/59s-uvc-led-light-sterilizer-box>. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Δεκεμβρίου 2023.
- [116] A. Vavoulas, H. G. Sandalidis, N. D. Chatzidiamantis, Z. Xu, and G. K. Karagiannidis, “A survey on ultraviolet c-band (uv-c) communications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2111–2133, 2019.
- [117] D. N. Shubin, E. M. Lobov, and V. O. Varlamov, “Overview of the nlos ultraviolet communication technology,” in *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 1–6, 2020.
- [118] D. F. Gaillard, “Pulmonary oedema..” https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Pulmonary_oedema.jpg/, 2011. Ημερομηνία πρόσβασης: 25 Ιουνίου 2023.
- [119] A. Hessenbruch, “A brief history of x-rays,” *Endeavour*, vol. 26, no. 4, pp. 137–141, 2002.
- [120] R. Clarke and J. Valentin, “The history of icrp and the evolution of its policies,” *Annals of the ICRP*, vol. 39, no. 1, pp. 75–110, 2009. ICRP Publication 109.
- [121] C. H, R. MM, and A. JN., *Advances in functional X-ray imaging techniques and contrast agents*. Phys Chem Chem Phys, 2012.

- [122] C. Navia and M. N. de Oliveira, “Gamma rays from space,” in *New Insights on Gamma Rays* (A. M. Maghraby, ed.), ch. 4, Rijeka: IntechOpen, 2017.
- [123] A. Roquette, “Artist’s impression of a gamma-ray burst.” <https://www.eso.org/public/czechrepublic/images/eso0917a/?lang/>, 2009. Ημερομηνία πρόσβασης: 25 Ιουνίου 2023.
- [124] G. Liu, L. Hu, G. Zhong, S. Liu, M. Yi, R. Zhou, K. Li, and H. Cao, “Study of gamma rays’ dose rates in the east hall,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 48, no. 5, pp. 1303–1308, 2020.
- [125] “A revolution in care. gamma knife treatments radiosurgery using sophisticated technology .” <https://miamineurosciencecenter.com/en/services/gamma-knife-radiosurgery/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 22 Δεκεμβρίου 2023.
- [126] J. Zhang, S. Li, and W. Le, “Advances of terahertz technology in neuroscience: Current status and a future perspective,” *iScience*, vol. 24, p. 103548, Dec. 2021.
- [127] W. H. Organization, □*Electromagnetic fields and public health: mobile phones*□. <https://www.who.int/> (accessed, Oct. 2022).
- [128] M. Ciano, J. R. Burlin, R. Pardoe, R. L. Mills, and V. R. Hentz, “High-frequency electromagnetic radiation injury to the upper extremity: Local and systemic effects,” *Annals of plastic surgery*, vol. 7, no. 2, pp. 128–135, 1981.
- [129] R. H. Brodtkin and J. Bleiberg, “Cutaneous microwave injury. a report of two cases,” *Acta Dermato-Venereologica*, vol. 53, no. 1, pp. 50–52, 1973.
- [130] S. D. LeVine, *The Active Denial System: A revolutionary, non-lethal weapon for today’s battlefield*. Center for Technology and National Security Policy, National Defense University, 2009.
- [131] B. C. Q. Truong, H. D. Tuan, H. H. Kha, and H. T. Nguyen, “Debye parameter extraction for characterizing interaction of terahertz radiation with human skin tissue,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 60, no. 6, pp. 1528–1537, 2013.
- [132] K. Yang, N. Chopra, Q. H. Abbasi, K. A. Qaraqe, and A. Alomainy, “Collagen analysis at terahertz band using double-debye parameter extraction and particle swarm optimisation,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 27850–27856, 2017.
- [133] I. V. Il’ina, D. S. Sitnikov, and M. B. Agranat, “State-of-the-art of studies of the effect of terahertz radiation on living biological systems,” *High Temperature*, vol. 56, pp. 789–810, Sept. 2018.
- [134] A. I. Nikitkina, P. Y. Bikmulina, E. R. Gafarova, N. V. Kosheleva, Y. M. Efremov, E. A. Bezrukov, D. V. Butnaru, I. N. Dolganova, N. V. Chernomyrdin, O. P. Cherkasova, A. A. Gavdush, and P. S. Timashev, “Terahertz radiation and the skin: a review,” *Journal of Biomedical Optics*, vol. 26, Feb. 2021.
- [135] P. Sethy, S. Pratyush, R. Mishra, and S. Behera, “An introduction to terahertz technology, its history, properties and application,” in *International conference on computing and communication*, 02 2015.

- [136] M. V. Tsurkan and O. A. Smolyanskaya, “Impact of terahertz radiation on cells,” in *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, pp. 630–632, 2013.
- [137] L. Sun, L. Zhao, and R.-Y. Peng, “Research progress in the effects of terahertz waves on biomacromolecules,” *Military Medical Research*, vol. 8, Apr. 2021.
- [138] M. M. U. Rashid, A. Sarkar, L. Paul, A. Bouazizi, R. Sen, and B. Podder, “An investigation of sar inside human heart for antenna directivity, surface current variations and effect on antenna frequency in presence of heart,” in *Rqshid*, pp. 1–4, 12 2016.
- [139] M. I. Hossain, M. R. Faruque, and M. Islam, “Investigation of hand impact on pifa performances and sar in human head,” *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 13, pp. 447–453, 08 2015.
- [140] H. I. Hamd and H. I. Mohammed, “Comparison specific absorption rate (sar) for human head between 2g and 4g mobile communication,” in *2018 International Conference on Engineering Technology and their Applications (IICETA)*, pp. 87–90, 2018.
- [141] G. Mihai, A. M. Aron, V. Haralambie, and A. Paljanos, “A study of mobile phone sar levels modification in different experimental configurations under 2g and 3g communication standards,” in *2016 International Conference on Communications (COMM)*, pp. 491–494, 2016.
- [142] A. Turgut and B. K. Engiz, “Analyzing the sar in human head tissues under different exposure scenarios,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 12, 2023.
- [143] M. Wang, G. Yang, W. Li, and Q. Wu, “An overview of cancer treatment by terahertz radiation,” in *2013 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO)*, pp. 1–3, 2013.
- [144] W. H. Organization, “Agents classified by the iarc monographs, volumes 1–134,” <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>, accessed December 2023.
- [145] M. Božanić and S. Sinha, *5G and 6G Networks: Should There Be a Health Concern?*, pp. 281–304. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [146] D. K. Singh, “Exposure limits for non-ionizing radiation,” in *2006 9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC 2006)*, pp. 447–450, 2006.
- [147] B. Bisht, P. Bhatnagar, P. Gururani, V. Kumar, M. S. Tomar, R. Sinhmar, N. Rathi, and S. Kumar, “Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables– a review,” *Trends in Food Science & Technology*, vol. 114, pp. 372–385, 2021.
- [148] M. Božanić and S. Sinha, *Leap to 6G?*, pp. 1–29. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [149] T. S. Rappaport, *Wireless communications: Principles and practice, 2/E*. Pearson Education India, 2010.
- [150] J. Evans, “Propagation.” <https://www.microwavejournal.com/articles/29567-propagation/>, 2019. Ημερομηνία πρόσβασης: 28 Ιουνίου 2023.

- [151] K. R. Foster, P. Vecchia, and M. H. Repacholi, "Science and the precautionary principle," *Science*, vol. 288, no. 5468, pp. 979–981, 2000.
- [152] T. Wu, T. Rappaport, and C. Collins, "Safe for generations to come: Considerations of safety for millimeter waves in wireless communications," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 16, pp. 65–84, 03 2015.
- [153] W. H. Organization, "Global health observatory data repository." <https://apps.who.int/gho/data/view.main.EMFLIMITSPUBCRADIOFREQUENCYv>, 2023. Ημερομηνία πρόσβασης: 29 Νοεμβρίου 2023.
- [154] J. Bielski, "Bioelectrical brain activity in workers exposed to electromagnetic fields," *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 724, pp. 435–437, 1994.
- [155] M. Mahfouz, M. Kuhn, G. To, and A. Fathy, "Integration of uwb and wireless pressure mapping in surgical navigation," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 2550 – 2564, 11 2009.
- [156] M. E. Fouda, A. E. Khorshid, I. Alquaydheb, A. Eltawil, and F. Kurdahi, "Extracting the cole-cole model parameters of tissue-mimicking materials," in *2018 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, pp. 1–4, 2018.
- [157] M. Cavagnaro, E. Pittella, and S. Pisa, "Evaluation of the electromagnetic power absorption in humans exposed to plane waves: The effect of breathing activity," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, p. 7, 01 2013.
- [158] F. for Research on Information Technologies in Society, "Dielectric properties." https://www.phonearena.com/news/Beyond-LTE-Part-1-0G-and-the-birth-of-the-mobile-radio-phone_id37843, 2023. Ημερομηνία πρόσβασης: 21 Οκτωβρίου 2023.
- [159] J. O. de Lorge and C. S. Ezell, "Observing-responses of rats exposed to 1.28- and 5.62-ghz microwaves," *Bioelectromagnetics*, vol. 1, no. 2, pp. 183–198, 1980.
- [160] J. O. de Lorge, "Operant behavior and colonic temperature of macaca mulatta exposed to radio frequency fields at and above resonant frequencies," *Bioelectromagnetics*, vol. 5, no. 2, pp. 233–246, 1984.
- [161] J. Lin, "Safety standards for human exposure to radio frequency radiation and their biological rationale," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 4, no. 4, pp. 22–26, 2003.
- [162] M. Repacholi, "A history of the international commission on non-ionizing radiation protection," *Health Physics*, vol. 113, pp. 282–300, Oct. 2017.
- [163] J. C. Lin, "Radio-frequency radiation safety and health," *URSI Radio Science Bulletin*, vol. 2011, no. 336, pp. 95–100, 2011.
- [164] A. Lak and N. Parhizgar, "Effect of presence of human body on antenna gain," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 8, 11 2015.

- [165] S. R. Chowdhury and K. Ali, “Effects of human body on antenna performance: A quantitative study,” in *2016 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, pp. 108–112, 2016.
- [166] A. Gati, F. E. Salem, A. M. G. Serrano, D. Marquet, S. L. Masson, T. Rivera, D.-T. Phan-Huy, Z. Altman, J.-B. Landre, O. Simon, E. L. Rouzic, F. Bourgart, S. Gosselin, M. Vautier, E. Gourdin, T. En-Najjary, M. El-Tabach, R.-M. Indre, G. Gerard, and G. Delsart, “Key technologies to accelerate the ict green evolution – an operator’s point of view,” 2019.
- [167] R. E. Fields, “Evaluating compliance with fcc guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields,” *Oet Bull*, vol. 65, no. 10, pp. 1–57, 1997.
- [168] T. Persson, C. Tornevik, L.-E. Larsson, and J. Lovén, “Output power distributions of terminals in a 3g mobile communication network,” *Bioelectromagnetics*, vol. 33, 05 2012.
- [169] Z. Elkwash and W. Zahmoul, “theoretical estimation of power density radiations in the vicinity of wimax base stations,” vol. 24, 01 2021.
- [170] Z. Hajiyat, A. Ismail, A. Sali, and M. N. Hamidon, “Antenna in 6g wireless communication system: Specifications, challenges, and research directions,” *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 231, p. 166415, 02 2021.
- [171] F. C. Commission, “Human exposure to radio frequency fields: Guidelines for cellular antenna sites.” <https://www.fcc.gov/consumers/guides/human-exposure-radio-frequency-fields-guidelines-cellular-and-pcs-sites>, 2019. Ημερομηνία πρόσβασης: 2 Φεβρουαρίου 2024.
- [172] N. Yoganandan, F. Pintar, J. Zhang, and J. Baisden, “Physical properties of the human head: Mass, center of gravity and moment of inertia,” *Journal of biomechanics*, vol. 42, pp. 1177–92, 06 2009.
- [173] RFwel, “Umts/wcdma frequency bands.” <https://www.rfwel.com/us/index.php/umts-wcdma-frequency-bands>, 2019. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Φεβρουαρίου 2024.
- [174] RFwel, “4g lte frequency bands.” <https://www.rfwel.com/us/index.php/4g-lte-frequency-bands>, 2019. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Φεβρουαρίου 2024.
- [175] RFwel, “5g nr frequency bands.” <https://www.rfwel.com/us/index.php/5g-nr-frequency-bands>, 2019. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Φεβρουαρίου 2024.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας υπολογισμού πυκνότητας ισχύος μακρινής ζώνης.

```
clc;
clear all;
close all;
% Input Parameters
number_points=20;

Power_Density3g=zeros(1, number_points);
Power_Density4g=zeros(1, number_points);
Power_Density5g=zeros(1, number_points);
hi=zeros(1, number_points);
Power_Density6most=zeros(1, number_points);

index=1; %%index of each point of interest

initial=3;
step=0.01;
end_value=10;
for length=initial:step:end_value
Power_Density3g(index)=50*10/(4*pi*((length)^2));
Power_Density4g(index)=120*10/(4*pi*((length)^2));
Power_Density5g(index)=240*10/(4*pi*((length)^2));
Power_Density6least(index)=300*10/(4*pi*((length)^2));
Power_Density6most(index)=500*10/(4*pi*((length)^2));
hi(index)=10;
index=index+1;
end

length=initial:step:end_value;
figure;
ylabel('Power Density (W/m^2)','FontSize', 22);
xlabel('Distance From Antena (m)','FontSize', 22);
grid on;
perith=step/2;
xlim([initial-perith end_value+perith])
xticks=[0.1];
hold all; %%Retain current plot when adding new plots
plot (length,Power_Density3g,'-yo', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'3G tower (50W)','Marker', 'none');
hold all;
plot (length,Power_Density4g,'-bo', 'LineWidth',1,'DisplayName',
```

```

'4G tower (120W)', 'Marker', 'none');
plot (length,Power_Density5g,'-mo', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'5G tower (240W)', 'Marker', 'none');
hold all;

hold all;
plot (length,Power_Density6least,'-co', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'6g tower min (300W) ', 'Marker', 'none');
plot (length,Power_Density6most,'-go', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'6g tower max (500W) ', 'Marker', 'none');
hold all;
plot(length,hi,'-ro', 'LineWidth',1,'DisplayName','Power Density Upper Limit
(10W/m2) ', 'Marker', 'none' );

legend;
title(`Minimum Distance Required For a Typical Base Station at Max
Power to Conform to FFC Power Density Regulations",'FontSize', 22);

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικάς υπολογισμού ακτινοβολούμενης ισχύος.

```

clc;
clear all;
close all;
% Input Parameters
number_points=20;
Pt=500;
Gt=10;
Gr=1;
r=10;
Power_Density6cm=zeros(1, number_points);
Power_Density8cm=zeros(1, number_points);
Power_Density10cm=zeros(1, number_points);
Power_Density15cm=zeros(1, number_points);

index=1; %%index of each point of interest

initial=200;
step=0.1;
end_value=6000;
for length=initial:step:end_value

```

```

aposbesimin(index)=(250*Gt*Gr*((3*10^8)
/(4*100000000000))^2)/((4*pi*length)^2);

aposbesi50(index)=(250*Gt*Gr*((3*10^8)
/(1*100000000000))^2)/((4*pi*length)^2);
aposbesi250(index)=(250*Gt*Gr*((3*10^8)
/(2*100000000000))^2)/((4*pi*length)^2);
aposbesi500(index)=(250*Gt*Gr*((3*10^8)
/(3*100000000000))^2)/((4*pi*length)^2);
aposbesi100(index)=(250*Gt*Gr*((3*10^8)
/(4*100000000000))^2)/((4*pi*length)^2);

index=index+1;
end

length=initial:step:end_value;
figure;
ylabel('Power Recieved (W)','FontSize', 22);
xlabel('Distance(meters))','FontSize', 22);
ax.XTick=0:0.1:2;
grid on;
perith=step/2;
xlim([initial-perith end_value+perith])
xticks=[0.1];

hold all; %%Retain current plot when adding new plots
plot (length,aposbesimin,'-ro', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'F=100GHz','Marker', 'none');
plot (length,aposbesi50,'-mo', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'F=1THz','Marker', 'none');
plot (length,aposbesi250,'-yo', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'F=2THz ', 'Marker', 'none');

plot (length,aposbesi500,'-bo', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'F=3THz ', 'Marker', 'none');
plot (length,aposbesi100,'-go', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'F=4THz', 'Marker', 'none');

title(`Power recieved for changing frquency 200
to 600 meters away from source",'FontSize', 22);

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Κώδικας SAR για κεφάλι και δέρμα.

```
clc;
clear all;
close all;
% Input Parameters
number_points=20;
s1=0.8435*10^-4;
s2=1.6267*10^-4;
s3=1.18;
s4=1.22;
Pt=1;
Gt6=0.4; Gt2=0.0501; Gt3=0.1;
Gt4=0.2512; Gt5=0.3162;
m1=1/1000;
m10=10/1000;
r=10;
Rh=377;
Win_6g=0.1; Win2_g=1.95; Win3_g=1;
Win4_g=0.115; Win5_g=0.1;
Power_Density6cm=zeros(1, number_points);
Power_Density8cm=zeros(1, number_points);
Power_Density10cm=zeros(1, number_points);
Power_Density15cm=zeros(1, number_points);

index=1; %%index of each point of interest

initial=2;
step=0.01;
end_value=6;
for length=initial:step:end_value
sar2(index)=(s1*((((Win2_g*30*Gt2)^0.5))
/(length/100))^2)/(Rh))/(m1);
sar3(index)=(s1*((((Win3_g*30*Gt3)^0.5))
/(length/100))^2)/(Rh))/(m1);
sar4(index)=(s2*((((Win4_g*30*Gt4)^0.5))
/(length/100))^2)/(Rh))/(m1);
sar5(index)=(s2*((((Win5_g*30*Gt5)^0.5))
/(length/100))^2)/(Rh))/(m1);

sar6(index)=(s2*((((Win_6g*30*Gt6)^0.5))
/(length/100))^2)/(Rh))/(m1);
```

```

index=index+1;
end

length=initial:step:end_value;
figure;
ylabel('SAR W/kg','FontSize', 22);
xlabel('distance (cm)','FontSize', 22);
ax.XTick=0:0.1:2;
grid on;
perith=step/2;
xlim([initial-perith end_value+perith])
xticks=[0.1];

hold all; %%Retain current plot when adding new plots

plot (length,sar2,'-go', 'LineWidth',1,'DisplayName
','2G','Marker', 'none');
plot (length,sar3,'-yo', 'LineWidth',1,'DisplayName
','3G','Marker', 'none');
plot (length,sar4,'-bo', 'LineWidth',1,'DisplayName
','4G','Marker', 'none');
plot (length,sar5,'-co', 'LineWidth',1,'DisplayName
','5G','Marker', 'none');
plot (length,sar6,'-mo', 'LineWidth',1,'DisplayName
','6G','Marker', 'none');
legend;
title(`Value of Sar over 1g cube of tissue on
the skin.','FontSize', 22);

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Κώδικας υπολογισμού SAR με την βοήθεια της αγωγιμότητας.

```

clc;
clear all;
close all;
% Input Parameters
number_points=20;
s1= 3.58;
s2=28.6;
s3= 30.2;
s4=37.4;
s5=2.72;

```

```

Pt=0.1;
Gt= 0.3162;
p=1200;
r=2;
Power_Density6cm=zeros(1, number_points);
Power_Density8cm=zeros(1, number_points);
Power_Density10cm=zeros(1, number_points);
Power_Density15cm=zeros(1, number_points);

index=1; %%index of each point of interest

initial=0.001;
step=0.001;
end_value=0.1;
for length=initial:step:end_value
sar1(index)=s1*(((length*Gt*30)^0.5)/(r/100))/(p);
sar2(index)=s2*(((length*Gt*30)^0.5)/(r/100))/(p);
sar3(index)=s3*(((length*Gt*30)^0.5)/(r/100))/(p);
sar4(index)=s4*(((length*Gt*30)^0.5)/(r/100))/(p);
% sar5(index)=s5*(((length*Gt*30)^0.5)/(r))/(p);
index=index+1;
end
length=initial:step:end_value;
figure;
ylabel('SAR W/kg','FontSize', 22);
xlabel('Wattage (W)','FontSize', 22);
ax.XTick=0:0.1:2;
grid on;
perith=step/2;
xlim([initial-perith end_value+perith])
xticks=[0.1];

hold all; %%Retain current plot when adding new plots
plot (length,sar1,'-bo', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'F=4.5GHz','Marker', 'none');
plot (length,sar2,'-mo', 'LineWidth',1,'DisplayName
','F=26 GHz','Marker', 'none');
plot (length,sar3,'-go', 'LineWidth',1,'DisplayName
','F=28 GHz','Marker', 'none');
plot (length,sar4,'-yo', 'LineWidth',1,'DisplayName
','F=39 GHz','Marker', 'none');
legend;
%plot (length,sar5,'-co', 'LineWidth',1,'DisplayName

```

```

', 'F=5800MHz', 'Marker', 'none');

title(`Sar for brain for 5th generation
frequencies in distance of 2cm`, 'FontSize', 22);

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Κώδικας υπολογισμού πυκνότητας ισχύος για μικρές αποστάσεις

```

clc;
clear all;
close all;
% Input Parameters
number_points=20;
Power_Density6cm=zeros(1, number_points);
Power_Density8cm=zeros(1, number_points);
Power_Density10cm=zeros(1, number_points);
Power_Density15cm=zeros(1, number_points);

index=1; %%index of each point of interest

initial=0;
step=0.01;
end_value=0.3;
for length=initial:step:end_value
Power_Density6cm(index)=0.25/(4*pi*((length/100)^2));
Power_Density8cm(index)=0.3/(4*pi*((length/100)^2));
lim(index)=10;
Power_Density10cm(index)=0.5/(4*pi*((length/100)^2));
Power_Density12cm(index)=0.25/(4*pi*((length/100)^2));
Power_Density15cm(index)=1/(4*pi*((length/100)^2));

index=index+1;
end

length=initial:step:end_value;
figure;
ylabel('Power Density (W/m^2)', 'FontSize', 22);
xlabel('Power emitted (W)', 'FontSize', 22);
ax.XTick=0:0.1:2;
grid on;

```

```

perith=step/2;
xlim([initial-perith end_value+perith])
xticks=[0.1];

hold all; %%Retain current plot when adding new plots
plot (length,Power_Density6cm,'-go', 'LineWidth',1,
'DisplayName','r=6 cm','Marker', 'none');
hold all;
plot (length,Power_Density8cm,'-ms', 'LineWidth',1,
'DisplayName','r=8 cm','Marker', 'none');
hold all;

plot (length,Power_Density10cm,'-ks', 'LineWidth',1
,'DisplayName','r=10 cm','Marker', 'none');
hold all;
plot (length,Power_Density10cm,'-ys', 'LineWidth',1,
'DisplayName','r=12 cm','Marker', 'none');

plot (length,Power_Density15cm,'-bs', 'LineWidth',1,
'DisplayName','r=15 cm','Marker', 'none');
plot (length,lim,'-rs', 'LineWidth',1,'DisplayName',
'Power density limit FCC (10W/m^2)','Marker', 'none');

legend;
title("Power density of smartphone antennas while
increasing wattage for various distances",'FontSize', 22);

```