



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΜΣ «Ψηφιακές Επικοινωνίες και Δίκτυα»

Διπλωματική Εργασία

Τίτλος: «Μελέτη της έκθεσης του ανθρώπου σε Η/Μ ακτινοβολία
από Σταθμούς Βάσης τεχνολογίας 5G»

Ελισάβετ Κούτσι

ΜΨΕ2006

Επιβλέπων Καθηγητής: Αθανάσιος Κανάτας

Φεβρουάριος 2023

Περίληψη

Η 5η γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας (5G) αποτελεί το επόμενο βήμα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, υπερβαίνοντας σημαντικά τις δυνατότητες των σημερινών δικτύων. Η τεχνολογία 5G θα καλύψει τις ανάγκες που προκύπτουν από τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, καθώς και εκείνες που επιβάλλονται από καινοτόμες ιδέες όπως τα αυτόνομα αυτοκίνητα, Smart Factories ή Smart Cities. Σε σύγκριση με τα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το 5G μπορεί να υποστηρίξει πολύ περισσότερα τερματικά με πολύ υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και πολύ υψηλή αξιοπιστία. Με αυτόν τον τρόπο, το 5G εξασφαλίζει υψηλή ποιότητα εξυπηρέτησης για τους χρήστες και επιτρέπει επίσης εξαιρετικά αξιόπιστη μαζική επικοινωνία μεταξύ συσκευών.

Ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον στα 5G δίκτυα παρουσιάζει το θέμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, καθώς είναι ήδη γνωστό πως οι υπάρχουσες μεθοδολογίες, αφιερωμένες σε μετρήσεις σε δίκτυα 2G, 3G αλλά και 4G, δεν είναι κατάλληλες για το 5G. Η προτεινόμενη διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη της έκθεσης του ανθρώπου σε Η/Μ ακτινοβολία από Σταθμούς Βάσης τεχνολογίας 5G και μεταγενέστερων.

Abstract

The 5th generation of mobile networks (5G) is the next step in the field of telecommunications, significantly exceeding the capabilities of current networks. 5G technology will meet the needs arising from the ever-increasing demands of mobile network users, as well as those imposed by innovative ideas such as EVs, Smart Factories or Smart Cities. Compared to existing mobile networks, 5G will be able to support many more terminals with much higher data rates, extremely low latency and very high reliability. In this way, 5G will ensure a high quality of service for the users and will also allow extremely reliable mass communication between devices.

The issue of electromagnetic radiation is of particular research interest in 5G networks, as it is already known that the existing methodologies, dedicated to measurements in 2G, 3G and 4G networks, are not suitable for 5G. The proposed thesis deals with the study of human exposure to E/M radiation from 5G technology Base Stations and beyond.

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος των μεταπτυχιακών μου σπουδών και με τη διαδικασία περάτωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Αθανάσιο Κανάτα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής αυτής εργασίας, καθώς και για την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησής της. Ένα μεταπτυχιακό που μόνο πλουσιότερη με έκανε σε γνώσεις και κατάρτιση για τον κλάδο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς το συνάδελφό μου κ. Ευστάθιο Ξάνθη, υπεύθυνο του εργαστηρίου 'Μετρήσεων Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας Ραδιοσυχνοτήτων και Θορύβου στο Περιβάλλον' της Victus Networks, που βοήθησε παρέχοντας όλο το μετρητικό εξοπλισμό του εργαστηρίου, τις γνώσεις του, το χρόνο του, καθώς και την τελική έκθεση μετρήσεων με τίτλο «Έκθεση Μετρήσεων Επιπέδων Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας Ραδιοσυχνοτήτων για τον σταθμό βάσης της Vodafone στο δεύτερο όροφο του κτηρίου της Victus στην Παλλήνη».

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract	3
Ευχαριστίες.....	4
Κατάλογος Εικόνων.....	8
Κατάλογος Πινάκων	10
1. Εισαγωγή	11
1.1 Σκοπός εργασίας.....	11
2. Ανάλυση του 5G	12
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	12
2.2 Δίκτυα 5G	13
3. Τεχνολογία του 5G	16
3.1 Massive mimo.....	16
3.1.1 Τεχνικές Massive MIMO	17
3.1.2 Μειονεκτήματα χρήσης Massive MIMO	18
3.1.3 Πλεονεκτήματα χρήσης Massive MIMO	18
3.2 Beamforming	19
3.2.1 Μειονεκτήματα Beamforming.....	20
3.2.2 Πλεονεκτήματα Beamforming	21
3.3 Πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία full duplex.....	21
3.4 Επικοινωνίες Χιλιοστομετρικών κυμάτων mmWaves	22
3.4.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα χρήσης mmWave.....	23
3.5 Small Cells.....	23
3.5.1 Μειονεκτήματα χρήσης Small Cells	24
3.5.2 Πλεονεκτήματα χρήσης Small Cells	24
4. Εφαρμογές του 5G	25
4.1 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας υψηλής ταχύτητας	25
4.2 Ψυχαγωγία και Πολυμέσα	26
4.3 Internet of Things (IoT)	26
5. Όρια ακτινοβολίας	29
5.1 Οι αρχές λειτουργίας του ICNIRP 2020.....	30
5.2 Όρια επαγγελματικής και δημόσιας έκθεσης.....	31
5.3 Θερμοκρασία.....	32
5.4 Βασικοί περιορισμοί του ICNIRP	33

5.5	Επίπεδα αναφοράς ICNIRP.....	35
5.6	Διαφορές μεταξύ των εκδόσεων 1998 και 2020.....	38
5.7	Επιπτώσεις και συμπεράσματα.....	47
6.	Όρια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην Ελλάδα	49
6.1	Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και όρια ασφαλούς έκθεσης.....	49
6.2	Τα όρια ασφαλούς έκθεσης στην Ελλάδα	50
6.3	Έρευνες και μετρήσεις στην Ελλάδα	50
7.	NARDA SRM	51
7.1	Μέτρηση της πραγματικής έκθεσης.....	54
7.2	5G Beamforming στο SRM-3006	55
7.3	Μετρητικός εξοπλισμός NARDA.....	56
8.	Μετρήσεις 5G (Ποιότητας Σήματος).....	59
8.1	“Good” Scenario	60
8.2	“Weak” Scenario.....	65
8.3	Σύγκριση των δύο σεναρίων	69
8.4	Mobile Network Charts.....	69
8.5	Performance Charts.....	70
8.6	Συμπέρασμα μετρήσεων ποιότητας σήματος	72
9.	Μετρήσεις ΗΜ πεδίου 5G	73
9.1	Περιγραφή Σταθμού Βάσης υπό μέτρηση	73
9.2	Άλλοι πομποί ακτινοβολίας Ραδιοσυχνοτήτων	73
9.3	Εξοπλισμός μέτρησης	73
10.3.1	Προσδιορισμός θέσεων μέτρησης	74
9.4	Υπολογισμός συνολικού λόγου έκθεσης	75
9.5	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	76
9.5.1	Στοιχεία μέτρησης.....	76
9.6	Αποτελέσματα της Έντασης Ηλεκτρικού πεδίου και υπολογισμός της πυκνότητας Ισχύος- Φασματική ανάλυση.....	76
9.6.1	Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης και Συνολικού Λόγου Έκθεσης στις θέσεις μέτρησης80	
9.7	Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων μέτρησης- Σύγκριση με τα όρια ασφαλείας	86
9.8	Τελικά συμπεράσματα	86
9.9	Παράρτημα.....	87
9.9.1	Όρια ασφαλούς έκθεσης.....	87
9.9.2	Ζώνες συχνοτήτων του SRM 3006 και υπηρεσίες που προβλέπεται να τις χρησιμοποιούν.....	89

9.9.3	Υπολογισμός Αβεβαιότητας	90
10.	Βιβλιογραφία	91

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων	13
Εικόνα 2 Τεχνική Massive Mimo.....	17
Εικόνα 3 Τεχνική Beamforming	20
Εικόνα 4 mmWave	22
Εικόνα 5 Small Cells τεχνική	24
Εικόνα 6 Η προσέγγιση του ICNIRP για την ανάπτυξη των ορίων.....	31
Εικόνα 7 Λειτουργικά κατώφλια σταθερής κατάστασης, κατώφλια EMF και βασικοί περιορισμοί για επαγγελματική και δημόσια έκθεση.....	32
Εικόνα 8 ICNIRP (2020) Όρια έκθεσης σε ολόκληρο το σώμα και σε τοπική έκθεση	33
Εικόνα 9 Σύγκριση μεταξύ SAR και Sab.....	35
Εικόνα 10 ICNIRP (2020) Επίπεδα αναφοράς ολόκληρου του σώματος για τους εργαζόμενους και το κοινό για τις εκδόσεις ICNIRP(2020) και (1998).....	36
Εικόνα 11 ICNIRP (2020) Επίπεδα αναφοράς κατά μέσο όρο σε ολόκληρο το σώμα, 30 λεπτά.	36
Εικόνα 12 ICNIRP (2020) Επίπεδα αναφοράς κατά μέσο όρο σε τοπική έκθεση, 6 λεπτά.	37
Εικόνα 13 Επίπεδα αναφοράς για τοπική έκθεση, για τους εργαζόμενους και το κοινό, κατά μέσο όρο 6 λεπτά, ICNIRP (2020).....	38
Εικόνα 14 Μέση τιμή αναφοράς για ολόκληρο το σώμα για το κοινό για τις κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (1998), ICNIRP (2010) και ICNIRP (2020), για το εύρος συχνοτήτων 100 kHz έως 300 GHz.	45
Εικόνα 15 Επίπεδα αναφοράς για το ευρύ κοινό που ισχύουν για τοπικές εκθέσεις ≥ 6 λεπτά για τις οδηγίες ICNIRP (2020), για το εύρος συχνοτήτων 100 kHz έως 300 GHz. Τα επίπεδα αναφοράς τοπικής έκθεσης δεν δόθηκαν στις κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (1998) και ICNIRP (2010).....	46
Εικόνα 16 Μέση τιμή αναφοράς για ολόκληρο το σώμα για εργαζόμενους για τις κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (1998), ICNIRP (2010) και ICNIRP (2020), για το εύρος συχνοτήτων 100 kHz έως 300 GHz.....	46
Εικόνα 17 Επίπεδα αναφοράς για εργαζόμενους σε τοπικές εκθέσεις ≥ 6 λεπτά για τις κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (2020), για το εύρος συχνοτήτων 100 kHz έως 300 GHz. Τα επίπεδα αναφοράς τοπικής έκθεσης δεν δόθηκαν στις κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (1998) και ICNIRP (2010).....	47
Εικόνα 18 Σύνοψη των συμπερασμάτων του ICNIRP (2020) σχετικά με τις δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία.....	48
Εικόνα 19 Όρια ΗΜ ακτινολίας στην Ελλάδα.....	49
Εικόνα 20 RadMan	51
Εικόνα 21 Nardalert	51
Εικόνα 22 Άμεση απεικόνιση των αποτελεσμάτων ως ποσοστά.....	53
Εικόνα 23 Wideband EMF	57
Εικόνα 24 Selective EMF.....	57
Εικόνα 25 Personal Safety EMF	57
Εικόνα 26 Area Monitoring.....	58
Εικόνα 27 Monitoring Receiver.....	58
Εικόνα 28 EMC Products	58
Εικόνα 29 5G NSA.....	60
Εικόνα 30 Frequency Calculator	60
Εικόνα 31 Παράμετροι για το “good” scenario	61

Εικόνα 32 Reference εικόνα για το πού αντιστοιχούν οι μετρήσεις	62
Εικόνα 33 RSSI, RSRP, RSRQ, SNR, TA for “good” scenario	63
Εικόνα 34 Pings for "good" scenario.....	64
Εικόνα 35 Speed for "good" scenario.....	65
Εικόνα 36 Παράμετροι για το “weak” scenario	66
Εικόνα 37 RSSI, RSRP, RSRQ, SNR, TA for “weak” scenario	67
Εικόνα 38 Pings for "weak" scenario.....	68
Εικόνα 39 Speed for "weak" scenario	68
Εικόνα 40 RSRP (dBm)	69
Εικόνα 41 RSRQ (dB)	69
Εικόνα 42 RSSI (dBm)	70
Εικόνα 43 DL Throughput (Mbps)	70
Εικόνα 44 UL Throughput (Mbps)	71
Εικόνα 45 Latency (ms)	71
Εικόνα 46 Ισχύς ΗΜ πεδίου.....	72
Εικόνα 47 Μέτρηση σε 3 ύψη	75

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Άλλοι πομποί ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων	73
Πίνακας 2 Περιγραφή θέσεων μέτρησης.....	76
Πίνακας 3 Υπολογισμός φασματικής πυκνότητας στη θέση μέτρησης 1	77
Πίνακας 4 Υπολογισμός φασματικής πυκνότητας στη θέση μέτρησης 2	78
Πίνακας 5 Υπολογισμός φασματικής πυκνότητας στη θέση μέτρησης 3	79
Πίνακας 6 Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης στη θέση μέτρησης 1	81
Πίνακας 7 Συμπέρασμα μέτρησης για τη θέση 1	82
Πίνακας 8 Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης στη θέση μέτρησης 2	83
Πίνακας 9 Συμπέρασμα μέτρησης για τη θέση 2	84
Πίνακας 10 Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης στη θέση μέτρησης 3	85
Πίνακας 11 Συμπέρασμα μέτρησης για τη θέση 3	86
Πίνακας 12 Συνολικός Λόγος Έκθεσης	86
Πίνακας 13 Επίπεδα αναφοράς (κοινό) της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα μεγέθη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E), της έντασης του μαγνητικού πεδίου (H) και της ισοδύναμης πυκνότητας ισχύος επιπέδου κύματος (P).	87
Πίνακας 14 Επίπεδα αναφοράς της Ελληνικής Νομοθεσίας σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων όπως προκύπτουν με το συντελεστή μείωσης 30% και 40% για τα μεγέθη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E), της έντασης του μαγνητικού πεδίου (H) και της ισοδύναμης πυκνότητας ισχύος επιπέδου κύματος (P).....	88

1. Εισαγωγή

Η 5η γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας (5G) αποτελεί το επόμενο βήμα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, υπερβαίνοντας σημαντικά τις δυνατότητες των σημερινών δικτύων. Με το νέο δίκτυο 5G ως δίκτυο υπηρεσιών, θέματα που σχετίζονται με τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (EMFs) αποτελούν αντικείμενο μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος, καθώς η εισαγωγή νέων πηγών εκπομπής που λειτουργούν παράλληλα με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας 2G/3G/4G, εγείρει ανησυχίες σχετικά με την υπέρβαση των αποδεκτών ορίων έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Επομένως, τα ζητήματα και οι προκλήσεις που σχετίζονται με μετρήσεις στην τεχνολογία 5G, είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης με τα κανονιστικά όρια, μιας και είναι ήδη γνωστό πως οι υπάρχουσες μεθοδολογίες, οι οποίες επικεντρώνονται σε μετρήσεις σε δίκτυα 2G, 3G και 4G, δεν είναι κατάλληλες για το 5G. Δύο είναι οι σημαντικότεροι λόγοι για αυτό, από τη μια η γενικευμένη χρήση τεχνικών όπως το massive MIMO και το beamforming, και από την άλλη η λειτουργία σε ζώνες υψηλότερης συχνότητας, δύο εγγενή χαρακτηριστικά των συστημάτων 5G που τα διαφοροποιούν από τα ήδη ανεπτυγμένα δίκτυα, και οδηγούν τις υπάρχουσες μεθόδους μετρήσεων EMF σε λανθασμένα- αποτελέσματα όταν εφαρμόζονται σε δίκτυα 5G. Τέτοια αποτελέσματα, σε συνδυασμό με την περιοριστική νομοθεσία σχετικά με τα όρια ασφαλούς έκθεσης σε επίπεδα EMF που ισχύουν σε ορισμένες χώρες, ενδέχεται να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην ανάπτυξη του δικτύου 5G, καθιστώντας δύσκολη την επίτευξη των επιδιωκόμενων δυνατοτήτων δικτύου 5G.

1.1 Σκοπός εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να γίνει αρχικά μια πλήρης μελέτη του 5G, των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται, καθώς και των εφαρμογών του. Η εστίαση όμως της διπλωματικής εργασίας έγκειται στη μελέτη των ορίων της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως και στην ανάπτυξη της κατάλληλης μεθοδολογίας για τις μετρήσεις της ακτινοβολίας αυτής στα συστήματα 5G.

2. Ανάλυση του 5G

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η ιστορική αναδρομή ξεκινάει στις αρχές του 1980 με το 1G να είναι η πρώτη γενιά της ασύρματης τεχνολογίας για την κινητή τηλεφωνία και υποστηρίζει μόνο κλήσεις φωνής. Το 1G είναι μια αναλογική τεχνολογία και τα τηλέφωνα που την χρησιμοποιούσαν είχαν χαμηλή ποιότητα ήχου, χαμηλή διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ελάχιστη ασφάλεια, καθώς υπήρχε και η περίπτωση πτώσης της κλήσης. Η μέγιστη ταχύτητα της τεχνολογίας αυτής είναι τα 2,4 Kbps.

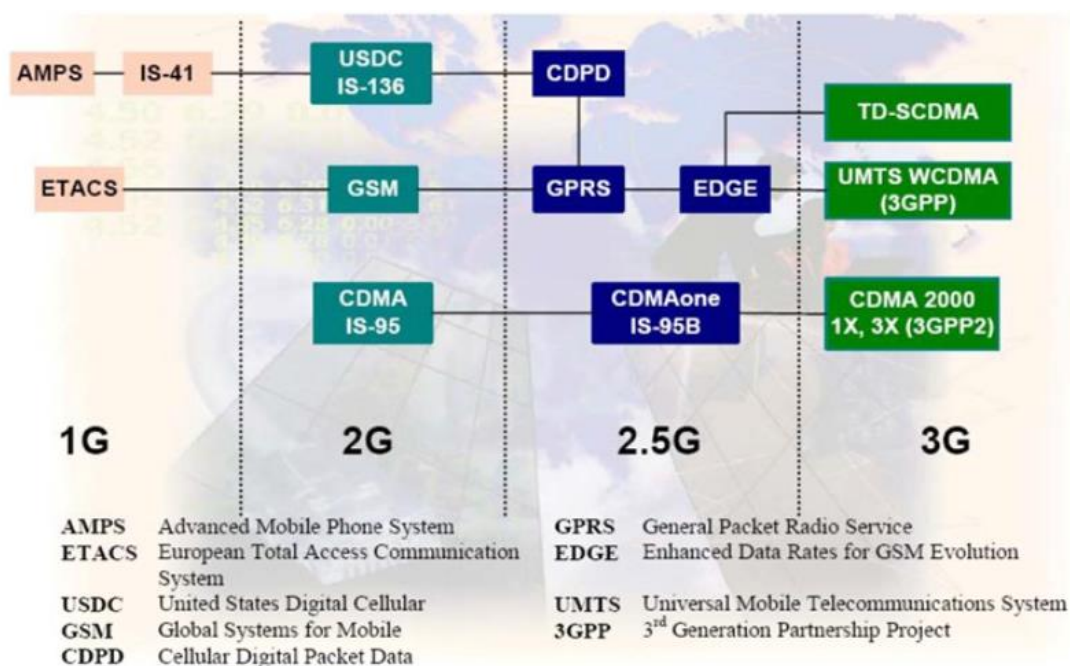
Η τεράστια αναβάθμιση ήρθε όταν η τεχνολογία των κινητών τηλεφώνων πέρασε από το 1G σε 2G. Αυτή η αλλαγή έλαβε χώρα στην Φιλανδία το 1991 σε δίκτυα GSM και άλλαξε για πάντα τα κινητά από αναλογικά σε ψηφιακά [1]. Η τεχνολογία 2G παρουσίασε την κρυπτογράφηση στα τηλέφωνα και τα μηνύματα, μαζί με υπηρεσίες δεδομένων όπως τα SMS, τα φωτογραφικά μηνύματα και τα MMS. Το δίκτυο αυτό παρέχει βελτίωση της ποιότητας της φωνής και της χωρητικότητας του δικτύου. Πριν από το σημαντικό άλμα από 2G σε 3G ασύρματα δίκτυα, υπήρξαν τα λιγότερο γνωστά και προσωρινά πρότυπα 2.5G και 2.75G. Το 2.5G εισήγαγε μια νέα τεχνική μεταγωγής πακέτων (packet-switching) που ήταν πιο αποδοτική από την τεχνολογία 2G. Αυτό οδήγησε στο 2.75G, που έδωσε θεωρητικά μια τριπλή αύξηση της ταχύτητας. Υπήρξε λοιπόν περαιτέρω εξέλιξη του GSM με βελτιωμένους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων για την παγκόσμια εξέλιξη (EDGE). Τα 2.5G και 2.75G δεν έχουν οριστεί τυπικά ως ασύρματα πρότυπα. Εξυπηρέτησαν κυρίως ως εργαλεία μάρκετινγκ για την προώθηση νέων χαρακτηριστικών κινητού τηλεφώνου στο κοινό.

Η παρουσίαση των 3G δικτύων το 1998 έφερε γρηγορότερες ταχύτητες στις μεταφορές δεδομένων, οπότε έδωσε την δυνατότητα στα κινητά να χρησιμοποιούν περισσότερες λειτουργίες με αυτές τις ταχύτητες. Για παράδειγμα, με το 3G μπορούσες να κάνεις βίντεο κλήσεις και να έχεις δεδομένα για να σερφάρεις στο διαδίκτυο. Η φράση “mobile broadband” εμφανίστηκε επίσης μαζί με την κινητή τεχνολογία 3G. Όπως και το 2G, έτσι και η τεχνολογία 3G έλαβε τις ενημερώσεις 3.5G και 3.75G οι οποίες έφεραν νέα χαρακτηριστικά και δυνατότητες προτού παρουσιαστεί το 4G. Η μέγιστη ταχύτητα ενός 3G δικτύου υπολογίζεται (στο περίπου) στα 2 Mbps για σταθερές συσκευές οι οποίες δεν βρίσκονται σε κίνηση και 384 Kbps σε κινούμενο όχημα.

Η τέταρτη γενιά δικτύων, η οποία κυκλοφόρησε το 2008, ήταν το 4G. Υποστηρίζει και αυτό την σύνδεση στο διαδίκτυο, αλλά παρέχει μεγαλύτερες επιδόσεις στα online games, ευκολότερη παρακολούθηση HD βίντεο σε υψηλή ποιότητα, καλύτερα online meetings, παρακολούθηση 3D τηλεόρασης και σημαντική αύξηση της μέγιστης ταχύτητας. Η μέγιστη ταχύτητα ενός δικτύου 4G όταν η συσκευή κινείται είναι τα 100 Mbps. Η ταχύτητα είναι 1 Gbps για επικοινωνία χαμηλής κινητικότητας, όπως όταν ο

καλών είναι ακίνητος ή περπατά. Τα περισσότερα μοντέλα κινητών τηλεφώνων υποστηρίζουν ταυτόχρονα τεχνολογίες 4G και 3G.

Τέλος, μέχρι το 2015, 4G δίκτυα είχαν εγκατασταθεί σε ολόκληρο τον πλανήτη, όμως η ζήτηση για ρυθμούς δεδομένων της τάξης των πολλών Gbps αυξάνεται λόγω της αύξησης της κυκλοφορίας βίντεο και της ροής βίντεο υψηλής ευκρίνειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή του δικτύου 5ης γενιάς 5G. Το 5G υπόσχεται σημαντικά ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων, υψηλότερη πυκνότητα σύνδεσης, πολύ χαμηλότερη καθυστέρηση και εξοικονόμηση ενέργειας, μεταξύ άλλων βελτιώσεων. Ήρθε για να αντικαταστήσει το 4G και είναι ήδη διαθέσιμο για αρκετά καινούργια μοντέλα κινητών, παρόλα αυτά δεν είναι ακόμα διαθέσιμο σε όλες τις χώρες και τις περιοχές. Οι ταχύτητες 5G κυμαίνονται από 50 Mbit/s έως και πάνω από gigabit/s. Το γρηγορότερο 5G είναι γνωστό ως mmWave. Από τις 3 Ιουλίου 2019, η mmWave είχε τελική ταχύτητα τα 1,8 Gbit/s στο 5G δίκτυο της AT&T. Το Sub-6 GHz 5G (mid-band 5G), μακράν το πιο συνηθισμένο, συνήθως αποδίδει μεταξύ 100 και 400 Mbit/s, αλλά θα έχει πολύ μεγαλύτερη απόσταση από το mmWave, ειδικά σε εξωτερικούς χώρους. Το 5G φέρνει μαζί του καινούριες κεραιές, καινούριες συσκευές και καινούριες εφαρμογές για την ασύρματη επικοινωνία.



Εικόνα 1 Η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων [1]

2.2 Δίκτυα 5G

Η πέμπτη γενιά ασύρματων συστημάτων (5G) είναι η τελευταία επανάληψη της κυβελοειδούς τεχνολογίας, σχεδιασμένη για να αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα και την απόκριση των ασύρματων δικτύων. Με το 5G, τα δεδομένα που μεταδίδονται μέσω ασύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων μπορούν να ταξιδέψουν με πολύ μεγάλες

ταχύτητες, με πιθανές μέγιστες ταχύτητες έως και 10 gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbps) κατά ορισμένες εκτιμήσεις. Αυτές οι ταχύτητες υπερβαίνουν τις ταχύτητες του καλωδίου και προσφέρουν καθυστέρηση 1 χιλιοστού του δευτερολέπτου (ms) ή μικρότερη, η οποία είναι χρήσιμη για εφαρμογές που απαιτούν ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο. Το 5G θα επιτρέψει μια απότομη αύξηση του όγκου δεδομένων που μεταδίδονται μέσω ασύρματων συστημάτων λόγω του πιο διαθέσιμου εύρους ζώνης και της προηγμένης τεχνολογίας κεραίας [2].

Οι προσδοκίες του 5G περιλαμβάνουν τεχνολογίες που αφορούν:

- massive MIMO
- small cells
- πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία (full duplexing)
- επικοινωνίες χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave)
- beamforming

Η ιδέα της ενσωμάτωσης δομικών στοιχείων προηγμένης τεχνολογίας είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία του 5G. Μόνο η εξέλιξη των σημερινών δικτύων δεν επαρκεί για την ικανοποίηση των απαιτητικών προκλήσεων, αλλά απαιτούνται επαναστατικές αλλαγές τόσο στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (radio access network) όσο και στο κεντρικό δίκτυο (core network).

Τα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται από τοποθεσίες κυψελών χωρισμένες σε τομείς που στέλνουν δεδομένα μέσω ραδιοκυμάτων. Η ασύρματη τεχνολογία LTE (4G), είναι αυτή που παρέχει τη βάση για το 5G. Σε αντίθεση με το 4G, τα ασύρματα σήματα 5G μεταδίδονται μέσω μεγάλου αριθμού μικρών σταθμών κυψελών που βρίσκονται σε μέρη όπως πόλοι φωτός ή στέγες κτιρίων. Η χρήση πολλαπλών μικρών κυψελών είναι απαραίτητη, επειδή το φάσμα χιλιοστού κύματος (mmWave)- η ζώνη φάσματος μεταξύ 30 και 300 gigahertz (Ghz) στην οποία βασίζεται το 5G για να δημιουργήσει υψηλές ταχύτητες- μπορεί να ταξιδέψει μόνο σε μικρές αποστάσεις και υπόκειται σε παρεμβολές από τον καιρό και φυσικά εμπόδια, όπως κτίρια ή δέντρα.

Οι προηγούμενες γενιές ασύρματης τεχνολογίας χρησιμοποιούσαν ζώνες φάσματος χαμηλότερης συχνότητας. Για να αντισταθμίσει τις προκλήσεις που σχετίζονται με την απόσταση και την παρεμβολή στα mmWaves, η ασύρματη βιομηχανία εξετάζει επίσης τη χρήση ενός φάσματος χαμηλότερης συχνότητας για δίκτυα 5G, ώστε οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να μπορούν να χρησιμοποιήσουν το φάσμα που έχουν ήδη για να δημιουργήσουν τα νέα τους δίκτυα. Το φάσμα χαμηλότερης συχνότητας φτάνει σε μεγαλύτερες αποστάσεις, αλλά έχει μικρότερη ταχύτητα και χωρητικότητα από το mmWave.

Το ασύρματο φάσμα χαμηλότερης συχνότητας αποτελείται από συχνότητες χαμηλής και μεσαίας ζώνης. Οι συχνότητες χαμηλής ζώνης λειτουργούν σε περίπου 600 έως 700 megahertz (MHz), ενώ οι συχνότητες μεσαίας ζώνης λειτουργούν περίπου στα 2,5 έως

3,5 GHz. Αυτό συγκρίνεται με σήματα κύματος mm υψηλής ζώνης, τα οποία λειτουργούν περίπου στα 24 έως 39 GHz.

Τα σήματα των mmWaves μπορούν εύκολα να μπλοκαριστούν από αντικείμενα όπως δέντρα, τοίχους και κτίρια - πράγμα που σημαίνει ότι, τις περισσότερες φορές, τα mmWaves μπορούν να καλύψουν μόνο ένα τετράγωνο πόλης σε άμεση οπτική επαφή.

Μια άλλη προσέγγιση-η πιο εφικτή-για τη δημιουργία ενός εθνικού δικτύου 5G είναι η χρήση ενός συνδυασμού συχνοτήτων υψηλής, μέσης και χαμηλής ζώνης. Το mmWave μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, ενώ οι Σταθμοί βάσης χαμηλής και μεσαίας ζώνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε λιγότερο πυκνές περιοχές. Οι συχνότητες χαμηλής ζώνης μπορούν να ταξιδέψουν περισσότερο και μέσα από διαφορετικά αντικείμενα. Ένας σταθμός βάσης 5G χαμηλής ζώνης μπορεί να παραμείνει συνδεδεμένος με μια συσκευή με δυνατότητα 5G έως και εκατοντάδες τετραγωνικά μίλια. Αυτό σημαίνει ότι η εφαρμογή και των τριών ζωνών θα δώσει συνολική κάλυψη, ενώ παράλληλα θα παρέχει τις ταχύτερες ταχύτητες στις περιοχές με τη μεγαλύτερη κίνηση [2].

3. Τεχνολογία του 5G

Η τεχνολογία 5G εισάγει μεγάλη πρόοδο σε όλη την αρχιτεκτονική του δικτύου. Το 5G New Radio, το παγκόσμιο πρότυπο για μια πιο ικανή ασύρματη διεπαφή 5G, καλύπτει φάσματα που δεν χρησιμοποιούνται σε 4G. Οι νέες κεραιές ενσωματώνουν μια τεχνολογία γνωστή ως massive MIMO (πολλαπλή είσοδος, πολλαπλές εξόδους), η οποία επιτρέπει σε πολλούς πομπούς και δέκτες να μεταφέρουν περισσότερα δεδομένα ταυτόχρονα. Αλλά η τεχνολογία 5G δεν περιορίζεται μόνο στο νέο ραδιοφάσμα. Έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει ένα συγκλίνον, ετερογενές δίκτυο που συνδυάζει αδειοδοτημένες και μη ασύρματες τεχνολογίες, πράγμα το οποίο προσθέτει διαθέσιμο εύρος ζώνης για τους χρήστες.

Το 5G ενισχύει επίσης τις ψηφιακές εμπειρίες μέσω της μηχανικής μάθησης (Machine Learning - ML). Η ζήτηση για χρόνους απόκρισης μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου (όπως πχ για τα αυτοκίνητα με αυτόματη οδήγηση) απαιτεί από τα δίκτυα 5G να καταγράφουν αυτοματοποίηση με ML και, τελικά, βαθιά μάθηση και τεχνητή νοημοσύνη (AI) [3].

Όπως προαναφέρθηκε, οι τεχνολογίες του 5G περιλαμβάνουν massive MIMO, επικοινωνίες συσκευή με συσκευή, πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία, επικοινωνίες χιλιοστομετρικών κυμάτων και προσωρινή αποθήκευση, που θα αναλυθούν παρακάτω.

3.1 Massive mimo

Το MIMO, (πολλαπλή είσοδος, πολλαπλή έξοδος) είναι μια τεχνολογία που αναπτύσσει πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη για να αυξήσει την ποιότητα, την απόδοση και τη χωρητικότητα της ραδιοσύνδεσης. Το MIMO χρησιμοποιεί τεχνικές γνωστές ως χωρικός διαφορισμός και χωρική πολυπλεξία για τη μετάδοση ανεξάρτητων και χωριστά κωδικοποιημένων σημάτων δεδομένων, γνωστών ως «ροές», επαναχρησιμοποιώντας την ίδια χρονική περίοδο και τον ίδιο πόρο συχνότητας.

Στο MIMO πολλαπλών χρηστών (MU-MIMO), ο πομπός στέλνει ταυτόχρονα διαφορετικές ροές σε διαφορετικούς χρήστες χρησιμοποιώντας τους ίδιους πόρους για το χρόνο και τη συχνότητα, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητα του δικτύου. Η φασματική απόδοση και η χωρητικότητα μπορούν να βελτιωθούν με την προσθήκη πρόσθετων κεραιών για την υποστήριξη περισσότερων ροών, μέχρι το σημείο όπου η κατανομή ισχύος και οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών οδηγούν σε μειωμένα κέρδη και, τελικά, απώλειες.

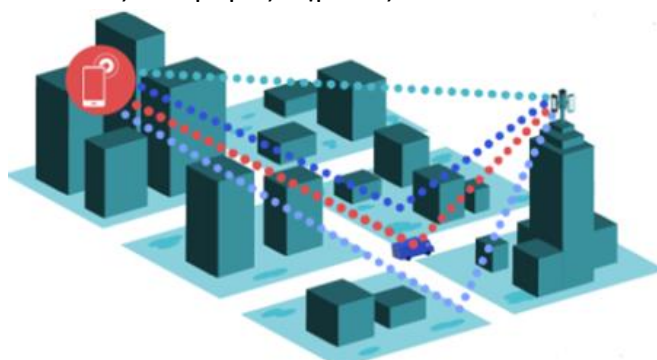
Το MIMO χρησιμοποιείται σε πολλές σύγχρονες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένου του Wi-Fi και του LTE. Το 3GPP, ο παγκόσμιος οργανισμός που είναι υπεύθυνος για τον ορισμό των ασύρματων προτύπων, καθόρισε για πρώτη φορά το MIMO για το LTE το 2008, στην έκδοση 8. Αυτή η αρχική παραλλαγή χρησιμοποίησε δύο πομπούς και δύο

δέκτες, 2x2 MIMO και οι επακόλουθες αυξήσεις της ισχύος επεξεργασίας επέτρεψαν τη χρήση περισσότερων ταυτόχρονων ροών δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα με τρέχοντα δίκτυα 4G LTE χρησιμοποιώντας 4×4 MIMO.

Τα πολύ μικρά μήκη κύματος στις συχνότητες mmWave έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερες διαστάσεις κεραίας και για 5G NR, το 3GPP έχει καθορίσει 32 κεραίες (32 x 32 MIMO) στην έκδοση 15, οι οποίες θα αυξηθούν σε 64 και περισσότερες σε μελλοντικές εκδόσεις. Αυτή η επέκταση στο μέγεθος της κεραίας MIMO οδήγησε στον όρο Massive MIMO [4].

3.1.1 Τεχνικές Massive MIMO

Το Massive MIMO βασίζεται στις τρεις βασικές έννοιες του χωρικού διαφορισμού (spatial diversity), της χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing) και του beamforming. Το MIMO βασίζεται στο γεγονός ότι ένα ραδιοσήμα μεταξύ πομπού και δέκτη φιλτράρεται από το περιβάλλον του, με αντανakλάσεις από κτίρια και άλλα εμπόδια που οδηγούν σε πολλαπλές διαδρομές σήματος.



Εικόνα 2 Τεχνική Massive MIMO [5]

Τα διάφορα ανακλώμενα σήματα θα φτάσουν στην κεραία λήψης με διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις, επίπεδα εξασθένησης και κατεύθυνση άφιξης. Όταν αναπτύσσονται πολλαπλές κεραίες λήψης, κάθε κεραία λαμβάνει μια ελαφρώς διαφορετική έκδοση του σήματος, η οποία μπορεί να συνδυαστεί μαθηματικά για να βελτιώσει την ποιότητα του εκπεμπόμενου σήματος.

Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως χωρικός διαφορισμός (spatial diversity) αφού οι κεραίες δέκτη χωρίζονται μεταξύ τους. Ο χωρικός διαφορισμός επιτυγχάνεται επίσης με τη μετάδοση του ραδιοσήματος σε πολλαπλές κεραίες, με κάθε κεραία, σε ορισμένες περιπτώσεις, να στέλνει τροποποιημένη «έκδοση» του σήματος.

Ενώ ο χωρικός διαφορισμός αυξάνει την αξιοπιστία της ραδιοσύνδεσης, η χωρική πολυπλεξία αυξάνει την ικανότητα της ραδιοσύνδεσης 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

επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες δικτύου να υποστηρίζονται από έναν πομπό, εξού και ο όρος MU-MIMO [4] [6].

3.1.2 Μειονεκτήματα χρήσης Massive MIMO

Παρότι η τεχνική massive MIMO αποτελεί έναν ακρογωνιαίο λίθο για τα δίκτυα 5G προσφέροντας πολλά οφέλη, παρουσιάζει επίσης και κάποιες προκλήσεις, οι οποίες φαίνονται παρακάτω.

- Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται στο massive MIMO είναι αρκετές φορές ακριβές σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μονάδες.
- Η σχεδίαση κεραιών για την τεχνολογία massive MIMO είναι πιο πολύπλοκη και απαιτεί περισσότερη προσπάθεια και χρόνο κατά τη διάρκεια των γραμμών συναρμολόγησης, σε σχέση με το σχεδιασμό των «παραδοσιακών» κεραιών.
- Η χρήση του FDD στο massive MIMO οδηγεί σε ανατροφοδότηση. Το γενικό αυτό κόστος, αυξάνεται πρακτικά με την αύξηση των στοιχείων της κεραίας.
- Η απόσταση μεταξύ των κεραιών είναι πολύ μικρότερη και συνεπώς απαιτείται όλο το hardware να χωρέσει σε μικρότερο χώρο. Για παράδειγμα, το 32T32R απαιτεί 64 διαδρομές RF με απόσταση μεταξύ των κεραιών περίπου 4,2 cm σε δεδομένη συχνότητα περίπου 3,5 GHz.
- Λόγω περισσότερων διαδρομών RF και κεραιών, καταναλώνεται και μεγαλύτερη ισχύς, πράγμα το οποίο δημιουργεί και αναπόφευκτες απαιτήσεις θερμοκρασίας.
- Τέλος, η τεχνολογία massive MIMO απαιτεί πολύπλοκους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος στο δέκτη για την αντιμετώπιση παρεμβολών μεταξύ χρηστών.

3.1.3 Πλεονεκτήματα χρήσης Massive MIMO

Μπορεί οι προκλήσεις χρήσης της τεχνολογίας massive MIMO να είναι αρκετές, τα πλεονεκτήματα όμως που προσφέρει στα 5G δίκτυα, είναι σίγουρα περισσότερα και αναλύονται παρακάτω.

Ως βασικό δομικό στοιχείο του 5G NR, το massive MIMO φέρνει πολλαπλά οφέλη τόσο στους χειριστές δικτύου όσο και στους τελικούς χρήστες. Η τεχνολογία βελτιώνει σημαντικά τη φασματική απόδοση, παρέχοντας μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου για το ίδιο φάσμα.

Τα δίκτυα 5G, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα του δικτύου, προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων και να υποστηριχθεί ο μεγάλος αριθμός συνδέσεων, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές. Το massive MIMO, σε συνδυασμό με το beamforming, καθιστά δυνατή τη στοχευμένη χρήση του φάσματος, αφαιρώντας τα σημάδια συμφόρησης απόδοσης, υποστηρίζοντας

μεγαλύτερο αριθμό χρηστών στην κυψέλη και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Άλλα πιθανά οφέλη περιλαμβάνουν υψηλότερη αξιοπιστία σύνδεσης μαζί με αυξημένη αντίσταση σε παρεμβολές και jamming, λόγω του διαθέσιμου αυξημένου αριθμού διαδρομών σήματος. Τα δίκτυα massive MIMO θα ανταποκρίνονται επίσης σε συσκευές που εκπέμπουν σε υψηλότερες συχνότητες, γεγονός που θα βελτιώσει την κάλυψη, ιδιαίτερα σε εσωτερικούς χώρους [4] [7].

3.2 Beamforming

Το Beamforming χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνολογίες κεραίας για να εστιάσει το ασύρματο σήμα σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, αντί να εκπέμπει σε μεγάλη περιοχή. Αυτή η τεχνική μειώνει τις παρεμβολές μεταξύ των δεσμών που κατευθύνονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις, επιτρέποντας την ανάπτυξη μεγαλύτερων συστοιχιών κεραίας.

Ο μεγάλος αριθμός κεραιών σε ένα σύστημα Massive MIMO επιτρέπει το 3D beamforming, που δημιουργεί οριζόντιες και κάθετες δέσμες προς τους χρήστες, αυξάνοντας τους ρυθμούς δεδομένων (και τη χωρητικότητα) για όλους τους χρήστες. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε αστικές περιοχές με πολυώροφα κτίρια [4].

Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως σε ραντάρ και σόναρ, βιοϊατρικά, και ιδιαίτερα σε επικοινωνίες (τηλεπικοινωνίες, Wi-Fi). Όπως έχει ήδη αναφερθεί χρησιμοποιείται ειδικά σε 5G συστήματα, όπου απαιτούνται πολύ υψηλοί ρυθμοί δεδομένων και ο μόνος τρόπος για να υποστηριχθεί αυτό θα είναι η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας μετάδοσης και λήψης χρησιμοποιώντας το beamforming.

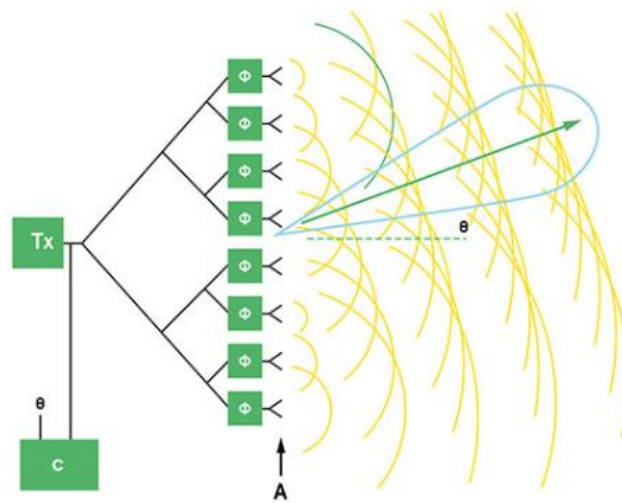
Σε αυτήν την τεχνική, κάθε στοιχείο κεραίας τροφοδοτείται ξεχωριστά με το προς μετάδοση σήμα. Η φάση και το πλάτος κάθε σήματος προστίθενται στη συνέχεια με τέτοιο τρόπο ώστε να συγκεντρώνουν την ενέργεια σε μια στενή δέσμη ή λοβό – τον κύριο λοβό [8].

Ταυτόχρονα, η συστοιχία κεραίας (antenna array) έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε τα σήματα που αποστέλλονται σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις να παρεμβαίνουν καταστροφικά μεταξύ τους, σχηματίζοντας μηδενικές και πλευρικές λοβούς.

Το συνολικό σύστημα συστοιχίας κεραίας έχει σχεδιαστεί για να μεγιστοποιεί την ενέργεια που εκπέμπεται στον κύριο λοβό, περιορίζοντας παράλληλα την ενέργεια στους πλευρικούς λοβούς σε αποδεκτό επίπεδο.

Η κατεύθυνση του κύριου λοβού, ή δέσμης, ελέγχεται χειρίζοντας τα ραδιοσήματα που εφαρμόζονται σε καθένα από τα μεμονωμένα στοιχεία κεραίας της συστοιχίας.

Κάθε κεραία τροφοδοτείται με το ίδιο μεταδιδόμενο σήμα αλλά η φάση και το πλάτος του σήματος που τροφοδοτείται σε κάθε στοιχείο ρυθμίζεται, οδηγώντας τη δέσμη προς την επιθυμητή κατεύθυνση [9].



Εικόνα 3 Τεχνική Beamforming [10]

3.2.1 Μειονεκτήματα Beamforming

Η τεχνική beamforming έχει ένα αξιοσημείωτο μειονέκτημα: απαιτεί τη χρήση υπολογιστικών πόρων. Οι απαιτήσεις επεξεργασίας για την εφαρμογή και τη διατήρηση αυτής της τεχνολογίας έχουν επιπτώσεις κόστους, υλικού και ενέργειας. Πιο αναλυτικά, οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι οι εξής:

- Υψηλό κόστος εφαρμογής που προστίθεται στο συνολικό κόστος υποδομής δικτύου και στο κόστος κατασκευής συσκευών.
- Αυτή η τεχνική επεξεργασίας σήματος απαιτεί επίσης τη χρήση προηγμένων ψηφιακών chip επεξεργασίας σήματος που προσθέτουν επιπλέον κόστος εφαρμογής.
- Υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την ενεργειακή απόδοση, καθώς η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικά υψηλότερη από την πολυκατευθυντική μετάδοση και επικοινωνία.
- Οι συσκευές τελικής χρήσης, θα χρειάζονται μπαταρίες με μεγαλύτερη χωρητικότητα, λόγω της απαιτητικής ενέργειας και της έντασης στην τεχνολογία του beamforming.
- Μείωση της κάλυψης της περιοχής δικτύου, επειδή τα σήματα ταξιδεύουν σε line-of-sight, απαιτώντας από έναν χρήστη να βρίσκεται κατά την κατεύθυνση της δέσμης.

3.2.2 Πλεονεκτήματα Beamforming

Οι μεταδόσεις υψηλής κατεύθυνσης που προκύπτουν είναι ιδιαίτερα επωφελείς για τις μεταδόσεις mmWave, οι οποίες υποφέρουν σε μεγάλο βαθμό από απώλεια διαδρομής και δεν διαδίδονται καλά μέσω εμποδίων όπως τοίχοι. Οι βελτιωμένοι δείκτες σήματος προς θόρυβο (SNR), που ενεργοποιούνται με τη διαμόρφωση δέσμης, αυξάνουν το εύρος σήματος τόσο για εξωτερική όσο και - κυρίως - εσωτερική κάλυψη.

Η ικανότητα του Beamforming να ακυρώσει ή να «μηδενίσει» την παρεμβολή είναι επίσης σημαντικό όφελος σε πολυσύχναστα αστικά περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα UE, όπου πολλαπλές δέσμες σήματος μπορούν να παρεμβάλλουν μεταξύ τους.

Συνολικά, με τη μείωση των εσωτερικών και εξωτερικών παρεμβολών και τη μείωση του SNR, η διαμόρφωση δέσμης υποστηρίζει σχήματα διαμόρφωσης σήματος υψηλότερης τάξης, όπως 64QAM και 16QAM - όλα αυτά συμβάλλουν σε ουσιαστική βελτίωση της χωρητικότητας των κυψελών του δικτύου [9].

3.3 Πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία full duplex

Οι σημερινοί σταθμοί βάσης και τα κινητά τηλέφωνα βασίζονται σε πομποδέκτες που πρέπει να εναλλάσσονται εάν μεταδίδουν και λαμβάνουν πληροφορίες στην ίδια συχνότητα ή λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες εάν ένας χρήστης επιθυμεί να μεταδίδει και να λαμβάνει πληροφορίες ταυτόχρονα.

Με το 5G, ένας πομποδέκτης μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει δεδομένα ταυτόχρονα, στην ίδια συχνότητα. Αυτή η τεχνολογία είναι γνωστή ως full-duplex και θα μπορούσε να διπλασιάσει τη χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων στο πιο θεμελιώδες φυσικό τους επίπεδο: Φανταστείτε δύο άτομα να μιλούν ταυτόχρονα, αλλά να μπορούν να κατανοηθούν μεταξύ τους-πράγμα που σημαίνει ότι η συνομιλία τους μπορεί να διαρκέσει το μισό χρόνο και η επόμενη συζήτησή τους θα μπορούσε να ξεκινήσει νωρίτερα.

Για να επιτευχθεί πλήρης αμφίδρομη λειτουργία σε προσωπικές συσκευές, πρέπει να σχεδιαστεί ένα κύκλωμα που να μπορεί να δρομολογεί εισερχόμενα και εξερχόμενα σήματα, ώστε να μην συγκρούονται, καθώς η κεραία μεταδίδει και λαμβάνει δεδομένα την ίδια στιγμή. Αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο λόγω της τάσης των ραδιοκυμάτων να ταξιδεύουν τόσο προς τα εμπρός όσο και προς τα πίσω στην ίδια συχνότητα (αμοιβαιότητα-reciprocity). Πρόσφατα όμως, οι ειδικοί συνέταξαν τρανζίστορ πυριτίου που λειτουργούν σαν διακόπτες υψηλής ταχύτητας, ούτως ώστε να διακόψουν την προς τα πίσω κίνηση αυτών των κυμάτων, επιτρέποντάς τους να μεταδίδουν και να λαμβάνουν σήματα στην ίδια συχνότητα την ίδια στιγμή.

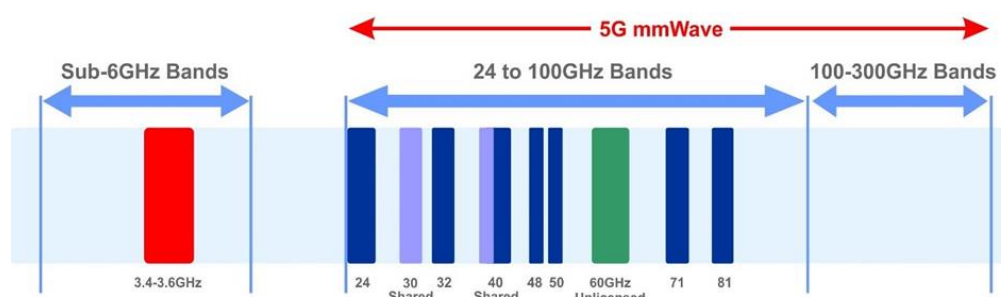
Ένα βασικό μειονέκτημα της λειτουργίας της πλήρης αμφίδρομης επικοινωνίας (full duplex) είναι ότι δημιουργεί επίσης περισσότερη παρεμβολή σήματος, μέσω μιας

ενοχλητικής ηχούς. Όταν ένας πομπός εκπέμπει ένα σήμα, το σήμα αυτό είναι πολύ πιο κοντά στην κεραία της συσκευής και συνεπώς πιο ισχυρό από οποιοδήποτε σήμα που λαμβάνει. Η προσδοκία για μια κεραία να «μιλάει» και να «ακούει» ταυτόχρονα είναι δυνατή μόνο με ειδική τεχνολογία ακύρωσης ηχούς (echo-canceling) [11].

3.4 Επικοινωνίες Χιλιοστομετρικών κυμάτων mmWaves

Η απίστευτη ζήτηση για εύρος ζώνης ασύρματων δεδομένων δεν δείχνει σημάδια επιβράδυνσης τώρα ή στο εγγύς μέλλον. Ως αποτέλεσμα, η κινητή τηλεφωνία συνεχίζει να επεκτείνεται και να αναπτύσσεται, επιβαρύνοντας όλο και περισσότερο τη χρήση δικτύου του διαθέσιμου ασύρματου φάσματος. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η προβλεπόμενη ανάπτυξη, η κυψελοειδής βιομηχανία αναζήτησε άλλες ζώνες συχνοτήτων που θα μπορούσαν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη νέων ασύρματων τεχνολογιών 5G [12].

Ο όρος mmWave αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο μέρος του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων μεταξύ 24 GHz και 100 GHz, το οποίο έχει πολύ μικρό μήκος κύματος. Αυτό το τμήμα του φάσματος είναι σχεδόν αχρησιμοποίητο, οπότε η τεχνολογία mmWave στοχεύει να αυξήσει σημαντικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι χαμηλότερες συχνότητες είναι υπερβολικά υπερφορτωμένες με σήματα τηλεόρασης και ραδιοφώνου, καθώς και τα τρέχοντα δίκτυα 4G LTE, τα οποία συνήθως βρίσκονται μεταξύ 800 και 3.000 MHz. Επιπρόσθετα, το μικρό μήκος κύματος μπορεί να μεταφέρει δεδομένα ακόμη πιο γρήγορα, αν και η απόσταση μεταφοράς του είναι μικρότερη [13].



Εικόνα 4 mmWave [12]

Η ανάγκη του ασύρματου mmWave είναι ένα βασικό μέρος της επανάστασης που φέρνει το 5G, με το διαθέσιμο φάσμα για το mmWave, τα υποστηριζόμενα εύρη ζώνης και τον τρόπο με τον οποίο οι τεχνολογίες κεραίας συνεργάζονται για να παρέχουν πολλαπλούς ρυθμούς δεδομένων Gigabit στους χρήστες [14].

3.4.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα χρήσης mmWave

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα χρήσης της τεχνολογίας mmWave σε δίκτυα 5G:

- Παρέχει ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων πάνω από 1Gbps.
- Η καθυστέρηση δικτύου είναι μικρότερη από 10 ms. Στο LTE και LTE Advanced η καθυστέρηση ήταν στα 20 και 30 ms αντίστοιχα.
- Παρέχει εύρος ζώνης περίπου 1 Gbps, πράγμα πολύ σημαντικό, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης, τόσο ταχύτερη και αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων υποστηρίζει.
- Η απόδοση δικτύου του mmWave 5G το καθιστά συγκρίσιμη εναλλακτική λύση με την ενσύρματη επικοινωνία που βασίζεται σε οπτικές ίνες, ανοίγοντας έτσι νέες ευκαιρίες για ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες για εμπορικές και οικιακές εφαρμογές.

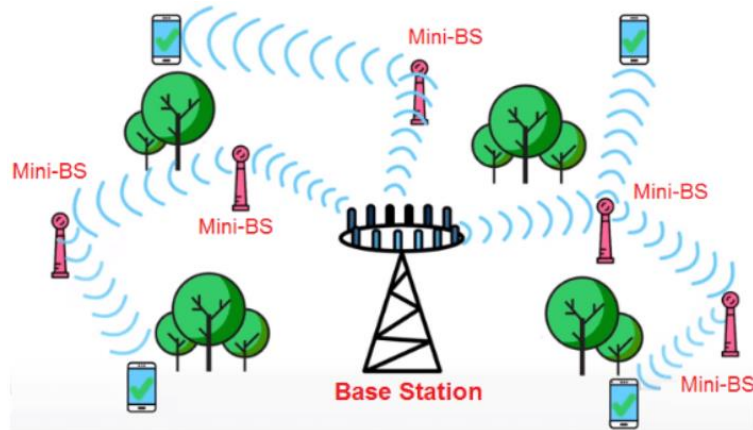
Το μειονέκτημα όμως της τεχνολογίας αυτής είναι πως τα mmWaves δεν μπορούν εύκολα να ταξιδεύουν μέσα από κτίρια ή εμπόδια και μπορούν να απορροφηθούν από τη βροχή και το φύλλωμα των δέντρων. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα δίκτυα 5G θα χρειαστεί να τοποθετήσουν εκατοντάδες μέχρι και χιλιάδες small cells σε συγκεκριμένες περιοχές, έτσι ώστε να αυξηθεί και να βελτιωθεί η κάλυψη του δικτύου [15].

3.5 Small Cells

Τα small cells είναι μικροί σε μέγεθος σταθμοί βάσης που απαιτούν ελάχιστη ισχύ για να λειτουργήσουν και μπορούν να τοποθετηθούν περίπου κάθε 250 μέτρα σε όλες τις πόλεις. Για να αποφευχθεί η πτώση των σημάτων, μπορούν να εγκατασταθούν χιλιάδες από αυτούς τους σταθμούς σε μια πόλη, ούτως ώστε να σχηματιστεί ένα πυκνό δίκτυο. Όπως φαίνεται λοιπόν, αναμένεται ότι η επικοινωνία 5G θα αποτελείται από εξαιρετικά πυκνά ετερογενή δίκτυα αποτελούμενων από small cells [16].

Η χρήση της τεχνολογίας αυτής σίγουρα επιφέρει πολλά πλεονεκτήματα στα δίκτυα 5G. Παρ'όλες όμως τις προκλήσεις που αναφέρονται, το βέβαιο είναι πως η χρήση των small cells έχει αυξηθεί δραστικά σε όλο τον κόσμο.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα χρήσης των small cells.



Εικόνα 5 Small Cells τεχνική [16]

3.5.1 Μειονεκτήματα χρήσης Small Cells

- Εξυπηρετούν μικρότερο εύρος κάλυψης από τους συμβατικούς Σταθμούς Βάσης.
- Απαιτείται μεγαλύτερος προϋπολογισμός για την ανάπτυξη ενός μεγάλου αριθμού μικρών κυψελών στην περιοχή.
- Χειρίζονται λιγότερα ταυτόχρονα sessions φωνητικών κλήσεων/δεδομένων και περιήγησης στο διαδίκτυο.
- Μερικές από τις προκλήσεις περιλαμβάνουν παρεμβολές, διαχείριση πόρων, backhaul κ.λπ.

3.5.2 Πλεονεκτήματα χρήσης Small Cells

- Προσφέρουν επέκταση της κάλυψης των κυψελοειδών δικτύων κινητής τηλεφωνίας σε indoor περιοχές, γεγονός που αυξάνει και τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου.
- Χρησιμοποιούνται για την παροχή υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας σε περιοχές όπου τα κυψελοειδή σήματα είναι είτε αδύναμα είτε μη διαθέσιμα.
- Εγκαθίστανται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές χρηστών, ούτως ώστε να παρέχουν υπηρεσίες όλη την ώρα.
- Είναι φθηνότερα από τους συμβατικούς Σταθμούς Βάσης.
- Κάνουν την καλύτερη δυνατή χρήση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων χρησιμοποιώντας ξανά τις ίδιες συχνότητες σε μια γεωγραφική περιοχή.
- Καταναλώνουν χαμηλή ισχύ σε σύγκριση με τους συμβατικούς Σταθμούς Βάσης.
- Αναπτύσσονται ταχύτερα και λειτουργούν εύκολα [17].

4. Εφαρμογές του 5G

Με βάση όσων αναφέρθηκαν και παραπάνω, η τεχνολογία 5G, θα τροφοδοτήσει ένα ευρύ φάσμα μελλοντικών βιομηχανιών σε τομείς όπως η εκπαίδευση, η μεταφορά, η ψυχαγωγία, τα έξυπνα σπίτια και η υγειονομική περίθαλψη. Προβλέπεται πως η τεχνολογία 5G θα έχει μεγάλο αντίκτυπο στον παγκόσμιο, κοινωνικό και οικονομικό τομέα. Οι εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής παρουσιάζονται παρακάτω [18] [19].

4.1 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας υψηλής ταχύτητας

Το 5G φέρνει την επανάσταση στην κινητή εμπειρία με ασύρματο δίκτυο υπερφόρτισης, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει πάνω από 10 έως και 20 gbps ταχύτητα λήψης δεδομένων. Είναι ισοδύναμο με σύνδεση στο Internet με οπτικές ίνες. Σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες μετάδοσης για κινητά, τα δεδομένα φωνής και υψηλής ταχύτητας μπορούν να μεταφερθούν ταυτόχρονα αποτελεσματικά στο 5G.

Η χαμηλή καθυστέρηση, λιγότερο από 1 ms, είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 5G, καθώς είναι μία κρίσιμη παράμετρος σε πολλές εφαρμογές, όπως πχ η αυτόνομη οδήγηση.

Το 5G χρησιμοποιεί νέα κύματα για μετάδοση, έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σύγκριση με χαμηλότερες ζώνες LTE και είναι ικανό για τεράστιο ρυθμό δεδομένων.

Οι λήψεις στα κινητά θα είναι πολύ γρηγορότερες, πάντα ενεργοποιημένες, πάντα συνδεδεμένες, προσφέροντας μια δυνατή εμπειρία για τα κινητά. Τα δίκτυα 5G θα επιτρέψουν την ασφαλή πρόσβαση στο cloud storage, πρόσβαση σε εταιρικές εφαρμογές, εκτέλεση δηλαδή ισχυρών εργασιών με μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ ουσιαστικά.

Η ασύρματη τεχνολογία 5G ανοίγει μεγαλύτερη ευκαιρία για νέους κατασκευαστές συσκευών και προγραμματιστές εφαρμογών. Νέες συσκευές VoIP και έξυπνες συσκευές θα εισαχθούν στην αγορά και συνεπώς περισσότερες ευκαιρίες απασχόλησης επίσης.

Οι τεχνικές εκφόρτωσης Wi-Fi και επικοινωνίας συσκευής-συσκευής προτείνονται για την περαιτέρω ενίσχυση της απόδοσης και της υποστήριξης του δικτύου κατά τη διάρκεια περιορισμένης πρόσβασης ή απουσίας δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η έννοια των μικρών κυψελών που χρησιμοποιείται στο 5G έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα για καλύτερη κάλυψη κυψέλης, μέγιστη μεταφορά δεδομένων, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και δίκτυο πρόσβασης στο cloud κ.λπ.

4.2 Ψυχαγωγία και Πολυμέσα

Σε μία παγκόσμια έρευνα το 2015 , διαπιστώθηκε πως το 55 % της κινητής διαδικτυακής κίνησης έχει χρησιμοποιηθεί για λήψη βίντεο. Με την πάροδο των χρόνων, η τάση αυτή όλο και αυξανόταν, και συνεχίζει να αυξάνεται, εγκαθιδρύοντας έτσι τα βίντεο υψηλής ευκρίνειας.

Το 5G προσφέρει έναν εικονικό κόσμο υψηλής ευκρίνειας στο κινητό τηλέφωνο. Η ροή υψηλής ταχύτητας βίντεο 4K διαρκεί μόνο λίγα δευτερόλεπτα και μπορεί να υποστηρίξει κρυστάλλινη καθαρότητα ήχου.

Οι ζωντανές εκδηλώσεις μπορούν να μεταδοθούν μέσω ασύρματων δικτύων με υψηλή ευκρίνεια. Ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε κανάλια HD TV σε κινητές συσκευές χωρίς καμία διακοπή. Φαίνεται λοιπόν πως σίγουρα η βιομηχανία ψυχαγωγίας επωφελείται εξαιρετικά από τα ασύρματα δίκτυα 5G.

Το 5G μπορεί να παρέχει 120 frames ανά δευτερόλεπτο, υψηλής ανάλυσης, καθώς και ροή βίντεο δυναμικής εμβέλειας χωρίς διακοπή. Η οπτικοακουστική εμπειρία παίρνει άλλη διάσταση μετά την εφαρμογή των τελευταίων τεχνολογιών που υποστηρίζονται από ασύρματο 5G.

Η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality - AR) και η εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality - VR) απαιτούν βίντεο HD με χαμηλή καθυστέρηση. Το δίκτυο 5G είναι αρκετά ισχυρό ώστε να τροφοδοτεί AR και VR με εκπληκτική εικονική εμπειρία.

Τα παιχνίδια εικονικής πραγματικότητας HD γίνονται δημοφιλή και πολλές εταιρείες επενδύουν σε παιχνίδια που βασίζονται σε εικονική πραγματικότητα. Ένα δίκτυο υψηλής ταχύτητας 5G μπορεί να προσφέρει μια καλύτερη εμπειρία παιχνιδιού με internet υψηλής ταχύτητας.

4.3 Internet of Things (IoT)

Το Internet of Things συνδέει κάθε αντικείμενο, συσκευή, αισθητήρα και εφαρμογή στο Διαδίκτυο. Οι εφαρμογές IoT συλλέγουν έναν τεράστιο όγκο δεδομένων από εκατομμύρια συσκευές και αισθητήρες. Για τη λειτουργία του απαιτεί ένα αποτελεσματικό δίκτυο για τη συλλογή, επεξεργασία, μετάδοση, έλεγχο και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Επομένως, το 5G είναι ο πιο αποτελεσματικός υποψήφιος για το Internet of Things λόγω της ευελιξίας του, της αξιοπιστίας, της διαθεσιμότητας φάσματος και των χαμηλών προδιαγραφών λύσεων ανάπτυξης. Το IoT μπορεί να επωφεληθεί από δίκτυα 5G σε πολλούς τομείς, οι οποίοι αναγράφονται παρακάτω.

1. Smart Home

Με τη νέα τεχνολογία 5G δημιουργείται η δυνατότητα δημιουργίας έξυπνων οικιακών συσκευών που θα μπορούν να ελέγχονται ακόμα και αν ο χρήστης βρίσκεται πολύ μακριά από το σπίτι του. Πέρα από έξυπνες τηλεοράσεις που ήδη έχουν αντικαταστήσει

σε μεγάλο βαθμό αυτές που δεν έχουν συνδεσιμότητα στο δίκτυο, έξυπνες ηλεκτρικές συσκευές έρχονται να περιορίσουν τις συμβατές δίνοντας μια πρώτη εικόνα από τη μορφή της ανθρώπινης κατοικίας τον 21ο αιώνα.

2. Smart Cities

Οι έξυπνες εφαρμογές της πόλης, όπως η διαχείριση της κυκλοφορίας, η άμεση ενημέρωση καιρού, η ενεργειακή διαχείριση, το έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο, ο έξυπνος φωτισμός δρόμων, η διαχείριση των υδάτινων πόρων έρχονται να δώσουν λύσεις σε καθημερινά προβλήματα που δυσχεραίνουν τη ζωή των κατοίκων των μεγάλων πόλεων.

3. Logistics and Shipping

Η βιομηχανία των logistics και της ναυτιλίας μπορεί να χρησιμοποιήσει την έξυπνη τεχνολογία 5G για την παρακολούθηση αγαθών, τη διαχείριση στόλου, την κεντρική διαχείριση βάσεων δεδομένων, τον προγραμματισμό προσωπικού και την παρακολούθηση και την αναφορά παράδοσης σε πραγματικό χρόνο. Σε σύγκριση με τα συμβατικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (3G / LTE), το 5G διαθέτει ταχύτερο δίκτυο με δυνατότητα σύνδεσης περισσότερου αριθμού συσκευών ανά πάσα στιγμή.

4. Industrial IoT

Οι μελλοντικές βιομηχανίες θα εξαρτηθούν από έξυπνες ασύρματες τεχνολογίες όπως το 5G και το LTE που έχουν προχωρήσει για αποτελεσματική αυτοματοποίηση εξοπλισμού, προβλέψιμη συντήρηση, ασφάλεια, παρακολούθηση διαδικασιών, έξυπνες συσκευασίες, αποστολή, διαχείριση logistics και ενέργεια.

Η τεχνολογία έξυπνων αισθητήρων προσφέρει απεριόριστες λύσεις για βιομηχανικό IoT για πιο έξυπνη, ασφαλή, οικονομικά αποδοτική και ενεργειακά αποδοτική βιομηχανική λειτουργία.

5. Smart Farming

Η τεχνολογία 5G μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη γεωργία και την έξυπνη γεωργία στο μέλλον. Χρησιμοποιώντας έξυπνους αισθητήρες RFID και τεχνολογία GPS, οι αγρότες μπορούν να παρακολουθούν τη θέση των ζώων και να τα διαχειρίζονται εύκολα. Οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο άρδευσης, έλεγχο πρόσβασης και διαχείριση ενέργειας.

6. Υγεία

Η τεχνολογία του 5G θα υποστηρίξει τους γιατρούς να εκτελούν προηγμένες ιατρικές διαδικασίες με αξιόπιστο ασύρματο δίκτυο συνδεδεμένο σε μια άλλη πλευρά του πλανήτη. Έτσι θα διαδραματίσει τεράστιο ρόλο στη χειρουργική από απόσταση (surgery from afar), στην παροχή υγειονομικής περίθαλψης σε εκατομμύρια ανθρώπους σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, καθώς και σε ειδικευμένους γιατρούς σε χειρουργικές ειδικότητες. Τα άτομα με χρόνιες ιατρικές παθήσεις θα επωφεληθούν από τις έξυπνες

συσκευές και την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Οι γιατροί μπορούν να συνδεθούν με ασθενείς από οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή και να τους συμβουλευθούν όταν είναι απαραίτητο. Η βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης πρέπει να ενσωματώσει όλη τη λειτουργία με τη χρήση ενός ισχυρού δικτύου. Το 5G θα ενισχύσει τη βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης με έξυπνες ιατρικές συσκευές (smart medical devices), το Διαδίκτυο των Ιατρικών Πραγμάτων (Internet of medical Things), έξυπνες αναλύσεις (smart analytics) και τεχνολογίες ιατρικής απεικόνισης υψηλής ευκρίνειας. Οι έξυπνες ιατρικές συσκευές, όπως τα wearables, θα παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση του ασθενούς και θα προειδοποιούν σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Τα νοσοκομεία θα λαμβάνουν τις ειδοποιήσεις και θα μπορούν να κάνουν τα απαραίτητα βήματα για την επιτάχυνση της διάγνωσης και της θεραπείας.

7. Αυτόνομη Οδήγηση

Χάρη στην ταχύτητα και την γρήγορη απόκριση του 5G, τα αυτοκίνητα θα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο, γνωρίζοντας πότε ένα άλλο όχημα αλλάζει λωρίδα ή φρενάρει, προσαρμόζοντας έτσι την οδηγική τους συμπεριφορά. Έτσι τα αυτοκίνητα μπορεί να γνωρίζουν πριν από τους οδηγούς αν ένα φορτηγό που βρίσκεται μακριά ξαφνικά φρενάρει απότομα ή αν ένα αυτοκίνητο βρίσκεται στη νεκρή γωνία. Φαίνεται λοιπόν πως η εφαρμογή του 5G στην αυτοκίνηση είναι ιδιαίτερα σημαντική και μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή ατυχημάτων.

Η Tesla υπόσχεται πως μέχρι τα τέλη του 2021 θα έχει έτοιμο ένα πραγματικό σύστημα οδήγησης 'επιπέδου 5', όπου τα αυτοκίνητα όχι απλά θα κινούνται χωρίς καμία παρέμβαση από την πλευρά του οδηγού, αλλά δεν θα έχουν καν τιμόνι [20].

8. Drone operation

Τα drones γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλή εξαιτίας των πολλαπλών λειτουργιών τους σε τομείς όπως η ψυχαγωγία, η λήψη βίντεο, η ιατρική, η ασφάλεια, η αναγκαία πρόσβασης σε δύσκολες καταστάσεις κλπ. Το δίκτυο 5G παρέχει ισχυρή υποστήριξη με υψηλή ταχύτητα ασύρματης σύνδεσης στο διαδίκτυο για τις λειτουργίες των drones. Για παράδειγμα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπως οι φυσικές καταστροφές, οι άνθρωποι έχουν περιορισμένη πρόσβαση σε πολλές περιοχές όπου τα drones μπορούν να προσεγγίσουν και να συλλέξουν χρήσιμες πληροφορίες.

9. Satellite Internet

Η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας 5G μέσω δορυφόρου είναι μία από τις σημαντικότερες βελτιώσεις στην τεχνολογία του διαδικτύου για απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν είναι διαθέσιμοι συμβατικοί επίγειοι σταθμοί βάσης. Η τεχνολογία δορυφορικού διαδικτύου προσφέρει συνδεσιμότητα σε αστικές και αγροτικές περιοχές σε όλο τον κόσμο με τη βοήθεια ενός αστερισμού χιλιάδων μικρών δορυφόρων.

5. Όρια ακτινοβολίας

Η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από τις Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection - ICNIRP) είναι μια ανεξάρτητη επιστημονική επιτροπή εμπειρογνομόνων που παρέχει επιστημονικές συμβουλές και καθοδήγηση σχετικά με τις επιδράσεις της μη ιονίζουσας ακτινοβολίας στην υγεία και το περιβάλλον (Non-Ionizing Radiation - NIR), στην προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος. Συνεργάζεται με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ) και άλλες κυβερνητικές υπηρεσίες. Τα μέλη του ICNIRP δεν απασχολούνται στη βιομηχανία και η χρηματοδότηση προέρχεται από εθνικά και διεθνή δημόσια ιδρύματα.

Τον Μάρτιο του 2020, το ICNIRP παρείχε ενημερωμένες κατευθυντήριες γραμμές που διασφαλίζουν την προστασία των ανθρώπων από όλους τους καθιερωμένους κινδύνους για την υγεία όταν εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία ραδιοσυχνοτήτων (RF-EMF) στην περιοχή από 100 kHz έως 300 GHz [21].

Οι ενημερώσεις στα όρια βασίζονται σε βελτιωμένη επιστημονική ακρίβεια και παρέχουν όρια για τις συνθήκες έκθεσης που δεν ελήφθησαν υπόψιν στις οδηγίες του ICNIRP (1998). Η συναίνεση των αναθεωρήσεων εμπειρογνομόνων είναι ότι δεν υπάρχουν καθιερωμένοι κίνδυνοι για την υγεία για κινητές συσκευές ή σταθμούς βάσης που συμμορφώνονται με τα όρια στις οδηγίες του ICNIRP.

Η διαδικασία ενημέρωσης του ICNIRP (2020) διήρκεσε επτά χρόνια και περιελάμβανε μια επίσημη φάση δημόσιας διαβούλευσης το 2018.

Το ICNIRP αναφέρει ότι δεν υπάρχουν στοιχεία που να αποδεικνύουν ότι πρόσθετα προληπτικά μέτρα θα ωφελήσουν την υγεία του πληθυσμού. Το ICNIRP συνιστά έντονα στις χώρες να ενημερώσουν τους εθνικούς κανονισμούς για να ευθυγραμμιστούν με τις οδηγίες του ICNIRP (2020).

Το ICNIRP κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι κατευθυντήριες γραμμές του ICNIRP (1998), που αποτελούν τη βάση της πολιτικής σε πολλές χώρες, είναι συντηρητικές στις περισσότερες περιπτώσεις και παρέχουν επαρκή προστασία στις τρέχουσες τεχνολογίες. Συνεπώς, οι βασικοί περιορισμοί του ICNIRP (1998) διατηρούνται στις ενημερωμένες οδηγίες ICNIRP (2020). Το ICNIRP ανέπτυξε πιο λεπτομερείς οδηγίες έκθεσης για ορισμένες περιπτώσεις και ειδικότερα για το εύρος συχνοτήτων άνω των 6 GHz.

- Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας

Υπάρχουν λίγες σημαντικές αλλαγές για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, το διευρυμένο εύρος συχνοτήτων για βασικούς περιορισμούς και νέα όρια τοπικής έκθεσης μπορεί να έχει πρακτικές επιπτώσεις σε ορισμένες καταστάσεις έκθεσης.

- Κινητά τηλέφωνα

Οι τιμές των ορίων, των κινητών συσκευών, είναι αμετάβλητες κάτω από τα 6 GHz. Τα επικαιροποιημένα όρια πυκνότητας ισχύος έχουν άμεσες εφαρμογές για την αξιολόγηση κινητών και φορητών συσκευών που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 6 GHz.

5.1 Οι αρχές λειτουργίας του ICNIRP 2020

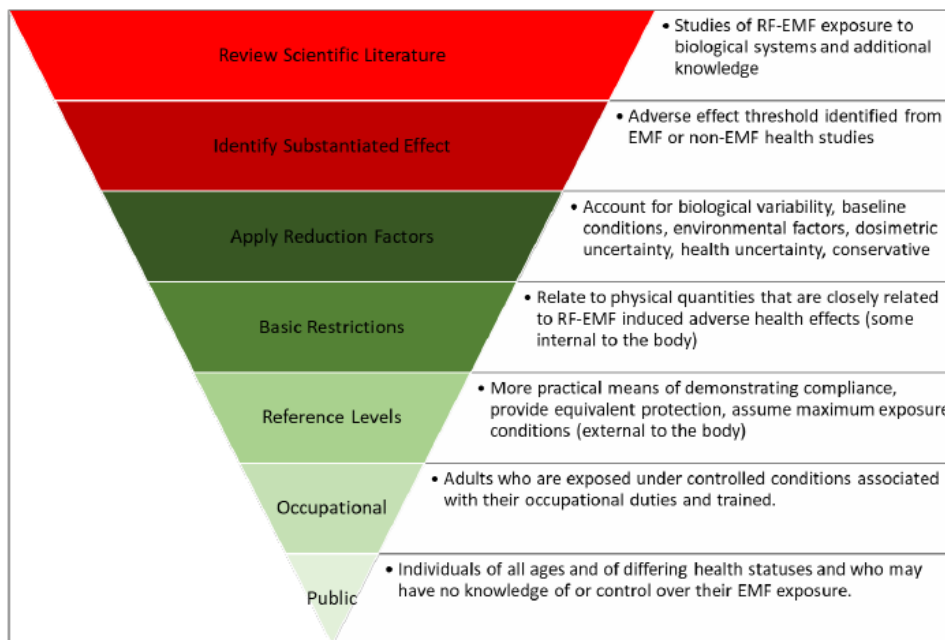
Οι ενημερωμένες οδηγίες αντικαθιστούν το τμήμα 100 kHz έως 300 GHz του ICNIRP (1998) RF-EMF, καθώς και το τμήμα 100 kHz έως 10 MHz των οδηγιών χαμηλής συχνότητας ICNIRP (2010) [22].

Το ICNIRP αναφέρει ότι οι επικαιροποιημένες οδηγίες παρέχουν υψηλό επίπεδο προστασίας για όλους τους ανθρώπους από τεκμηριωμένες αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία από έκθεση σε βραχυπρόθεσμη, μακροπρόθεσμη, συνεχή και ασυνεχή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Οι οδηγίες του, πρακτικά, καθορίζουν ποσοτικά επίπεδα RF-EMF για προσωπική έκθεση. Η τήρηση αυτών των επιπέδων αποσκοπεί στην προστασία των ανθρώπων από όλες τις τεκμηριωμένες επιδράσεις της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που είναι επιβλαβής για την υγεία.

Η βασική αρχή του ICNIRP είναι πως, σε γενικές γραμμές, οι ανεπιθύμητες ενέργειες των ηλεκτρομαγνητικών ραδιοσυχνοτήτων στην υγεία πρέπει να επαληθεύονται ανεξάρτητα, να είναι επαρκούς επιστημονικής ποιότητας και να συνάδουν με την τρέχουσα επιστημονική κατανόηση, προκειμένου να ληφθούν ως «αποδεικτικά στοιχεία» και να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό περιορισμών έκθεσης.

Η 'συντηρητική' προσέγγιση που χρησιμοποιείται από το ICNIRP για την ανάπτυξη των ορίων για RF-EMF απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 6 Η προσέγγιση του ICNIRP για την ανάπτυξη των ορίων [22].

Επίσης, το ICNIRP καθορίζει τόσο βασικούς περιορισμούς, όσο και επίπεδα αναφοράς και δηλώνει ότι αυτά παρέχουν «ισοδύναμη προστασία». Ωστόσο, καθώς χρησιμοποιούνται συντηρητικές παραδοχές για την εξαγωγή των επιπέδων αναφοράς στις περισσότερες περιπτώσεις, το ICNIRP υποστηρίζει πως «η τήρηση των επιπέδων αναφοράς θα οδηγήσει σε σημαντικά χαμηλότερα ανοίγματα από όσα επιτρέπουν οι αντίστοιχοι βασικοί περιορισμοί».

5.2 Όρια επαγγελματικής και δημόσιας έκθεσης

Οι επικαιροποιημένες οδηγίες του ICNIRP διατηρούν διαφορετικά όρια για άτομα που εκτίθενται στον επαγγελματικό τους χώρο και άλλα όρια για τα μέλη του ευρύτερου κοινού. Οι περιορισμοί για το κοινό είναι πιο αυστηροί, χωρίς αυτό να σημαίνει πως οι εργαζόμενοι βρίσκονται σε μεγαλύτερο κίνδυνο, καθώς τους παρέχεται κατάλληλος έλεγχος και εκπαίδευση.

Ενήλικες που εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μέσα από τα επαγγελματικά τους καθήκοντα, εκπαιδεύονται, ούτως ώστε να γνωρίζουν τους πιθανούς κινδύνους και να χρησιμοποιούν κατάλληλα μέτρα για την ασφαλή έκθεσή τους στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ένας εργαζόμενος θα πρέπει επίσης να υπόκειται σε κατάλληλο πρόγραμμα υγείας και ασφάλειας, το οποίο θα παρέχει τις παραπάνω πληροφορίες.

Μιλώντας για μέλη του ευρύτερου κοινού, γίνεται αναφορά σε άτομα που ανήκουν σε διαφορετικές ηλικίες, που έχουν διαφορετικά προβλήματα υγείας και πιθανότατα δεν έχουν καμία γνώση για την προστασία τους από την έκθεσή τους σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

5.3 Θερμοκρασία

Στις επικαιροποιημένες κατευθυντήριες γραμμές, το ICNIRP 2020 καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι μόνες τεκμηριωμένες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία που προκαλούνται από έκθεση σε RF-EMF άνω των 10 MHz, προκαλούνται από αύξηση της θερμοκρασίας.

- Αύξηση θερμοκρασίας

Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ο προσδιορισμένος από τον ICNIRP μηχανισμός συνάφειας για τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται για τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και οι περιορισμοί τίθενται για να αποφευχθεί η «σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας».

Το ICNIRP διαφοροποιεί τις αυξήσεις της θερμοκρασίας σε σταθερή κατάσταση (όπου η θερμοκρασία αυξάνεται αργά, αφήνοντας χρόνο για τη διάχυση της θερμότητας και για να ισχύσουν οι θερμορυθμιστικές διαδικασίες του σώματος) και σε σύντομες αυξήσεις της θερμοκρασίας (όπου μπορεί να μην υπάρχει αρκετός χρόνος για τη διάχυση της θερμότητας). Τα κατώφλια αύξησης της θερμοκρασίας για εκθέσεις σε σταθερή κατάσταση παρατίθενται στην παρακάτω εικόνα.

	Frequency range	Operational threshold	Spatial averaging	Temporal averaging	EMF threshold	Reduction factor	Occupational	Reduction factor	Public
Core body temperature	100 kHz – 300 GHz	+1°	WBA	30 min	4 W/kg	10	0.4 W/kg	50	0.08 W/kg
Local temperature (Head, Torso)	100 kHz – 6 GHz	+2°	10 g	6 min	20 W/kg	2	10 W/kg	10	2 W/kg
Local temperature (Limbs)	100 kHz – 6 GHz	+5°	10 g	6 min	40 W/kg	2	20 W/kg	10	4 W/kg
Local temperature (Head, Torso, Limbs)	>6 – 300 GHz	+5°	4 cm ²	6 min	200 W/m ²	2	100 W/m ²	10	20 W/m ²
	30-300 GHz		1 cm ²	6 min	400 W/m ²		200 W/m ²		40 W/m ²

Note:
WBA = Whole-body average.

Εικόνα 7 Λειτουργικά κατώφλια σταθερής κατάστασης, κατώφλια EMF και βασικοί περιορισμοί για επαγγελματική και δημόσια έκθεση [22].

- Whole-body core temperature

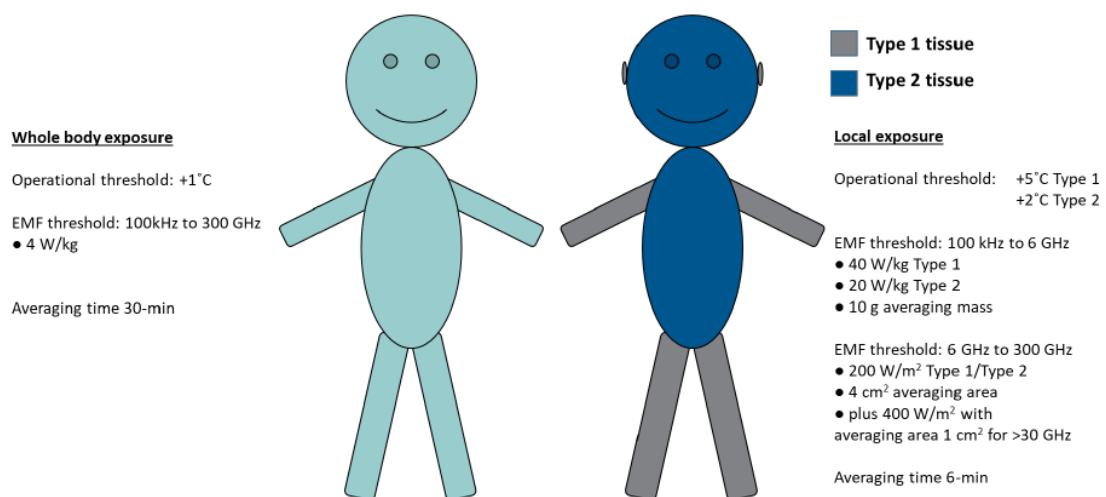
Το λειτουργικό όριο +1°C προκύπτει από τις οδηγίες για το εργασιακό περιβάλλον. Το ICNIRP επέλεξε 4 W/kg ως συντηρητικό όριο EMF και αυτό επεκτάθηκε στα 300 GHz (στις οδηγίες του 1998 σταμάτησε στα 10 GHz). Ο μέσος χρόνος άλλαξε σε 30 λεπτά για να ληφθεί υπόψη ο χρόνος που χρειάζεται ολόκληρο το σώμα για να φτάσει σε θερμοκρασία σταθερής κατάστασης.

- Local Temperature

Τα λειτουργικά κατώφλια, +5°C για ιστούς τύπου 1 (όλοι οι ιστοί του άνω βραχίονα, του αντιβραχίου, του χεριού, του μηρού, του ποδιού, του πέλματος, της κνήμης και του κερατοειδούς χιτώνα, του πρόσθιου θαλάμου και της ίριδας του ματιού, επιδερμικού, δερματικού, λίπους, μυών και οστού) και +2°C για ιστούς τύπου 2 (όλους τους ιστούς στο κεφάλι, το μάτι, την κοιλιά, την πλάτη, το θώρακα και τη λεκάνη, εξαιρουμένων εκείνων που ορίζονται ως ιστού τύπου 1), βασίζονται στον περιορισμό των τοπικών θερμοκρασιών σε λιγότερο από 41°C. Από 100 kHz έως 6 GHz, το ICNIRP διατηρεί τα τοπικά όρια SAR (Specific Absorption Rate (W/kg)) με βάση τη μάζα των 10 g (Ένας όγκος 10 g είναι περίπου ένας κύβος 2,15 cm x 2,15 cm x 2,15 cm, με βάση την υπόθεση ότι ο ιστός έχει την ίδια πυκνότητα μάζας με το νερό, 1.000 kg/m³) με κατώφλια EMF 40 W/kg για Τύπο 1 και 20 W/kg για ιστούς Τύπου 2.

Καθώς η ενέργεια RF-EMF απορροφάται επιφανειακά σε υψηλότερες συχνότητες, από 6 GHz έως 300 GHz το ICNIRP καθορίζει ένα νέο τοπικό όριο πυκνότητας απορροφημένης ισχύος (Local absorbed power density – Sab (W/m²)) 200 W/m² για ιστούς τύπου 1 και τύπου 2 με μέση περιοχή 4 cm² και επιπλέον περιορισμός 400 W/m² με μέση περιοχή 1 cm² για συχνότητες μεγαλύτερες από 30 GHz.

Ο μέσος χρόνος τόσο για το SAR όσο και για το Sab διατηρήθηκε στα 6 λεπτά, καθώς ταιριάζει στενά με τη σταθερά θερμικού χρόνου για τοπική έκθεση. Τα όρια λειτουργικών επιδράσεων ολόκληρου του σώματος και τοπικής θερμοκρασίας και τα αντίστοιχα κατώφλια EMF συνοψίζονται στις εικόνες 7 και 8.



Εικόνα 8 ICNIRP (2020) Όρια έκθεσης σε ολόκληρο το σώμα και σε τοπική έκθεση [22]

5.4 Βασικοί περιορισμοί του ICNIRP

Το ICNIRP αντλεί τους βασικούς περιορισμούς από τα κατώτατα όρια για επιδράσεις στην υγεία που προκαλούνται από RF-EMF, όπως συζητήθηκε και παραπάνω. Οι τιμές

των βασικών περιορισμών για τους εργαζόμενους και το κοινό φαίνονται στην Εικόνα 7 μαζί με τους συντελεστές μείωσης.

Το ICNIRP δηλώνει ότι για να συμμορφωθούν με τις αναθεωρημένες κατευθυντήριες γραμμές για κάθε ποσότητα έκθεσης και τον όρο χρονικού και χωρικού μέσου όρου, πρέπει να τηρούνται είτε ο βασικός περιορισμός, είτε το αντίστοιχο επίπεδο αναφοράς. Δεν απαιτείται συμμόρφωση και με τα δύο. Επίσης, για να είναι συμβατή η έκθεση RF-EMF δεν πρέπει να υπερβαίνει κανέναν από τους βασικούς περιορισμούς που ισχύουν για την καθορισμένη συχνότητα.

- Whole-body SAR

Οι τιμές για τα όρια SAR ολόκληρου του σώματος για τους εργαζόμενους και το κοινό είναι αμετάβλητες μεταξύ των οδηγιών ICNIRP (1998) και ICNIRP (2020). Το όριο SAR ολόκληρου του σώματος επεκτείνεται στα 300 GHz ενώ στις οδηγίες του ICNIRP (1998) σταμάτησε στα 10 GHz. Ο μέσος χρόνος μεταβάλλεται σε 30 λεπτά, ενώ ήταν 6 λεπτά στις οδηγίες του ICNIRP (1998).

Το ICNIRP σχολιάζει ότι αυτό θα δικαιολογούσε λιγότερο συντηρητικούς παράγοντες μείωσης (που συνεπάγονται υψηλότερους βασικούς περιορισμούς), αλλά τα όρια SAR ολόκληρου του σώματος παραμένουν αμετάβλητα για να διατηρηθεί η σταθερότητα στις οδηγίες.

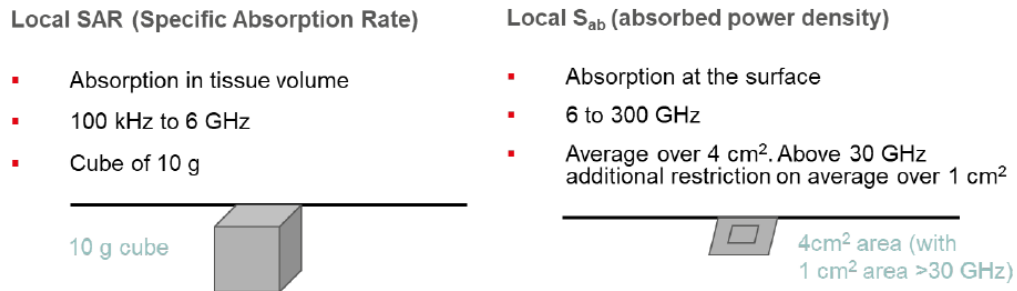
- Local SAR

Οι τιμές για τα τοπικά όρια SAR για τους εργαζόμενους και το κοινό είναι αμετάβλητες μεταξύ των οδηγιών ICNIRP (1998) και ICNIRP (2020). Τα τοπικά όρια SAR σταματούν στα 6 GHz, ενώ στις οδηγίες του 1998 σταμάτησαν στα 10 GHz. Η μέση μάζα παραμένει η ίδια, 10 g. Ο μέσος χρόνος παραμένει αμετάβλητος στα 6 λεπτά.

Το ICNIRP λέει ότι οι μικρότεροι συντελεστές μείωσης της τοπικής έκθεσης, σε σχέση με αυτούς για την έκθεση ολόκληρου του σώματος, δικαιολογούνται επειδή το σχετικό όριο επιδράσεων στην υγεία εξαρτάται λιγότερο από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και επειδή η σχετική επίδραση στην υγεία είναι λιγότερο σοβαρή ιατρικά.

- Local absorbed power density

Το S_{ab} είναι ένας νέος βασικός περιορισμός που λαμβάνει υπόψη την πιο επιφανειακή απορρόφηση του RF-EMF, καθώς η συχνότητα αυξάνεται και εφαρμόζεται πάνω από τα 6 GHz. Το SAR και το S_{ab} συγκρίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 9 Σύγκριση μεταξύ SAR και S_{ab} [22].

5.5 Επίπεδα αναφοράς ICNIRP

Τα επίπεδα αναφοράς του ICNIRP έχουν προκύψει από υπολογιστικές μελέτες και μελέτες μετρήσεων (computational and measurement studies). Αντιπροσωπεύουν ένα πρακτικό μέσο, χρησιμοποιώντας ποσότητες που εκτιμώνται πιο εύκολα από τους βασικούς περιορισμούς και παρέχουν ισοδύναμο επίπεδο προστασίας για συνθήκες σεναρίων μέγιστης έκθεσης.

Το ICNIRP σημειώνει ότι τα επίπεδα αναφοράς βασίζονται σε συντηρητικές υποθέσεις και στα περισσότερα σενάρια έκθεσης τα επίπεδα αναφοράς θα είναι πιο συντηρητικά από τους αντίστοιχους βασικούς περιορισμούς.

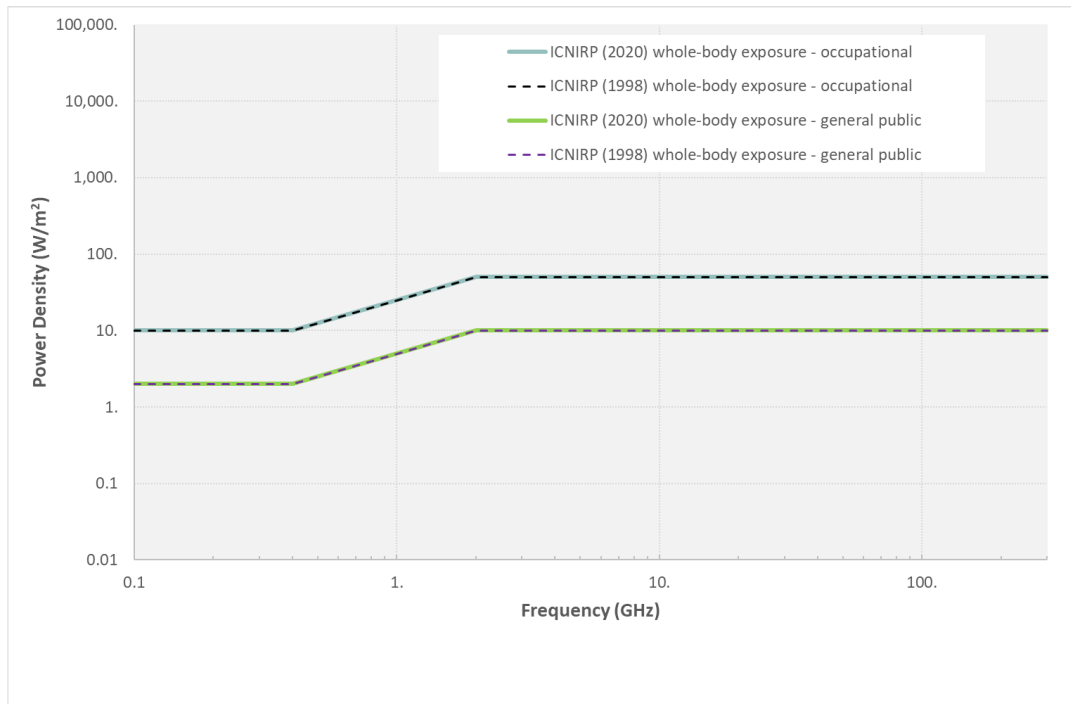
Όπως φαίνεται, τα επίπεδα αναφοράς καθορίζονται με τον μέσο όρο και τους χρόνους ολοκλήρωσης για τις σχετικές ποσότητες έκθεσης για να καθοριστεί εάν μια έκθεση στην ακτινοβολία συμφωνεί με τις δοθείσες οδηγίες.

Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα επίπεδα αναφοράς προβλέπουν επαρκώς τους βασικούς περιορισμούς, έχουν καθοριστεί διαφορετικοί κανόνες αξιολόγησης του επιπέδου αναφοράς ανάλογα με το αν βρίσκονται εντός της ζώνης μακρινού πεδίου, ακτινοβολίας ή αντιδραστικότητας. Ως οδηγός, το ICNIRP παρέχει ορισμούς για αυτές τις ζώνες και σημειώνει ότι οι πληροφορίες από φορείς τεχνικών προτύπων θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των διαδικασιών αξιολόγησης για τα επίπεδα αναφοράς.

Μια άλλη αλλαγή στις οδηγίες του ICNIRP (2020) είναι ότι για κάθε βασικό περιορισμό υπάρχει ένα αντίστοιχο επίπεδο αναφοράς. Πρακτικά, αυτό σημαίνει, πως το ICNIRP (2020) περιλαμβάνει επίπεδα αναφοράς για ολόκληρο το σώμα, αλλά και local, ενώ το ICNIRP (1998) περιελάμβανε μόνο επίπεδα αναφοράς για ολόκληρο το σώμα.

- Whole-body reference levels

Τα επίπεδα αναφοράς ολόκληρου του σώματος για συχνότητες άνω των 400 MHz (με τα ισοδύναμα ICNIRP (1998)) φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 10 ICNIRP (2020) Επίπεδα αναφοράς ολόκληρου του σώματος για τους εργαζόμενους και το κοινό για τις εκδόσεις ICNIRP(2020) και (1998) [22].

Exposure scenario	Frequency range	Incident E-field strength; E_{inc} (V/m)	Incident H-field strength; H_{inc} (A/m)	Incident power density; S_{inc} (W/m ²)
Occupational	>400 – 2000 MHz	$3f_M^{0.5}$	$0.008f_M^{0.5}$	$f_M/40$
	>2 – 300 GHz	NA	NA	50
General public	>400 – 2000 MHz	$1.375f_M^{0.5}$	$0.0037f_M^{0.5}$	$f_M/200$
	>2 – 300 GHz	NA	NA	10

Notes:

1. NA signifies “not applicable” and does not need to be taken into account when determining compliance.
2. f_M is frequency in MHz.
3. S_{inc} , E_{inc} , and H_{inc} are to be averaged over 30 min, over the whole-body space. Temporal and spatial averaging of each of E_{inc} and H_{inc} must be conducted by averaging over the relevant square values (see eqn 8 in Appendix A of ICNIRP (2020) for details).
4. For frequencies of >30MHz to 2 GHz: (a) within the far-field zone: compliance is demonstrated if either S_{inc} , E_{inc} or H_{inc} , does not exceed the above reference level values (only one is required); S_{eq} may be substituted for S_{inc} ; (b) within the radiative near-field zone, compliance is demonstrated if either S_{inc} , or both E_{inc} and H_{inc} , does not exceed the above reference level values; and (c) within the reactive near-field zone: compliance is demonstrated if both E_{inc} and H_{inc} do not exceed the above reference level values; S_{inc} cannot be used to demonstrate compliance, and so basic restrictions must be assessed.
5. For frequencies of >2 GHz to 300 GHz: (a) within the far-field zone: compliance is demonstrated if S_{inc} does not exceed the above reference level values; S_{eq} may be substituted for S_{inc} ; (b) within the radiative near-field zone, compliance is demonstrated if S_{inc} does not exceed the above reference level values; and (c) within the reactive near-field zone, reference levels cannot be used to determine compliance, and so basic restrictions must be assessed.

Εικόνα 11 ICNIRP (2020) Επίπεδα αναφοράς κατά μέσο όρο σε ολόκληρο το σώμα, 30 λεπτά [22].

Ενώ δεν υπάρχουν αλλαγές στις τιμές για τα επίπεδα αναφοράς άνω των 400 MHz, υπάρχει αλλαγή στις καθορισμένες ποσότητες πεδίου. Πάνω από 2 GHz, το ICNIRP (2020) παρέχει μόνο όρια πυκνότητας ισχύος και κανένα ισοδύναμο όριο ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου.

Το ICNIRP αναφέρει επίσης ότι η ισοδύναμη πυκνότητα ισχύος του κύματος του επιπέδου (S_{eq}) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση του S_{inc} στο μακρινό πεδίο (30 MHz έως 300 GHz).

- Επίπεδα αναφοράς τοπικής έκθεσης

Οι κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (2020) περιλαμβάνουν επίπεδα αναφοράς τοπικής έκθεσης. Αυτά παρουσιάζονται για συχνότητες άνω των 400 MHz στις εικόνες 12 και 13.

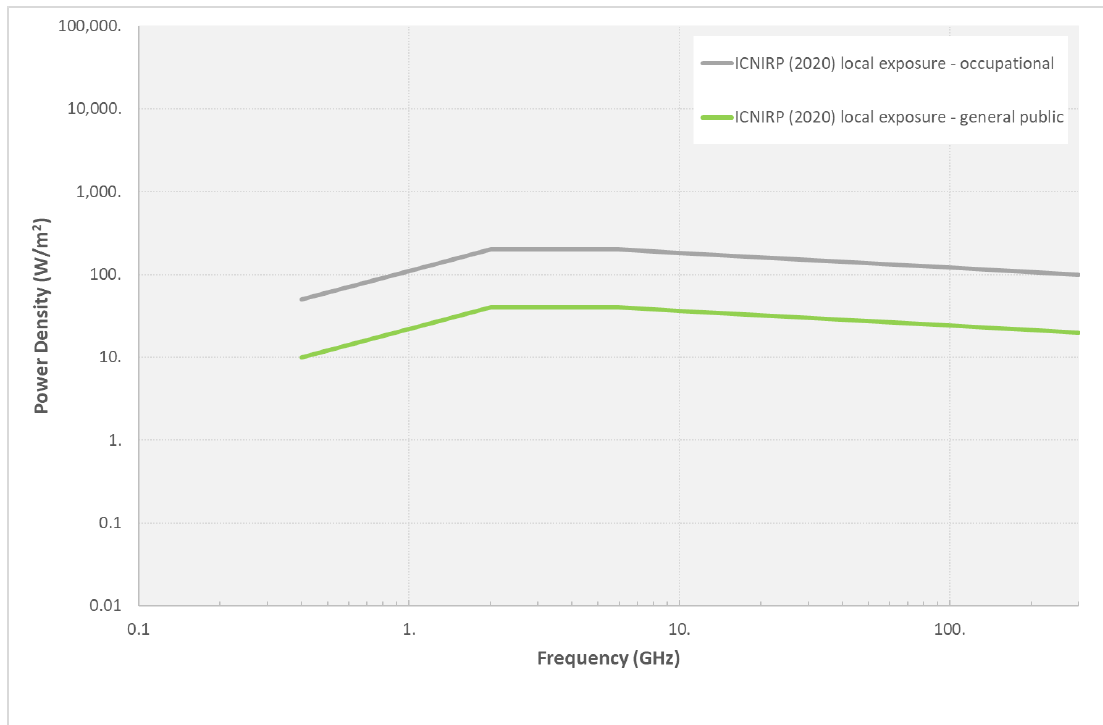
Για συχνότητες μικρότερες των 6 GHz, ο μέσος χρόνος είναι 6 λεπτά, ίδιος δηλαδή με τους βασικούς περιορισμούς τοπικής έκθεσης. Για συχνότητες μεγαλύτερες των 6 GHz η μέση περιοχή είναι 4 cm^2 με τον επιπλέον περιορισμό που υπερβαίνει τα 30 GHz, η έκθεση άνω του 1 cm^2 δεν πρέπει να υπερβαίνει το διπλάσιο του περιορισμού των 4 cm^2 .

Exposure scenario	Frequency range	Incident E-field strength; E_{inc} (V/m)	Incident H-field strength; H_{inc} (A/m)	Incident power density; S_{inc} (W/m ²)
Occupational	>400 – 2000 MHz	$3f_M^{0.5}$	$0.008f_M^{0.5}$	$0.29f_M^{0.86}$
	>2 – 6 GHz	NA	NA	200
	>6 GHz - <300 GHz	NA	NA	$275/f_G^{0.177}$
	300 GHz	NA	NA	100
General public	>400 – 2000 MHz	$1.375f_M^{0.5}$	$0.0037f_M^{0.5}$	$0.058f_M^{0.86}$
	>2 – 6 GHz	NA	NA	40
	>6 GHz - <300 GHz	NA	NA	$55/f_G^{0.177}$
	300 GHz	NA	NA	20

Note:

1. "NA" signifies "not applicable" and does not need to be taken into account when determining compliance.
2. f_M is frequency in MHz; f_G is frequency in GHz.
3. S_{inc} , E_{inc} , and H_{inc} are to be averaged over 6 min, and where spatial averaging is specified in Notes 6–7, over the relevant projected body space. Temporal and spatial averaging of each of E_{inc} and H_{inc} must be conducted by averaging over the relevant square values (see eqn 8 in Appendix A of ICNIRP (2020) for details).
5. For frequencies of >30MHz to 6 GHz: (a) within the far-field zone, compliance is demonstrated if one of peak spatial S_{inc} , E_{inc} or H_{inc} , over the projected whole-body space, does not exceed the above reference level values (only one is required); S_{eq} may be substituted for S_{inc} ; (b) within the radiative near-field zone, compliance is demonstrated if either peak spatial S_{inc} , or both peak spatial E_{inc} and H_{inc} , over the projected whole-body space, does not exceed the above reference level values; and (c) within the reactive near-field zone: compliance is demonstrated if both E_{inc} and H_{inc} do not exceed the above reference level values; S_{inc} cannot be used to demonstrate compliance; for frequencies >2 GHz, reference levels cannot be used to determine compliance, and so basic restrictions must be assessed.
6. For frequencies of >6 GHz to 300 GHz: (a) within the far-field zone, compliance is demonstrated if S_{inc} , averaged over a square 4-cm² projected body surface space, does not exceed the above reference level values; S_{eq} may be substituted for S_{inc} ; (b) within the radiative near-field zone, compliance is demonstrated if S_{inc} , averaged over a square 4-cm² projected body surface space, does not exceed the above reference level values; and (c) within the reactive near-field zone reference levels cannot be used to determine compliance, and so basic restrictions must be assessed.
7. For frequencies of >30 GHz to 300 GHz, exposure averaged over a square 1-cm² projected body surface space must not exceed twice that of the square 4-cm² restrictions.

Εικόνα 12 ICNIRP (2020) Επίπεδα αναφοράς κατά μέσο όρο σε τοπική έκθεση, 6 λεπτά [22].



Εικόνα 13 Επίπεδα αναφοράς για τοπική έκθεση, για τους εργαζόμενους και το κοινό, κατά μέσο όρο 6 λεπτά, ICNIRP (2020) [22].

Αναμένεται ότι τα επίπεδα αναφοράς τοπικής έκθεσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη συμμόρφωση των προϊόντων RF-EMF που εκθέτουν τοπικά το σώμα όπου αυτό είναι σύμφωνο με τις διατάξεις του ICNIRP (2020) για ζώνες κοντινού/μακρινού πεδίου.

5.6 Διαφορές μεταξύ των εκδόσεων 1998 και 2020

- Διαφάνεια

Η έκδοση του 2020 έχει αυξήσει σημαντικά τα επίπεδα διαφάνειας σε σχέση με την έκδοση του 1998. Αυτό κατέστη δυνατό λόγω του μεγάλου πλούτου της επιστημονικής έρευνας που διεξήχθη από τις προηγούμενες κατευθυντήριες γραμμές, με αποτέλεσμα να είναι πλέον δυνατό να δούμε τις αποφάσεις που λαμβάνονται σε κάθε βήμα των περιορισμών. Αυτό λοιπόν επιτρέπει στο ICNIRP να συνεργάζεται ουσιαστικά με τις επιστημονικές κοινότητες, ούτως ώστε να βελτιώνονται και να αξιολογούνται οι κατευθυντήριες οδηγίες. Επίσης, σε περίπτωση που σε κάποια μεταγενέστερη έρευνα φανεί πως κάποια απόφαση είναι εσφαλμένη, τότε οι συνέπειες για τους περιορισμούς έκθεσης μπορούν εύκολα να εντοπιστούν και να αντιμετωπιστούν.

- Πεδίο εφαρμογής – Αρμοδιότητες

Το πεδίο εφαρμογής και των δύο κατευθυντήριων γραμμών είναι πολύ παρόμοιο, παρέχοντας προστασία από όλες τις δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, ανεξάρτητα από

το εάν οφείλονται σε οξεία ή χρόνια έκθεση, ανεξαρτήτως ηλικίας ή κατάστασης υγείας. Τα σενάρια έκθεσης είναι επίσης πολύ παρόμοια στις δύο κατευθυντήριες γραμμές.

- Εγκυμοσύνη

Οι εκδόσεις (1998) και (2010) δεν διαφέρουν μεταξύ των εγκύων και των μη έγκυων εργαζομένων ως προς τους επαγγελματικούς τους περιορισμούς έκθεσης, γεγονός που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το έμβρυο να εκτεθεί πάνω από τους πιο συντηρητικούς γενικούς δημόσιους περιορισμούς.

Αν και δεν υπάρχουν στοιχεία που να δείχνουν ότι η επαγγελματική έκθεση του εμβρύου θα είχε δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, ως συντηρητικό μέτρο, το ICNIRP (2020) αντιμετωπίζει το έμβρυο ως μέλος του ευρύτερου κοινού και επομένως υπόκειται σε γενικούς δημόσιους περιορισμούς.

Συνεπώς, για να διασφαλιστεί ότι η έκθεση του εμβρύου δεν υπερβαίνει τους περιορισμούς έκθεσης για το ευρύ κοινό, το ICNIRP (2020) διευκρινίζει ότι μια έγκυος εργαζόμενη υπόκειται στους γενικούς δημόσιους περιορισμούς.

Σημειώνουν επίσης ότι υπάρχουν μέτρα μετριασμού που μπορούν να ληφθούν υπόψη για να επιτραπεί στις εγκύους να εισέλθουν σε περιοχές όπου τα ηλεκτρομαγνητικά ηλεκτρικά ραδιοσυχνότητες βρίσκονται σε επίπεδα επαγγελματικής έκθεσης, χωρίς να υπερβαίνουν τους γενικούς περιορισμούς του κοινού.

- Νέοι περιορισμοί

Υπάρχουν δύο νέοι περιορισμοί στο ICNIRP (2020) που έχουν τη δυνατότητα να ενισχύσουν περαιτέρω την προστασία της υγείας.

1. Ανάπτυξη τεχνολογιών που χρησιμοποιούν συχνότητες EMF > 6 GHz, όπως το 5G, με νέους περιορισμούς για την καλύτερη προστασία από την υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας στο σώμα.
2. Το δεύτερο σχετίζεται με σύντομες εκθέσεις RF-EMF (<6 λεπτά), για να διασφαλιστεί ότι η παροδική αύξηση της θερμοκρασίας δεν είναι επαρκής για να προκαλέσει πόνο ή να επηρεάσει δυσμενώς τον ιστό. Οι παρούσες οδηγίες παρέχουν προστασία για διάρκεια έκθεσης έως 6 λεπτά σε όλο το σώμα.

Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του 1998, δεν έχουν γίνει γνωστές περιπτώσεις όπου η έκθεση έχει οδηγήσει σε παροδικές αυξήσεις θερμοκρασίας που έχουν επηρεάσει αρνητικά την υγεία, αλλά αυτός ο νέος περιορισμός της έκδοσης 2020, θα διασφαλίσει ότι οι νέες ή μελλοντικές τεχνολογικές χρήσεις δεν θα επηρεάσουν αρνητικά την υγεία.

- Περιορισμοί μέσης έκθεσης ολόκληρου του σώματος

Ο περιορισμός της έκθεσης ολόκληρου του σώματος στο ICNIRP (1998) ορίστηκε ως προς την ποσότητα «SAR» (Specific Energy Absorption Rate). Αυτό ισχύει και για το ICNIRP (2020). Ωστόσο, ενώ αυτός ο περιορισμός ίσχυε μόνο έως τα 10 GHz στο ICNIRP (1998), εφαρμόζεται σε ολόκληρο το εύρος των 100 kHz έως 300 GHz στο ICNIRP (2020).

Αυτό θα διασφαλίσει ότι οι εκθέσεις από τις νέες τεχνολογίες δεν οδηγούν σε

Όπου για το **SAR** ισχύει: Μετράει το ρυθμό με τον οποίο η ενέργεια απορροφάται ανά μονάδα μάζας, από ένα ανθρώπινο σώμα όταν αυτό εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

$$\mathbf{SAR} = \frac{\sigma \cdot E^2}{m_d} \text{ (W/kg)}, \text{ όπου}$$

E : ηλεκτρικό πεδίο (V/m)

σ : αγωγιμότητα υλικού (Siemens/m)

m_d: πυκνότητα μάζας υλικού (kg/m³)

υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας βαθιά στο σώμα. Ο μέσος χρόνος για αυτόν τον περιορισμό έχει επίσης αλλάξει από 6 λεπτά στο ICNIRP (1998) σε 30 λεπτά στο ICNIRP (2020), για να ταιριάζει καλύτερα με τον χρόνο που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του πυρήνα του σώματος.

- Συχνότητα

Στο ICNIRP (1998) το SAR χρησιμοποιήθηκε έως τα 10 GHz και η «πυκνότητα ισχύος» χρησιμοποιήθηκε πάνω από τα 10 GHz.

Χρησιμοποιούνται διαφορετικές ποσότητες επειδή το SAR μπορεί να υποτιμά την επιφανειακή έκθεση σε υψηλότερες συχνότητες, ενώ η πυκνότητα ισχύος μπορεί να υποτιμά τη βαθύτερη έκθεση σε χαμηλότερες συχνότητες. Αν και δεν υπάρχει ιδανική συχνότητα μετάβασης, το ICNIRP (2020) υιοθέτησε μια ρεαλιστική προσέγγιση και μείωσε τη συχνότητα μετάβασης από 10 GHz σε 6 GHz, επειδή παρέχει τον πιο ακριβή απολογισμό της συνολικής έκθεσης.

- Τοπική έκθεση με συχνότητα ≤ 6 GHz

Οι τιμές για τα τοπικά όρια SAR για τους εργαζόμενους και το κοινό παραμένουν αμετάβλητες μεταξύ των κατευθυντήριων γραμμών ICNIRP (1998) και ICNIRP (2020). Τα τοπικά όρια SAR σταματούν στα 6 GHz ενώ στις οδηγίες του 1998 σταματούσαν στα 10 GHz. Η μέση μάζα παραμένει η ίδια, 10 g. Ο μέσος χρόνος είναι αμετάβλητος στα 6 λεπτά.

- Τοπική έκθεση με συχνότητα > 6 GHz

Στην τοπική έκθεση για συχνότητα μεγαλύτερη των 6 GHz υπάρχουν οι εξής διαφορές:

1. Το CNIRP (1998) χρησιμοποίησε την έννοια 'πυκνότητα ισχύος', ενώ το ICNIRP (2020) χρησιμοποιεί την έννοια 'πυκνότητα απορροφούμενης ισχύος- absorbed power density (Sab)'. Το Sar χρησιμοποιείται, καθώς αποτελεί ένα μέτρο έκθεσης του σώματος, ικανοποιώντας έτσι το σκοπό του 'βασικού περιορισμού'. Αντίθετα, η πυκνότητα ισχύος, δεν αποτελεί μέτρο έκθεσης του σώματος επειδή έως και 50% της πυκνότητας ισχύος που προσπίπτει αντανακλάται μακριά από το σώμα.

Sab (πυκνότητα απορροφούμενης ισχύος): Είναι ένας νέος βασικός περιορισμός που λαμβάνει υπόψιν την πιο **επιφανειακή απορρόφηση** της ακτινοβολίας, καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Χρησιμοποιείται για την τοπική έκθεση για συχνότητες > 6 GHz.

2. Το ICNIRP (1998) υπολογίστηκε κατά μέσο όρο σε μια περιοχή 20 cm², το ICNIRP (2020) απαιτεί μέσο όρο για μια περιοχή 4 cm² (και σε ορισμένες περιπτώσεις μια περιοχή 1 cm²). Αυτή η περιοχή μέσης τιμής 4 cm² ταιριάζει με την όψη του μέσου όγκου (10 g) του SAR και παρέχει μια σταθερή μετάβαση στα 6 GHz. Αυτή η αλλαγή διασφαλίζει επίσης, ότι μια επιτρεπόμενη έκθεση άνω των 20 cm² δεν μπορεί να εστιαστεί σε μια μικρή περιοχή και να αυξήσει υπερβολικά τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, για έναν περιορισμό που βασίζεται σε μια μέση περιοχή 20 cm², μια ομοιογενής έκθεση σε μια περιοχή 4 cm² μπορεί να είναι 5 φορές υψηλότερη από ό,τι αν υπολογιστεί κατά μέσο όρο σε ολόκληρη την περιοχή των 20 cm².
3. Για να ληφθούν υπόψιν οι δέσμες υψηλής εστίασης που μπορεί να εμφανιστούν πάνω από 30 GHz, το ICNIRP (2020) έχει επίσης ενσωματώσει έναν περιορισμό 1 cm² για συχνότητες > 30 GHz.

Το 2 και το 3 είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τη διασφάλιση της ασφάλειας με μελλοντικές τεχνολογίες, όπως το 5G.

Σύγκριση του SAR και του Sab για την τοπική έκθεση:

Local SAR (Specific Absorption Rate) (W/kg)	Local Sab (absorbed power density) (W/m ²)
100 kHz – 6 GHz	6 GHz – 300 GHz
Απορρόφηση σε όγκο ιστού	Απορρόφηση στην επιφάνεια
Κύβος 10 g	Περιοχή με επιφάνεια 4 cm²
	Αν η συχνότητα είναι > 30 GHz, τότε περιοχή με επιφάνεια 1 cm²

Οι μεγαλύτερες συχνότητες δεν διαπερνούν στο σώμα, γι'αυτό και πάνω από τα 6 GHz μετράται επιφάνεια κι όχι όγκος.

4. Η τιμή του βασικού περιορισμού για EMF > 6 GHz (του Sab κι όχι της πυκνότητας ισχύος) έχει οριστεί ώστε να παρέχει ισοδύναμες μέγιστες εκθέσεις στο σώμα πάνω και κάτω από 6 GHz. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη αριθμητική βασική τιμή περιορισμού για EMF > 6 GHz από ό,τι στο ICNIRP (1998). Ωστόσο, λόγω της χρήσης μιας μέσης περιοχής 4 cm² στις παρούσες οδηγίες, σε αντίθεση με τα 20 cm² στο ICNIRP (1998), η μέγιστη έκθεση στο σώμα για EMF > 6 GHz είναι τώρα χαμηλότερη από ό,τι στην περίπτωση Κατευθυντήριες γραμμές του ICNIRP (1998).

- Περιορισμοί για σύντομες (<6 λεπτά), τοπικές εκθέσεις

Οι σύντομες, έντονες εκθέσεις σε ραδιοσυχνότητες RF-EMF μπορούν να αυξήσουν υπερβολικά τη θερμοκρασία του τοπικού ιστού, ακόμα κι αν η μέση ισχύς δεν υπερβαίνει τους μέσους περιορισμούς των 6 λεπτών. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για συχνότητες άνω των 30 GHz, αλλά μπορεί επίσης να συμβεί έως και 400 MHz.

Κατά συνέπεια, το ICNIRP (2020) παρέχει πρόσθετους περιορισμούς για να διασφαλίσει ότι οι εκθέσεις σε σύντομα χρονικά διαστήματα δεν οδηγούν σε υπερβολικές αυξήσεις της θερμοκρασίας.

Για συχνότητες > 400 MHz έως 6 GHz, αυτός ο περιορισμός δίνεται ως προς την ειδική απορρόφηση ενέργειας (SA) και πάνω από τα 6 GHz δίνεται ως προς την πυκνότητα απορροφούμενης ενέργειας (Uab). Αυτοί οι περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι οι νέες και μελλοντικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες RF-EMF, όπως το

-**Ειδική απορρόφηση ενέργειας SA (J/kg)**: Ορίζεται ως η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα μάζας βιολογικού ιστού και εκφράζεται σε τζάουλ ανά χιλιόγραμμα (J/Kg).

- **Πυκνότητα απορροφούμενης ενέργειας (Uab) (J/m²)**: Περιορισμός που λαμβάνει υπόψιν την **επιφανειακή απορρόφηση** της ενέργειας για συχνότητες > από 6 GHz.

5G, δεν θα οδηγήσουν σε υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας λόγω σύντομων εκθέσεων.

- Ακουστικό φαινόμενο μικροκυμάτων (Φαινόμενο Frey)

Έχει αναφερθεί η αίσθηση του βουητού στ' αυτιά από ορισμένους εργαζόμενους στις σύγχρονες περιοχές μετάδοσης μικροκυμάτων που εκπέμπουν παλμική ακτινοβολία μικροκυμάτων. Έχουν αναφερθεί ακουστικές αποκρίσεις σε μεταδιδόμενες συχνότητες από περίπου 200 MHz έως τουλάχιστον 3 GHz. Για το λόγο αυτό η έκδοση του ICNIRP 1998 έθεσε έναν περιορισμό για να αποφύγει την πιθανότητα αυτού του ακουστικού φαινομένου.

Ωστόσο, καθώς αυτό αντιπροσωπεύει ένα αισθητηριακό φαινόμενο, χωρίς στοιχεία ότι θα επηρεάσει αρνητικά την υγεία, αυτός ο περιορισμός δεν χρησιμοποιείται στις κατευθυντήριες γραμμές του ICNIRP (2020).

- Διέγερση των νεύρων

Στην έκδοση του 2020 υπάρχει επαναξιολόγηση για τους βασικούς περιορισμούς που είχαν σχεδιαστεί για την προστασία από τη διέγερση των νεύρων, που υπάρχει περίπτωση να συμβεί στις συχνότητες 100 kHz – 10 MHz.

- Επίπεδα αναφοράς

Το ICNIRP (1998) παρείχε επίπεδα αναφοράς για συνεχείς εκθέσεις ολόκληρου του σώματος. Ωστόσο, αυτά τα επίπεδα αναφοράς δεν κάλυπταν όλους τους τύπους βασικών περιορισμών. Το ICNIRP (2020) παρέχει επίπεδα αναφοράς που αντιστοιχούν σε όλους τους βασικούς περιορισμούς. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας που σχετίζεται με τις διακρίσεις κοντινού και μακρινού πεδίου, θα εξακολουθήσουν να υπάρχουν καταστάσεις όπου δεν είναι δυνατή η χρήση επιπέδων αναφοράς. Αυτές οι καταστάσεις προσδιορίζονται στις οδηγίες.

- Κατάργηση επιπέδων αναφοράς

Το ICNIRP (1998) περιελάμβανε επίπεδα αναφοράς ολόκληρου του σώματος, που καθορίζονται από το πεδίο E, του πεδίου H και την πυκνότητας ισχύος, πάνω από 10 GHz. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι τιμές του πεδίου E και του πεδίου H δεν παρέχουν πάντα μια καλή εκτίμηση των βασικών τιμών περιορισμού πάνω από περίπου 2 GHz, οι τιμές του πεδίου E και του πεδίου H δεν χρησιμοποιούνται στο ICNIRP (2020) για επίπεδα αναφοράς ολόκληρου του σώματος πάνω από 2 GHz.

- Προδιαγραφές των κανόνων συμμόρφωσης

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε ορισμένα σενάρια έκθεσης, τα επίπεδα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν είναι επαρκώς ενημερωτικά ώστε να

διασφαλίζεται ότι τα επίπεδα αναφοράς θα αντιστοιχούν στους βασικούς περιορισμούς. Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτείται συμμόρφωση με τους βασικούς περιορισμούς. Τα επίπεδα αναφοράς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση της συμμόρφωσης. Αυτό προσδιορίζεται πλέον σαφώς στο ICNIRP (2020). Για παράδειγμα, για EMF άνω των 2 GHz εντός της αντιδραστικής ζώνης κοντινού πεδίου, όπως αυτά που προέρχονται από πολλές συσκευές κινητών τηλεφώνων και μετρώνται κοντά στη συσκευή, τα επίπεδα αναφοράς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποδειχθεί η συμμόρφωση.

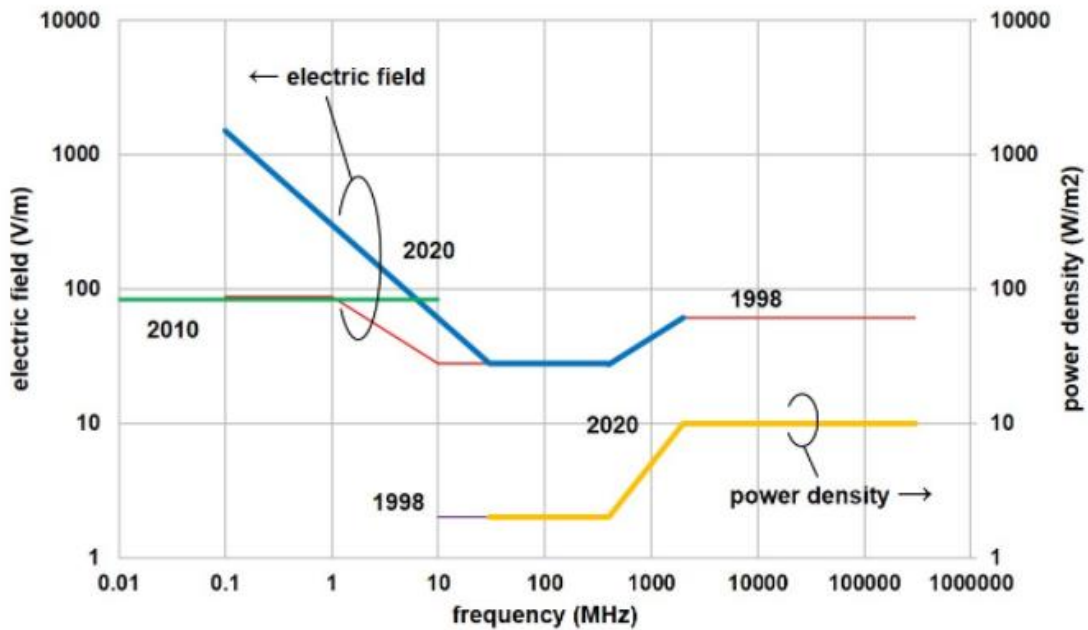
- Διαφορές στις τιμές των επιπέδων αναφοράς

Το ICNIRP (2020) εισήγαγε μια σειρά από νέες κατηγορίες επιπέδων αναφοράς, και έτσι αυτές παρέχουν τιμές επιπέδου αναφοράς που δεν υπήρχαν στο ICNIRP (1998).

Για το ICNIRP (1998) υπήρχε περιορισμένη διαθέσιμη έρευνα για συχνότητες κάτω των 30 MHz, με αποτέλεσμα τα επίπεδα αναφοράς να καθοριστούν πολύ συντηρητικά. Οι κατευθυντήριες γραμμές χαμηλών συχνοτήτων ICNIRP (2010), οι οποίες περιλάμβαναν επίπεδα αναφοράς για συχνότητες EMF έως 10 MHz, μείωσαν τα επίπεδα αναφοράς του ηλεκτρικού πεδίου και αύξησαν του μαγνητικού από 100 kHz σε 10 MHz, σε σχέση με το ICNIRP (1998).

Αυτές οι αλλαγές βασίστηκαν σε σχετικά αδύναμη επιστήμη, και στην περίπτωση του ηλεκτρικού πεδίου, ήταν επιχειρησιακά πολύ περιοριστικές. Ωστόσο, η έρευνα έχει πλέον καθορίσει καλύτερα τις σχέσεις μεταξύ των βασικών περιορισμών και των επιπέδων αναφοράς ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου και το ICNIRP (2020) έχει ενημερώσει αυτά τα επίπεδα αναφοράς για να ενσωματώσει τη βελτιωμένη πλέον γνώση. Αυτό δεν επηρεάζει τους βασικούς περιορισμούς, αλλά καθώς τώρα είναι γνωστό ότι απαιτούνται υψηλότερες τιμές επιπέδου αναφοράς για να φτάσουμε στους βασικούς περιορισμούς, τα επίπεδα αναφοράς αυξήθηκαν αναλόγως.

Το αποτέλεσμα λοιπόν είναι το εξής. Στην περιοχή συχνοτήτων από 100 kHz έως 30 MHz, τα επίπεδα αναφοράς πεδίου E και πεδίου H είναι υψηλότερα στο ICNIRP (2020) από ό,τι στο ICNIRP (1998). Επιπλέον, ενώ τα επίπεδα αναφοράς του πεδίου E και H αυξήθηκαν με τη μείωση της συχνότητας από 20 MHz στο ICNIRP (1998), η έρευνα έδειξε ότι για να ταιριάζει με τους βασικούς περιορισμούς για ολόκληρο το σώμα, αυτή η αύξηση θα πρέπει να ξεκινά από τα 30 MHz. Το ICNIRP (2020) έχει επομένως μια μονότονη αύξηση τόσο στις τιμές του επιπέδου αναφοράς του πεδίου E- όσο και στο επίπεδο H με φθίνουσα συχνότητα, που ξεκινά από τα 30 MHz. Αυτές οι διαφορές φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.

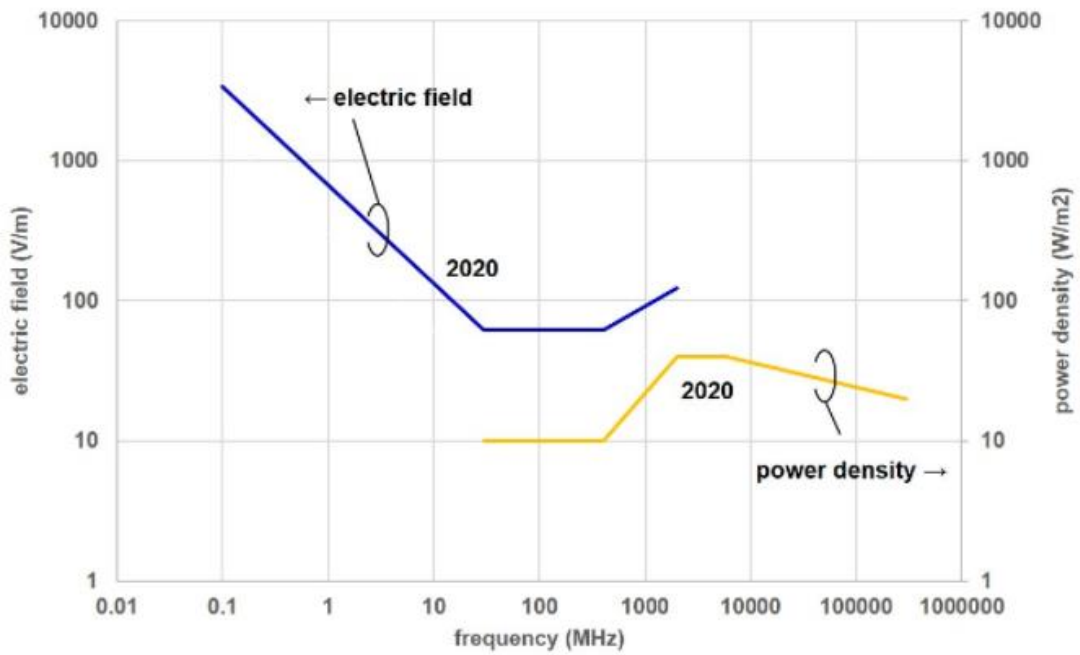


Εικόνα 14 Μέση τιμή αναφοράς για ολόκληρο το σώμα για το κοινό για τις κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (1998), ICNIRP (2010) και ICNIRP (2020), για το εύρος συχνοτήτων 100 kHz έως 300 GHz [22].

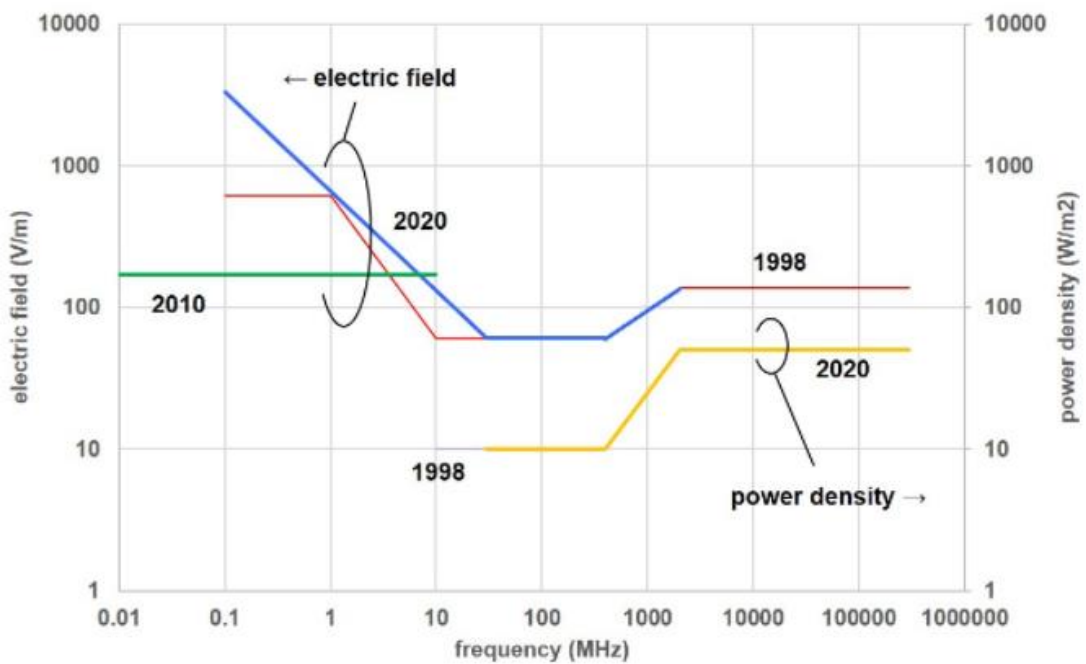
Παρατηρείται επίσης πως δεν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των μέσων τιμών αναφοράς για ολόκληρο το σώμα ICNIRP (1998) και ICNIRP (2020) για συχνότητες άνω των 30 MHz. Ωστόσο, καθώς οι κανόνες για την εφαρμογή των επιπέδων αναφοράς διαφέρουν μεταξύ των δύο κατευθυντήριων γραμμών, οι ίδιες τιμές επιπέδων αναφοράς θα οδηγήσουν σε διαφορετικά μεγέθη έκθεσης για κάθε άτομο.

Αυτό σημαίνει πως το ICNIRP (1998) δεν καθόρισε ξεχωριστές τιμές επιπέδων αναφοράς για εκθέσεις στις ζώνες μακρινού και κοντινού πεδίου, αλλά επέτρεψε τη χρήση των τιμών επιπέδου αναφοράς της ζώνης μακρινού πεδίου για πεδία εντός της ζώνης κοντινού πεδίου. Οι νέες επιστημονικές γνώσεις επέτρεψαν τη θέσπιση κανόνων στο ICNIRP (2020) για την εφαρμογή των επιπέδων αναφοράς στο κοντινό και το μακρινό πεδίο χωριστά.

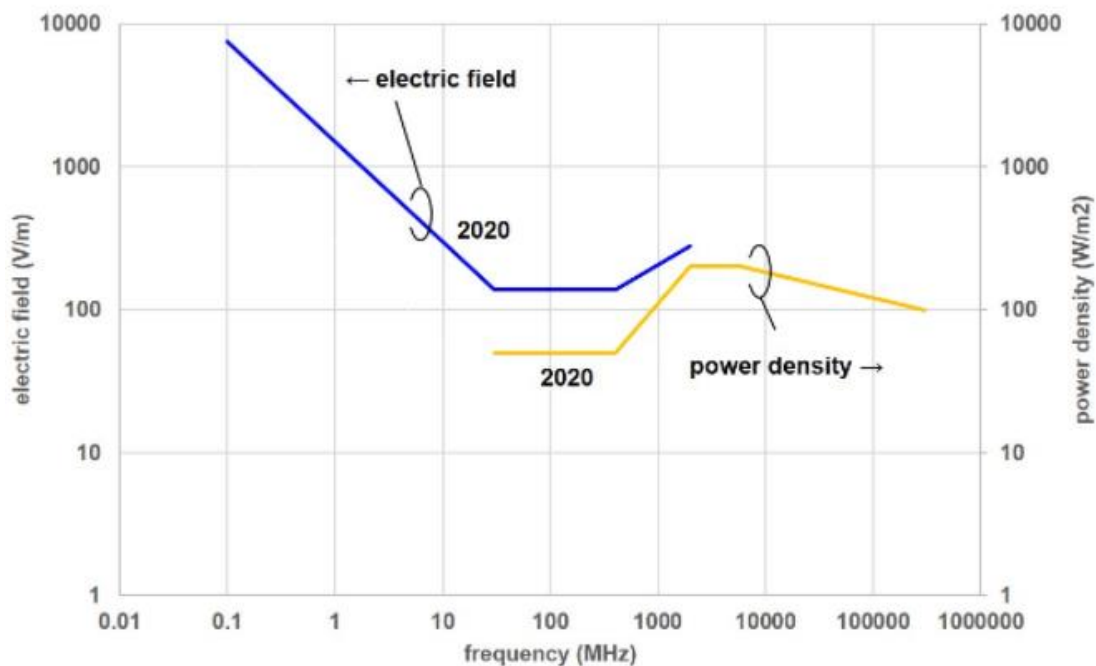
Αυτό θα διασφαλίσει ότι οι εκθέσεις εντός της ζώνης κοντινού πεδίου δεν θα οδηγήσουν σε υπερβολική έκθεση. Επιπλέον, αν και το ICNIRP (1998) επέτρεψε τη χρήση του πεδίου E και του πεδίου H για μέσες στάθμες αναφοράς ολόκληρου του σώματος σε ολόκληρο το εύρος συχνοτήτων από 100 kHz έως 300 GHz, αυτή η μέθοδος μπορεί ενδεχομένως να οδηγήσει σε ανακρίβειες για συχνότητες πάνω από περίπου 2 GHz εντός της ζώνης κοντινού πεδίου και έτσι δεν επιτρέπεται σύμφωνα με τις νέες κατευθυντήριες γραμμές. Αντ' αυτού πρέπει να χρησιμοποιούνται μέτρα πυκνότητας ισχύος.



Εικόνα 15 Επίπεδα αναφοράς για το ευρύ κοινό που ισχύουν για τοπικές εκθέσεις ≥ 6 λεπτά για τις οδηγίες ICNIRP (2020), για το εύρος συχνοτήτων 100 kHz έως 300 GHz. Τα επίπεδα αναφοράς τοπικής έκθεσης δεν δόθηκαν στις κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (1998) και ICNIRP (2010) [21].



Εικόνα 16 Μέση τιμή αναφοράς για ολόκληρο το σώμα για εργαζόμενους για τις κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (1998), ICNIRP (2010) και ICNIRP (2020), για το εύρος συχνοτήτων 100 kHz έως 300 GHz [21].



Εικόνα 17 Επίπεδα αναφοράς για εργαζόμενους σε τοπικές εκθέσεις ≥ 6 λεπτά για τις κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (2020), για το εύρος συχνοτήτων 100 kHz έως 300 GHz. Τα επίπεδα αναφοράς τοπικής έκθεσης δεν δόθηκαν στις κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP (1998) και ICNIRP (2010) [21].

5.7 Επιπτώσεις και συμπεράσματα

Οι κατευθυντήριες γραμμές του ICNIRP (2020) είναι επικαιροποιημένες για τα όρια έκθεσης του ανθρώπου για να παρέχουν προστασία σε όλα τα άτομα από τις καθιερωμένες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Το ICNIRP καταλήγει στο συμπέρασμα ότι δεν εντοπίστηκαν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία κάτω από τα όρια του ICNIRP (1998) και δεν υπάρχει μηχανισμός που να προβλέπει δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία σε εκθέσεις κάτω από τις οριακές τιμές.

Στο ICNIRP (2020) υπάρχουν λίγες αλλαγές που αφορούν δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, το διευρυμένο εύρος συχνοτήτων για βασικούς περιορισμούς και νέα όρια τοπικής έκθεσης μπορεί να έχει πρακτικές επιπτώσεις σε ορισμένες καταστάσεις έκθεσης.

Για κινητές συσκευές, το ICNIRP (2020) αλλάζει στο εύρος συχνοτήτων για τα τοπικά όρια SAR και τα επικαιροποιημένα/νέα όρια πυκνότητας ισχύος έχουν άμεσες εφαρμογές για την αξιολόγηση κινητών και φορητών συσκευών που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 6 GHz.

Για όλους τους εμπλεκόμενους φορείς υπάρχει ανάγκη ενημέρωσης ούτως ώστε να αντικατοπτρίζονται με ακρίβεια οι τελευταίες συμβουλές σχετικά με τα όρια έκθεσης και την αξιολόγηση της επιστημονικής βιβλιογραφίας.

Το ICNIRP αναφέρει πως πρόσθετα προληπτικά μέτρα δεν παρέχουν πρόσθετα οφέλη για την υγεία. Όταν οι υπεύθυνοι έχουν υιοθετήσει περιοριστικά όρια RF-EMF, αυτά θα πρέπει να ενημερώνονται στις οδηγίες του ICNIRP (2020). Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η παροχή συστάσεων για περαιτέρω μείωση της έκθεσης προκαλεί άγχος και δεν συνάδει με τις οδηγίες του ICNIRP (2020).

Στην Εικόνα 18 φαίνονται περιληπτικά τα συμπεράσματα του ICNIRP (2020) σχετικά με τις δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία.

Health effect	ICNIRP summary
Brain electrical activity and cognitive performance	<i>There is no substantiated experimental or epidemiological evidence that exposure to radiofrequency EMFs affects higher cognitive functions relevant to health.</i>
Symptoms and wellbeing	<i>No reports of adverse effects of radiofrequency EMF exposures on symptoms and wellbeing have been substantiated, except for pain, which is related to elevated temperature at high exposure levels.</i>
Other brain physiology and related functions	<i>There is no evidence of effects of radiofrequency EMFs on physiological processes that impair human health.</i>
Auditory, vestibular, and ocular function	<i>No reported effects on auditory, vestibular, or ocular function or pathology relevant to human health have been substantiated</i>
Neuroendocrine system	<i>The lowest level at which an effect of radiofrequency EMFs on the neuroendocrine system has been observed is 4 W/kg (in rodents and primates), but there is no evidence that this translates to humans or is relevant to human health. No other reported effects have been substantiated</i>
Neurodegenerative diseases	<i>In summary, no adverse effects on neurodegenerative diseases have been substantiated.</i>
Cardiovascular system, autonomic nervous system, and thermoregulation	<i>No effects on the cardiovascular system, autonomic nervous system, or thermoregulation that compromise human health have been substantiated for exposures with whole-body average SARs below approximately 4 W/kg, with harm only found in animals exposed to whole-body average SARs substantially higher than 4 W/kg.</i>
Immune system and haematology	<i>The few human studies that have been conducted have not provided any evidence that radiofrequency EMFs affect health in humans via the immune system or haematology.</i>
Fertility, reproduction, and childhood development	<i>No adverse effects of radiofrequency EMF exposure on fertility, reproduction, or development relevant to human health have been substantiated.</i>
Cancer	<i>No effects of radiofrequency EMFs on the induction or development of cancer have been substantiated.</i>

Εικόνα 18 Σύνοψη των συμπερασμάτων του ICNIRP (2020) σχετικά με τις δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία [22].

Επομένως διαπιστώνεται, πως με τη χρήση αυτών των ορίων δεν υπάρχουν επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού από την έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Παρ'όλα αυτά το ICNIRP εξετάζει όλες τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και θέτει περιορισμούς για να διασφαλίσει ότι δεν θα συμβεί, ανεξάρτητα από τον

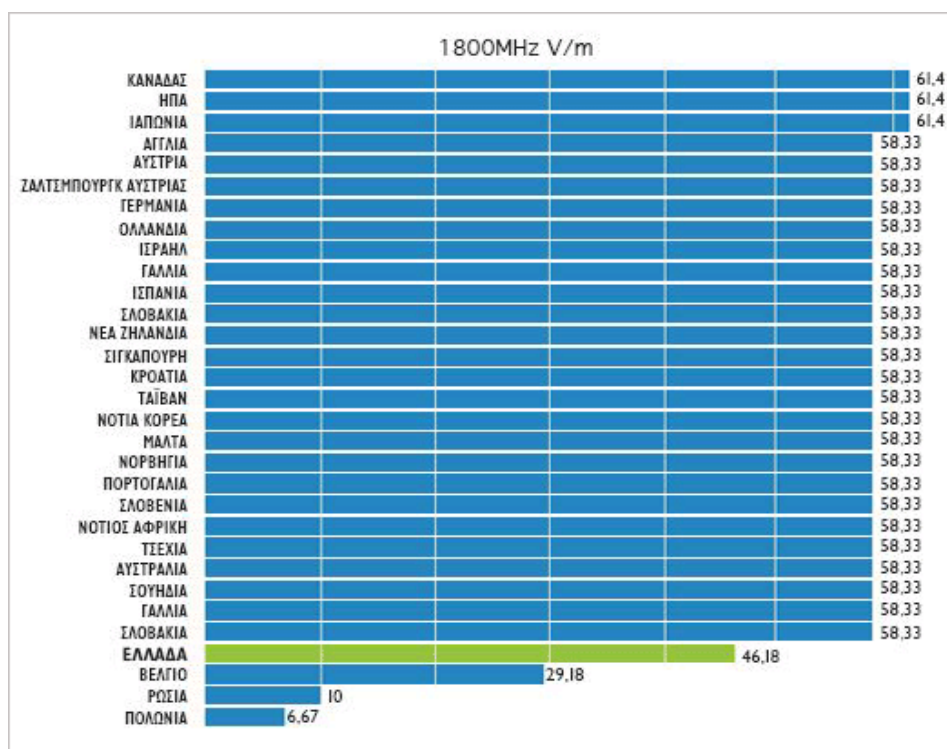
μηχανισμό αλληλεπίδρασης μεταξύ της έκθεσης και του σώματος. Τα χαμηλότερα επίπεδα έκθεσης που μπορούν να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία οφείλονται σε θερμικούς μηχανισμούς και έτσι έχουν τεθεί περιορισμοί με βάση τις θερμικές επιδράσεις, καθώς αυτές θα προστατεύσουν από τυχόν άλλες επιπτώσεις που θα μπορούσαν να προκύψουν σε υψηλότερα επίπεδα έκθεσης.

6. Όρια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην Ελλάδα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα όρια ακτινοβολίας στην ΕΕ για το SAR ολόκληρου του σώματος είναι 0,08 W/kg, ενώ για το κεφάλι και κορμό είναι 2 W/kg. Όσον αφορά τα ελληνικά όρια είναι στο 75% των ορίων ΕΕ. Επομένως 0,056 W/kg για το SAR ολόκληρου του σώματος και 1,4 W/kg για το SAR κεφαλιού και κορμού [23].

6.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και όρια ασφαλούς έκθεσης

Όπως μπορείτε να δείτε στον πίνακα, κάθε χώρα θέτει τα δικά της εθνικά πρότυπα και όρια για την έκθεση στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ωστόσο, η πλειονότητα των εθνικών προτύπων και ορίων βασίζονται στις οδηγίες που έχουν εκδοθεί από την ICNIRP. Στην Εικόνα 19, φαίνεται και η Ελλάδα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες χώρες της Ευρώπης και του κόσμου [24].



Εικόνα 19 Όρια ΗΜ ακτινοβολίας στην Ελλάδα [24]

6.2 Τα όρια ασφαλούς έκθεσης στην Ελλάδα

Τα όρια που ισχύουν σήμερα στη χώρα μας είναι κατά 30% αυστηρότερα από εκείνα που ορίζουν οι διεθνείς οδηγίες και έχει υιοθετήσει η Ευρωπαϊκή Ένωση και είναι από τα αυστηρότερα της Ευρώπης. Επιπλέον, καθορίζεται ελάχιστη απόσταση από σχολεία, βρεφονηπιακούς σταθμούς, γηροκομεία, νοσοκομεία, εντός της οποίας μειώνει κατά ακόμα 10% τα όρια. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα όρια περιορίζονται στο 60% εκείνων που έχει συστήσει η ΕΕ και η ICNIRP.

Αντίστοιχη είναι και η τοποθέτηση της ΕΕΑΕ ([Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας](#)) για το θέμα: «Επειδή ο τρόπος που ακτινοβολούν οι διάφορες κεραιοδιατάξεις είναι διαφορετικός, δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί μια απόσταση ασφαλείας που να είναι κοινή για όλα τα είδη κεραιοδιατάξεων». Με τη θέσπιση ορίων έκθεσης για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αυτή καθ' εαυτή η απόσταση ασφαλείας προκύπτει ως παράγωγο μέγεθος και είναι μεγάλη για κεραιές που ακτινοβολούν ισχυρά και μικρή για κεραιές που ακτινοβολούν ασθενώς, λαμβάνοντας υπόψη και την κατεύθυνση που ακτινοβολούν οι κεραιές. Έτσι, η απόσταση ασφαλείας που προκύπτει μπορεί να είναι μικρότερη από μέτρο για τις πολύ ασθενείς κεραιές έως και εκατοντάδες μέτρα για τις ισχυρές κεραιές εκπομπής π.χ. ραδιοφωνικών ή τηλεοπτικών σημάτων. Επιπλέον, πολλές φορές η έκθεση των ανθρώπων οφείλεται σε συνδυασμό κεραιοδιατάξεων που βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις. Στις περιπτώσεις αυτές ένα όριο απόστασης δεν θα μπορούσε να προστατέψει από την συμβολή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας πολλών διαφορετικών κεραιοδιατάξεων στην έκθεση των ανθρώπων».

6.3 Έρευνες και μετρήσεις στην Ελλάδα

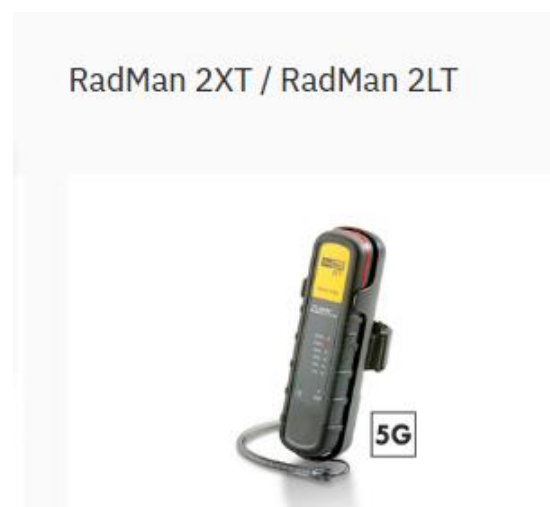
Μετρήσεις και έρευνες γίνονται συστηματικά στην Ελλάδα από την έναρξη λειτουργίας της κινητής τηλεφωνίας. Υπεύθυνος φορέας για την προστασία του γενικού πληθυσμού από τις μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). Οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας υποβάλλουν στην ΕΕΑΕ, για κάθε κεραιά που πρόκειται να εγκαταστήσουν, μελέτη ραδιοεκπομπών η οποία πρέπει να αποδεικνύει ότι με την εγκατάσταση της συγκεκριμένης κεραιάς τηρούνται τα όρια εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως αυτά καθορίζονται από την εθνική νομοθεσία. Σύμφωνα με το Νόμο, η ΕΕΑΕ έχει αναλάβει να ελέγχει την τήρηση των ορίων ασφαλούς έκθεσης του κοινού στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, διενεργώντας ελέγχους αυτεπαγγέλτως και χωρίς προειδοποίηση [25].

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) είναι ο αρμόδιος φορέας για τον έλεγχο της τήρησης των ορίων έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι έλεγχοι για τη μέτρηση της ακτινοβολίας από σταθμούς βάσης πραγματοποιούνται από την ΕΕΑΕ ή από εξουσιοδοτημένους από αυτήν φορείς. Ο έλεγχος της τήρησης των ορίων αποδεκτής έκθεσης γίνεται αυτεπαγγέλτως και κατά τρόπο δειγματοληπτικό, ετησίως σε ποσοστό 20% τουλάχιστον των αδειοδοτημένων από την Ε.Ε.Τ.Τ. κεραιών, που λειτουργούν εντός σχεδίου πόλεως.

7. NARDA SRM

Όσον αφορά τις μετρήσεις στην τεχνολογία 5G, σίγουρα αποτελούν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Μέσα από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιεί το Narda SRM Technology, αντλούνται πληροφορίες και για τις μετρήσεις, αλλά και για την ασφάλεια των εργαζομένων.

Για αρχή, θα πρέπει να διασφαλιστεί πως οι άνθρωποι που εγκαθιστούν και συντηρούν κεραιές είναι ασφαλείς όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Καθώς οι ίδιοι οι εργαζόμενοι δεν έχουν την αίσθηση της ακτινοβολίας και των ορίων της, υπάρχουν εξειδικευμένα “personal monitors” όπως τα Rad Man 2 και Nardalert S3 που φαίνονται στις παρακάτω εικόνες [26].



Εικόνα 20 RadMan

Nardalert S3



Εικόνα 21 Nardalert

Η δουλειά που κάνει πρακτικά το “personal monitor” είναι να καλύπτει ένα εύρος συχνοτήτων που ξεκινάει από ραδιο-συχνότητες που είναι κάτω από 100 MHz και ανεβαίνει τουλάχιστον σε συχνότητες 5G. Η ανάπτυξη δικτύων 5G από 24 έως 30 GHz

με σχετική ισχύ εξόδου δεν είναι μακριά, οπότε το “personal monitor” θα πρέπει να καλύπτει μέχρι 30 GHz ή και πάνω από τη συχνότητά του. Η διαμόρφωση και ο συντελεστής κορυφής ενός σήματος 5G δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα για τα “personal monitors”.

Οι ζώνες ασφαλείας ορίζονται και καθορίζονται με υπολογισμό ή προσομοίωση εάν ένα σύστημα μπορεί να σχηματίζει δέσμη (beamforming). Η απλή μέτρηση με χρήση ευρυζωνικής ή επιλεκτικής συσκευής μέτρησης δεν θα έχει καμία χρησιμότητα εάν το σύστημα δεν έχει ρυθμιστεί πρώτα σε μια καθορισμένη κατάσταση. Η πρώτη δοκιμή θα μπορούσε να είναι η απενεργοποίηση της διαμόρφωσης δέσμης, ωστόσο δεν πρέπει να ξεχνάει κάποιος ότι το εύρος σάρωσης της διαμόρφωσης δέσμης είναι συχνά μεγαλύτερο από την περιοχή που καλύπτεται χωρίς αυτήν. Επομένως, είναι καλύτερο να λειτουργεί το σύστημα με διαμόρφωση δέσμης σε μια καθορισμένη κατάσταση, με μέγιστη ισχύ εξόδου και μέγιστο κέρδος κεραίας, δηλαδή μέγιστη κατευθυντικότητα προς όλες τις κατευθύνσεις.

Όταν είναι εξοπλισμένο με τους κατάλληλους ανιχνευτές, το NBM ως ευρυζωνικός μετρητής έντασης πεδίου είναι ικανό να μετράει σήματα έως και 90 GHz, κάτι που είναι υπεραρκετό. Η Narda έχει μια νέα κεραία στα σκαριά που θα επιτρέψει στις υπάρχουσες συσκευές SRM-3006 να μετρούν τις συχνότητες μεταξύ 24 και 30 GHz που θα χρησιμοποιηθούν για το δεύτερο στάδιο της κυκλοφορίας 5G.

Όσον αφορά τώρα την προστασία του περιβάλλοντος, γίνεται πρακτικά αναφορά στις μετρήσεις που αφορούν το ευρύ κοινό και ειδικά μετράται κάθε περιοχή στο πεδίο όπου υπάρχει ανάγκη. Μια καλή επιλογή εδώ είναι να χρησιμοποιηθεί το NBM με αυτόν τον ανιχνευτή που καλύπτει το εύρος από 0 Hz έως 90 GHz. Το SRM-3006 μπορεί να κάνει επιλεκτικές μετρήσεις συχνότητας από 9 kHz έως 6 GHz.


Και οι δύο αυτές συσκευές μέτρησης καταγράφουν τη στιγμιαία ένταση πεδίου και όχι τη μέγιστη δυνατή τιμή. Εάν χρειάζεται να προσδιοριστεί η μέγιστη δυνατή ένταση πεδίου, η χρήση της προέκτασης συχνοτήτων για συστήματα κινητής επικοινωνίας έχει αποδειχθεί χρήσιμη και είναι ακόμη και υποχρεωτική σε πολλές χώρες. Για να γίνει αυτό, το SRM πραγματοποιεί επιλεκτικές μετρήσεις συχνότητας και στη συνέχεια προεκθέτει αυτά τα αποτελέσματα για να δώσει το μέγιστο δυνατό επίπεδο ακτινοβολίας για κάθε μία από τις υπηρεσίες κινητής επικοινωνίας.

Όπως γνωρίζετε, τα συστήματα 5G κάτω των 6 GHz μπορούν να έχουν εύρος ζώνης έως και 100 MHz. Το SRM-3006 έχει μέγιστο εύρος ζώνης 20 ή 32 MHz, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας. Για να γίνει μια σωστή μέτρηση μιας υπηρεσίας 5G, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λειτουργία “Safety Evaluation Mode of the SRM”. Αυτό αντιστοιχεί στη λειτουργία μέτρησης ισχύος καναλιού που μπορεί να είναι γνωστό και από άλλους αναλυτές φάσματος. Ωστόσο, το SRM μπορεί να κάνει αυτή τη μέτρηση ιστορικά και μπορεί επίσης να μετρήσει και να εμφανίσει δεκάδες τέτοιες «υπηρεσίες» ταυτόχρονα. Κατά τη διάρκεια της πραγματικής μέτρησης, το SRM σε αυτήν τη διαμόρφωση

πραγματοποιεί αυτόματα μια μέτρηση με εύρος ζώνης 20 MHz κάθε 10 MHz στην καθορισμένη ζώνη και προσθέτει τα αποτελέσματα μαζί.

Αυτό φαίνεται στην εικόνα παρακάτω, για παράδειγμα, ως εμφάνιση του τρέχοντος, του μέγιστου ή του ελάχιστου επιπέδου ισχύος μέσα σε αυτό το παράθυρο χρόνου και συχνότητας. Αυτό το είδος υπηρεσίας μπορεί να συνδυαστεί με οποιεσδήποτε άλλες υπηρεσίες, έτσι ώστε να υπάρχει μια επισκόπηση όλων των υπηρεσιών μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα, το αποτέλεσμα να εμφανιστεί απευθείας ως ποσοστό της τυπικής οριακής τιμής, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 22.

5G in a Nutshell



Environmental measurements: current exposure

The service can also be incorporated into any service table and to measure e.g. all wireless networks, and to present the final result as a % of the standard limit value

Table View: Condensed			
Index	Service	Max	Avg
8	BandV	0.256 %	0.233 %
9	GSM-R	0.015 %	0.009 37 %
10	GSM	0.224 %	0.202 %
11	L-Band	0.024 %	0.021 %
12	DECT	0.006 48 %	0.005 48 %
13	UMTS-TDD	0.038 %	0.035 %
14	UMTS	0.022 %	0.019 %
15	W-LAN	0.042 %	0.038 %
16	ISM	0.009 12 %	0.007 51 %
17	5G	0.102 %	0.093 %
	Others	1.739 %	1.687 %
	Total	5.012 %	4.856 %

If you want, the results can be displayed directly as a percentage of the standard limit value, as shown here.

Battery: 18.05.19
Ext. Power: 12:21:43
GPS: 48°27'29.9" N Ant: 9°13'48.9" E Cable:
3AX 0.4-6G SrvTbl: --- Std: EU Full Band ICNIRP GP

Prep Time: 3.255 s Progress:
Off No. of Runs: 1 257
AVG: 6 min

© Narda Safety Test Solutions GmbH
www.narda-sts.com
Slide 21

Εικόνα 22 Άμεση απεικόνιση των αποτελεσμάτων ως ποσοστά [26].

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η εισαγωγή του TDD σημαίνει ότι το κινητό και οι σταθμοί βάσης εκπέμπουν στην ίδια ζώνη κι όχι σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων όπως στην περίπτωση του FDD. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή που εμφανίζεται με το TDD είναι το άθροισμα των εκπομπών από τους σταθμούς βάσης του παρόχου και όλα τα κινητά που βρίσκονται κοντά. Εάν κάποιος επιθυμεί να γίνει διαχωρισμός μεταξύ αυτών των τιμών, μπορεί να αναλύσει και να αξιολογήσει το σήμα στον τομέα χρόνου χρησιμοποιώντας πχ το SRM-3006 και την επιλογή 'Scope'. Είναι ακόμη πιο εύκολο να γίνει χρήση της επιλογής αποδιαμόρφωσης για το LTE TDD, το οποίο μπορεί να διακρίνει μεταξύ του σταθμού βάσης και του ακουστικού.

Μια άλλη προσέγγιση είναι η συνεχής μέτρηση της έκθεσης μέσω της λεγόμενης 'παρακολούθησης περιοχής'. Τέτοιες ευρυζωνικές ή επιλεκτικές συσκευές μέτρησης καταγράφουν το επίπεδο έκθεσης 24 ώρες την ημέρα, επτά ημέρες την εβδομάδα και δημοσιεύουν το αποτέλεσμα στο Διαδίκτυο. Διαθέτουν επίσης σύστημα συναγερμού σε περίπτωση υπέρβασης των οριακών τιμών. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται πολύ έντονα στην Αυστραλία όσον αφορά το 5G. Μέχρι στιγμής, η Narda φαίνεται να έχει

καλύψει κάθε είδους απαίτηση. Το μόνο πράγμα που εξακολουθεί να λείπει για την εξήγηση της «πραγματικής μέγιστης έκθεσης» είναι η λειτουργία 5G για SRM, πράγμα που θα αναλυθεί παρακάτω.

7.1 Μέτρηση της πραγματικής έκθεσης

Τελικά όμως, θα πρέπει να εξεταστεί η μέτρηση της πραγματικής μέγιστης έκθεσης. Έχουμε ήδη εξετάσει τον τρόπο μέτρησης του πραγματικού επιπέδου έκθεσης στα ΗΜΠ. Είτε πραγματοποιηθεί μια ευρυζωνική μέτρηση που καταγράφει όλες τις υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένου του 5G, είτε μια επιλεκτική μέτρηση συχνότητας που λαμβάνει το επίπεδο έκθεσης για κάθε υπηρεσία ξεχωριστά. Αυτά για το πραγματικό ή στιγμιαίο επίπεδο έκθεσης. Τι γίνεται όμως στην περίπτωση που το ερώτημα είναι: "πώς είναι σίγουρο ότι το εγκατεστημένο σύστημα δεν υπερβαίνει την οριακή τιμή ανά πάσα στιγμή;". Η απάντηση σε μία τέτοια ερώτηση όμως δεν είναι τόσο απλή. Η τιμή που απαιτείται τώρα είναι μια μέγιστη δυνατή τιμή και όχι η στιγμιαία τιμή. Επομένως, πρέπει πρώτα να ελεγχθεί κατά πόσο ακριβώς μπορεί να μεταβάλλεται η στάθμη του σήματος ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

Όπως είναι γνωστό, αυτό το επίπεδο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το φορτίο, την απόσταση από τον συνδρομητή και ούτω καθεξής. Εάν λοιπόν, δεν είναι γνωστό τίποτα για το δίκτυο, πόσο ακριβής μπορεί να είναι η μέτρηση ή πόσο πρέπει να προστεθεί στη μετρούμενη τιμή για να είναι σίγουρο ότι το σύστημα δεν θα υπερβεί ποτέ αυτό το ποσό;

Αν γίνει μια προσπάθεια απάντησης του παραπάνω ερωτήματος, θα πρέπει αρχικά να γίνει ένας έλεγχος των δυναμικών περιοχών των συστημάτων κινητής επικοινωνίας. Ως δυναμική περιοχή, ορίζεται πρακτικά η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης στάθμης εξόδου του συστήματος, δηλαδή όταν το σύστημα είναι αδρανές ή εκπέμπει μόνο το σήμα και το μέγιστο επίπεδο εξόδου, όταν όλα τα κανάλια κυκλοφορίας είναι κατειλημμένα και οι συνδρομητές είναι στη μέγιστη δυνατή απόσταση από το σύστημα έτσι ώστε ο σταθμός βάσης να εκπέμπει στη μέγιστη ισχύ.

Το μέγιστο δυναμικό εύρος της ισχύος εξόδου μέσω του συστήματος 2G δεν είναι μεγαλύτερο από 6 έως 8 dB. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί μια μέτρηση πρακτικά οποιαδήποτε στιγμή, και απλά να προστεθούν 6 έως 8 dB στο αποτέλεσμα για να προβληθεί το αποτέλεσμα. Όσο αυτές οι προεκτεινόμενες τιμές παραμένουν κάτω από την οριακή τιμή, δεν υπάρχει τίποτα κακό με τη χρήση αυτής της απλής προσέγγισης. Συχνά υπάρχει αρκετό περιθώριο μεταξύ των μετρούμενων τιμών και της οριακής τιμής, ούτως ώστε να επιτρέπεται η χρήση αυτής της μεθόδου. Το δυναμικό εύρος για 3G είναι ήδη 7 έως 10 dB. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα είναι πιο αποδοτικό και μειώνει την ισχύ εξόδου του εάν δεν υπάρχει κίνηση. Ένα σύστημα LTE 20 MHz μπορεί να έχει δυναμική περιοχή μεγαλύτερη από 10 dB.

Όσον αφορά το 5G, θα πρέπει να σημειωθεί πως η απόδοση του συστήματος είναι ακόμα υψηλότερη. Έτσι για να γίνει σωστή ανάλυση των κινδύνων που ελλοχεύουν, πρέπει είτε να γίνεται μια 'μόνιμη' μέτρηση χρησιμοποιώντας, για παράδειγμα, μια οθόνη παρακολούθησης περιοχής, είτε να γίνει εξαγωγή του αποτελέσματος της μέτρησης. Αυτός είναι ο μόνος τρόπος για να διασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξει υπέρβαση της οριακής τιμής ανά πάσα στιγμή. Πώς όμως μπορεί να γίνει αυτή η εξαγωγή του αποτελέσματος της μέτρησης;

Υπάρχουν ήδη διεθνείς συστάσεις μέτρησης ειδικά για δίκτυα 3G/UMTS και 4G/LTE που έχουν εκδοθεί από την ITU και την IEC. Αναπτύσσεται μια σύσταση μέτρησης για το 5G/NR (new radio).

7.2 5G Beamforming στο SRM-3006

Το SRM-3006 μπορεί ήδη να εκτελεί τυπική συμβατή εξαγωγή αποτελεσμάτων για για 3G και 4G. Οι επιλογές UMTS και LTE TDD/FDD μπορούν να αποδιαμορφώσουν σήματα και να πραγματοποιήσουν μια επεξήγηση που συμμορφώνεται με το πρότυπο για τις πληροφορίες που λαμβάνονται [26]. Στο SRM-3006 όμως δεν υπάρχει αποδιαμόρφωση 5G.

Αν κάποιος σκεφτόταν μόνο το 5G, τότε το θέμα θα έχει ήδη διευθετηθεί. Η Narda έχει ήδη κάνει προκαταρκτική έρευνα για να δει εάν το SRM-3006 θα μπορούσε να αποδιαμορφώσει το 5G. Όλα τα σημάδια εδώ είναι θετικά. Αλλά δυστυχώς, δεν γίνεται λόγος μόνο για το 5G εδώ, υπάρχει επίσης το beamforming που πρέπει να εξεταστεί. Το beamforming συμβαδίζει με το 5G, επομένως θα ήταν ανόητο να παρακαμφθεί.

Η μέθοδος της παρέκτασης (extrapolation) βασίζεται στη μέτρηση τμημάτων του σήματος σηματοδότησης και στη συνέχεια υπολογίζει από αυτό ποιο θα ήταν το επίπεδο στο μέγιστο φορτίο κίνησης. Μέχρι στιγμής, αυτό έχει λειτουργήσει καλά όταν πρόκειται για την αξιολόγηση σταθμών βάσης. Δεν λειτουργεί όμως όταν μπαίνει στο παιχνίδι η διαμόρφωση δέσμης (beamforming).

Beamforming σημαίνει ότι είναι δυνατό το κέρδος της κεραίας για τη σηματοδοσία να είναι διαφορετικό από αυτό της κίνησης. Έτσι, για να γίνει παρέκταση από τη σηματοδότηση στην κίνηση, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η διαφορά στο κέρδος της κεραίας μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας. Η διαφορά στο κέρδος της κεραίας δεν είναι σταθερός συντελεστής X dB. Αυτή η διαφορά μπορεί να δείξει πολύ μεγάλες χωρικές διακυμάνσεις (spatial variations).

Ως αποτέλεσμα, μπορεί να εμφανιστεί μια διαφορά πολλών δεκάδων ντεσιμπέλ, ιδιαίτερα στις άκρες των κυψελών. Επιπλέον, αυτή η διαφορά στο κέρδος της κεραίας είναι τέτοια που οδηγεί σε υποεκτίμηση. Αυτό φυσικά είναι εντελώς απαράδεκτο από την άποψη της ασφάλειας. Αυτά τα ζητήματα ισχύουν επίσης για το 4G όπου χρησιμοποιείται το beamforming, όχι μόνο για το 5G. Για τους λόγους αυτούς, λοιπόν, το beamforming αποτελεί μια πραγματική πρόκληση για τις μετρήσεις.

Όπως αναφέρθηκε, η Narda έχει ήδη προτείνει δύο μεθόδους μέτρησης για το 5G, η πιο πρόσφατη που δημοσιεύτηκε στο Health Physics [On the assessment of human exposure to electromagnetic fields transmitted by 5G NR base stations]. Αλλά και οι δύο αυτές μέθοδοι μέτρησης 5G υποθέτουν έναν σταθερό ή γνωστό παράγοντα για τη διαφορά στο κέρδος κεραίας μεταξύ σήματος και κίνησης. Τα σημερινά δεδομένα λένε ότι αυτό δεν είναι πλέον ρεαλιστικό.

Αυτήν τη στιγμή, η Narda βρίσκεται σε συζητήσεις για την ανάπτυξη μιας νέας διαδικασίας μέτρησης για τη διαμόρφωση δέσμης 5G με διάφορους εθνικούς και διεθνείς φορείς όπως η IEC. Εμπλέκονται σχεδόν όλοι οι κατασκευαστές και οι πάροχοι υπηρεσιών. Η πρόταση που έγινε από έναν κατασκευαστή διερευνάται επί του παρόντος. Όπως μπορείτε να δείτε, όλοι οι εμπλεκόμενοι είναι πρόθυμοι να βρουν μια λύση. Ακόμη και η πιο λογική οριακή τιμή είναι άχρηστη εάν δεν μπορεί να ελεγχθεί. Μέχρι όμως και τον Αύγουστο του 2019, δεν είχε βρεθεί η απάντηση.

Συνοψίζοντας, το 5G και το beamforming είναι συναρπαστικές τεχνολογίες. Όσον αφορά την ασφάλεια στον τομέα που παράγουν, η Narda μπορεί ήδη να προσφέρει μια μεγάλη γκάμα συσκευών με δυνατότητα 5G, ξεκινώντας με τα monitors όπως το RedMan 2 και το Nardalert S3. Ασφαλή είναι επίσης τα προϊόντα NBM για τη μέτρηση του πραγματικού επιπέδου ακτινοβολίας, προκειμένου να προστατευτεί το ευρύ κοινό, καθώς και τα Area Monitors για μακροχρόνια παρακολούθηση.

7.3 Μετρητικός εξοπλισμός NARDA

Η Narda είναι κορυφαίος πάροχος εξοπλισμού μέτρησης για τους τομείς EMF / EME Safety, RF Test & Measurement και EMC. Το φάσμα των προϊόντων ασφαλείας περιλαμβάνει όργανα μέτρησης ευρείας ζώνης και επιλεκτικής συχνότητας, οθόνες πλήρους κάλυψης ευρείας περιοχής και οθόνες προσωπικής ασφαλείας που φοριούνται στο πρόσωπο.

Το PMM brand της EMC αποτελείται από συσκευές για τη μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας του εξοπλισμού. Η σειρά RF Test & Measurement περιλαμβάνει αναλυτές και συσκευές για τη μέτρηση και τον εντοπισμό πηγών RF. Η συντήρηση και η βαθμονόμηση, μαζί με προγράμματα κατάρτισης, συμπληρώνουν το φάσμα των παρεχόμενων υπηρεσιών [27].



Wideband EMF

Εξοπλισμός μέτρησης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων (ΗΜΠ) (electromagnetic fields (EMF)). Οι συσκευές μετρούν τη συνολική ένταση του ηλεκτρικού ή/και μαγνητικού πεδίου και τη συγκρίνουν αυτόματα με τις οριακές τιμές που καθορίζονται από εθνικούς και διεθνείς φορείς σε πρότυπα ή οδηγίες.

Εικόνα 23 Wideband EMF



Selective EMF

Ο επιλεκτικός (selective) εξοπλισμός μέτρησης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων (ΗΜΠ). Οι συσκευές αναλύουν με ακρίβεια τις επιμέρους περιοχές συχνοτήτων και τα επίπεδα έκθεσης. Υπολογίζουν επίσης το άθροισμα και συγκρίνουν τα επίπεδα με τις τρέχουσες οριακές τιμές.

Εικόνα 24 Selective EMF



Personal Safety EMF

Προσωπικά μόνιτορ, που φοριούνται στο άνθρωπο. Οι συσκευές παρακολουθούν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και προειδοποιούν για υπερβολικές εντάσεις πεδίου, π.χ. κατά την εργασία σε βιομηχανικό εξοπλισμό, σταθμούς ραδιοτηλεοπτικών εκπομπών ή κινητής τηλεφωνίας, εγκαταστάσεις ραντάρ ή άλλες πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Εικόνα 25 Personal Safety EMF



Εικόνα 26 Area Monitoring

Area monitoring

Προέρχονται από γραμμές μεταφοράς ρεύματος, καλώδια ηλεκτρικής ενέργειας, κυψελοειδή ραδιόφωνα, ασύρματα τηλέφωνα κλπ. Για την προστασία του κοινού, οι οριακές τιμές ελέγχονται τακτικά και μερικές φορές παρακολουθούνται συνεχώς. Η Narda προσφέρει διάφορους σταθμούς και συστήματα μέτρησης για το σκοπό αυτό.



Εικόνα 27 Monitoring Receiver

Monitoring Receiver

Φορητοί αναλυτές (Portable analyzers) για την ανίχνευση, τον εντοπισμό και την ταξινόμηση σημάτων και παρεμβολών RF, ιδανικοί για τον εντοπισμό τυχαίων, παράνομων ή σκόπιμων παρεμβολών ή δυνητικά επικίνδυνων πηγών σήματος. Τηλεχειριζόμενοι αναλυτές για παρακολούθηση φάσματος και διαχείριση συχνοτήτων.



Εικόνα 28 EMC Products

EMC Products

Προϊόντα για την απόδειξη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των συσκευών, δηλαδή για τη διερεύνηση ακούσιων εκπομπών υψηλής συχνότητας που μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές σε άλλο εξοπλισμό, καθώς και για την ανοχή στην ακτινοβολία που θα μπορούσε να προκαλέσει παρεμβολές σε μια συσκευή.

8. Μετρήσεις 5G (Ποιότητας Σήματος)

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση των δύο σεναρίων για τα οποία έγιναν μετρήσεις χρησιμοποιώντας την 5G NSA TDD τεχνολογία @ 3.6GHz. Το πρώτο σενάριο είναι το “good scenario”, στο οποίο οι μετρήσεις έγιναν ακριβώς κάτω από την κεραία και το δεύτερο σενάριο είναι το “weak scenario”, στο οποίο οι μετρήσεις έγιναν σε μεγαλύτερη απόσταση από την κεραία. Σκοπός των μετρήσεων είναι να δείξουν τη διακύμανση συγκεκριμένων δεικτών (RSRP, RSRQ, RSSI, DL throughput, UL throughput, latency) όσο το κινητό τερματικό απομακρύνεται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της κεραίας.

- Software

Οι εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν διατίθενται δωρεάν και είναι προσβάσιμες στο Google Play Store. Για τους δείκτες RSRP, RSRQ, RSSI χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή “NetMonster” ([NetMonster - Εφαρμογές στο Google Play](#)) για το latency (rings) η εφαρμογή “PingTools Network Utilities” ([PingTools Network Utilities - Εφαρμογές στο Google Play](#)) και τέλος για το UL & DL Throughput (speedtests) η εφαρμογή “OOKLA” ([Speedtest by Ookla - The Global Broadband Speed Test](#)).

- Hardware

Terminal: Xiaomi M10T Pro (Android 12)

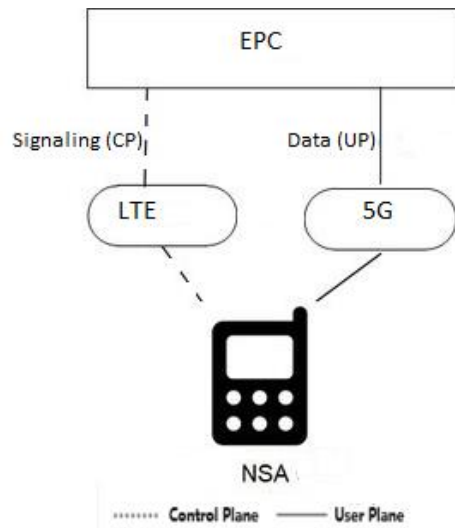
Access Radio: Huawei

EPC: Ericsson

- Πεδίο μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην εταιρεία Victus Networks στην Παλλήνη, όπου ο test σταθμός βάσης είναι τοποθετημένος στο ειδικά διαμορφωμένο εργαστήριο.

Όσον αφορά το Non Stand Alone 5G (NSA), χρησιμοποιεί 2 κανάλια επικοινωνίας, ένα για τα δεδομένα (User plane) μέσω 5G και ένα για τη σηματοδότηση (Control Plane) μέσω LTE όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 29 5G NSA

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, υπήρχε ενεργό ping στο background, για να μεταδίδονται πακέτα, ούτως ώστε να είναι συνεχώς ενεργό και το 5G κανάλι. Διαφορετικά το κινητό μπαίνει σε «idle mode» και αποδεσμεύει το 5G κανάλι για εξοικονόμηση πόρων του δικτύου και της μπαταρίας του ίδιου. Η χρήση του 5G φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 31 όπου παρατηρείται ενεργό το 5G NSA (κόκκινο πλαίσιο), καθώς επίσης φαίνονται (πράσινο πλαίσιο) οι LTE συχνότητες που χρησιμοποιούνται για σηματοδότηση και επιπρόσθετη χωρητικότητα εάν αυτό χρειαστεί. Στο τέλος της ίδιας εικόνας αναγράφεται η κεντρική συχνότητα εκπομπής για το 5G (ARFCN 643322). Από την τιμή αυτή, γίνεται αντιληπτό ότι πρόκειται για 5G στη μπάντα 3,6GHz (NR Band -> n78) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 30.

5G Frequency Calculator

Enter the NR-ARFCN* ➔

Frequency, MHz

NR operating band	Uplink	Downlink	Duplex mode
n78		3300 MHz - 3800 MHz	TDD

Εικόνα 30 Frequency Calculator [28]

8.1 “Good” Scenario

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ακριβώς κάτω από την κεραία. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, το κινητό έχει «κλειδώσει» στην μπάντα των 2600 MHz (EARFCN 2850) όπου και ανταλλάσσει όλη την απαραίτητη σηματοδότηση (Control Plane). Οι υπόλοιποι LTE carriers που εμφανίζονται (2100, 1800, 800) είναι για επιπλέον data

capacity σε περίπτωση αυξημένων αναγκών σε user throughput πχ ενός 4K video. Δεν εξυπηρετούν τη σηματοδοσία.

Vodafone 4G · LTE 2600 + 2100 + 1800 + 800			
5G · NSA			
CI	3840262	EARFCN	2850
eNb	15001	RSSI	-51 dBm
CID	6	RSRP	-65 dBm
TAC	4016	RSRQ	-6 dB
PCI	501	SNR	28 dB
BW	20 MHz	TA	0 (0 m)
PCI	501	EARFCN	50
		RSSI	-51 dBm
		RSRP	-73 dBm
		RSRQ	-18 dB
PCI	446	EARFCN	1451
		RSSI	-55 dBm
		RSRP	-77 dBm
		RSRQ	-11 dB
PCI	501	EARFCN	6300
		RSSI	-63 dBm
		RSRP	-81 dBm
		RSRQ	-9 dB
5G NSA		SS RSRP	-74 dBm
ARFCN	643322	SS RSRQ	-11 dB

Εικόνα 31 Παράμετροι για το "good" scenario

Η παράμετρος EARFCN προσδιορίζει στο LTE τη συχνότητα του φέροντος στο downlink και κυμαίνεται στο εύρος 0-65535. Όσον αφορά την παράμετρο RSRP, η οποία φανερώνει την ένδειξη ισχύος του ληφθέντος σήματος, είναι στα -65 dBm.

Για τις τιμές των δεικτών RSRP, RSRQ, SNR, θα χρησιμοποιηθεί η παρακάτω εικόνα σαν reference, έτσι ώστε να μπορεί να γίνεται αντιληπτό αν όντως πρόκειται για ένα καλό σενάριο (δηλαδή ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο) ή όχι.

RF Connectivity	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Excellent	≥ -80	≥ -10	≥ 20
Good	-80 to -90	-10 to -15	13 to 20
Medium	-90 to -100	-15 to -20	0 to 13
Weak	≤ -100	≤ -20	≤ 0

Εικόνα 32 Reference εικόνα για το πού αντιστοιχούν οι μετρήσεις [29]

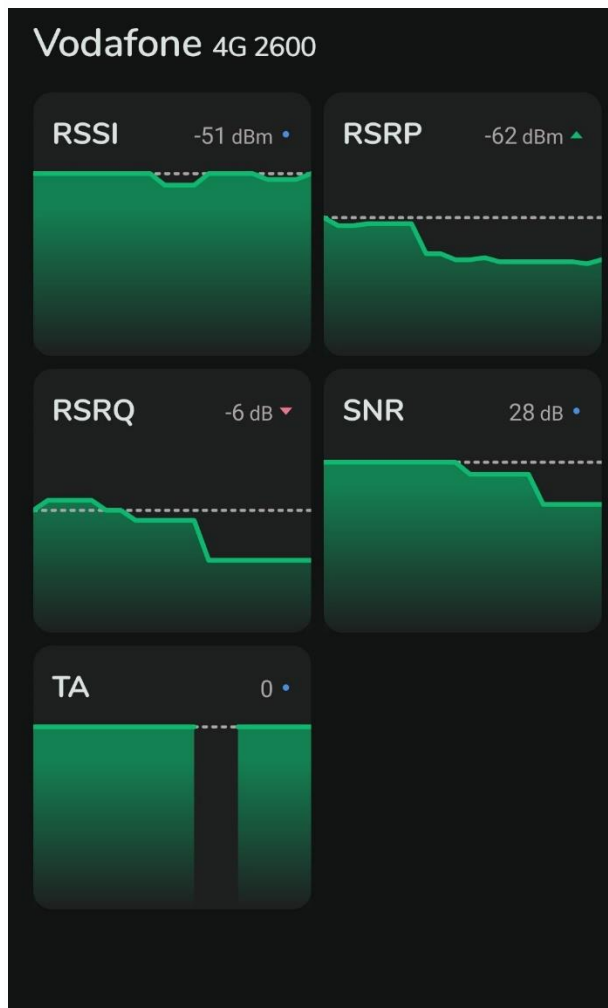
Στην περίπτωση του “good scenario” η τιμή του **RSRP**, της λαμβανόμενης ισχύος δηλαδή, έχει μετρηθεί στα -65 dBm που είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το κατώφλι των -80 dBm. Το **RSRQ** (η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος) έχει μετρηθεί στα -6 dB και το **SNR** (ο λόγος της έντασης του εκπεμπόμενου σήματος προς το θόρυβο στο κανάλι) στα 28 dB, που αντιστοιχούν και τα δύο στο Excellent RF Connectivity, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα.

Η παράμετρος TA (Timing Advance) αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που χρειάζεται ένα σήμα για να φτάσει στο σταθμό βάσης από ένα κινητό τηλέφωνο. Όπως λοιπόν φαίνεται στην **Εικόνα 31**, το TA στο “good scenario” είναι ίσο με 0 κάτι το οποίο μεταφράζεται σε απόσταση 0 μέτρων από την κεραία.

Πληροφοριακά, θα γίνει αναφορά και στις υπόλοιπες παραμέτρους που εμφανίζονται στην παραπάνω εικόνα. Το CI, είναι το Cell Identity στο οποίο έχει κλειδώσει η μέτρηση. Το eNb (eNodeB -> Evolved Node B) είναι ο μοναδικός αριθμός του σταθμού βάσης στο LTE. Το CID (Cell ID) αναφέρεται στον αριθμό κελιού και μερικές φορές σε έναν τομέα (sector). Με άλλα λόγια, το CID λέει πού βρίσκεται η κεραία και ποια κατεύθυνση βλέπει. Το TAC (Tracking Area Code) προσδιορίζει τα κελιά βάσης της γεωγραφικής τους περιοχής. Το PCI (Physical Cell ID) είναι το αναγνωριστικό μιας κυψέλης στο physical layer του δικτύου LTE, το οποίο χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό διαφορετικών πομπών. Τέλος, το BW αναφέρεται στο εύρος ζώνης (Bandwidth) κάθε κελιού.

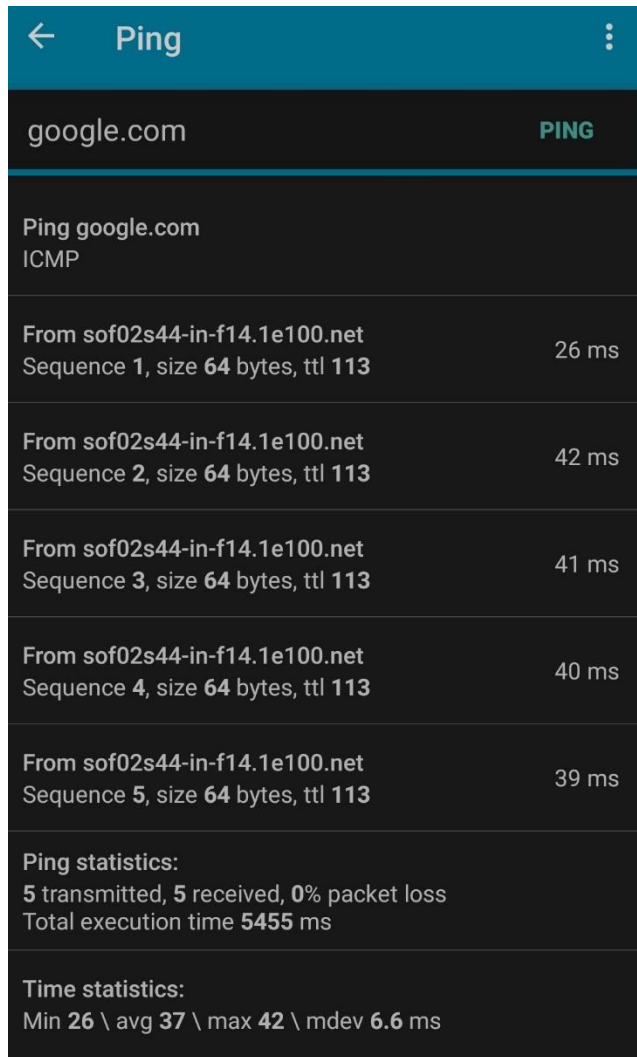
Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων RSSI, RSRP, RSRQ, SNR, TA μέσα από διαγράμματα. Καθώς τα screenshots γίνονταν με το ίδιο κινητό και οι μετρήσεις ήταν σε πραγματικό χρόνο, σε κάποιες τιμές παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις, καθώς η στάθμη του σήματος μεταβάλλεται ελαφρώς ακόμα και σε στατικές μετρήσεις. Για παράδειγμα στην **Εικόνα 31** η τιμή της παραμέτρου RSRP είναι -65 dBm, ενώ παρακάτω στην **Εικόνα 33** που απεικονίζονται τα διαγράμματα, η τιμή της

είναι -62 dBm. Για τις συγκρίσεις των σεναρίων όμως έχουν διατηρηθεί οι τιμές από την **Εικόνα 31** που ήταν και το πρώτο στιγμιότυπο.



Εικόνα 33 RSSI, RSRP, RSRQ, SNR, TA for “good” scenario

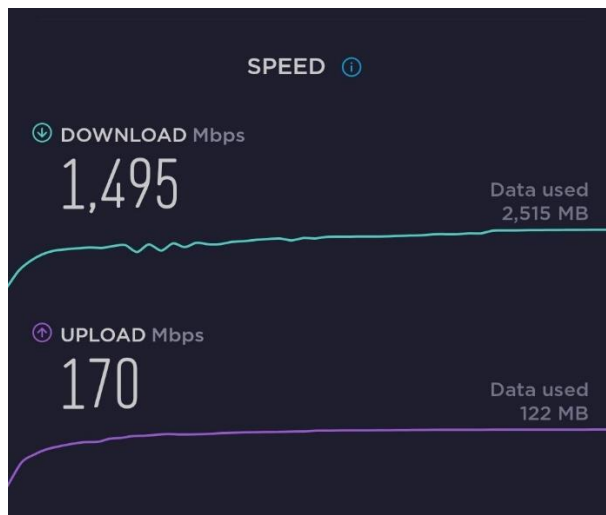
Στη συνέχεια, έγινε χρήση της εφαρμογής “PingTools Network Utilities” για να μελετηθεί ο χρόνος με τον οποίο μεταδίδονταν τα πακέτα (latency). Όπως έχει αναφερθεί ήδη, το ping προς την ιστοσελίδα της Google ήταν ανοιχτό στο background και μετέδιδε, ούτως ώστε να είναι ανοιχτό το κανάλι των data του 5G. Παρακάτω λοιπόν, στην **Εικόνα 34** φαίνονται οι χρόνοι των Pings.



Εικόνα 34 Pings for "good" scenario

Όπως φαίνεται, έγινε μετάδοση πέντε πακέτων, χωρίς κανένα packet loss. Ο μικρότερος χρόνος ήταν 26 ms, ο μέσος χρόνος 37 ms και ο μέγιστος 42 ms. Κρατώντας τη μέση τιμή των 37 ms, θα αναρωτηθεί κανείς αν μια τέτοια τιμή είναι αποδεκτή στο "good scenario", ενώ το 5G στα 3,6 GHz υπόσχεται latency 10 ms. Αναλογιζόμενοι όμως ότι οι μετρήσεις έγιναν πρωινή ώρα σε μια εταιρία όπου υπήρχε αυξημένο φόρτο στο δίκτυο, σίγουρα δικαιολογείται μια τέτοια τιμή.

Τέλος, για το "good scenario", στην παρακάτω εικόνα, φαίνονται οι τιμές από το speedtest (throughput).



Εικόνα 35 Speed for "good" scenario

Στην **Εικόνα 35** φαίνεται η ταχύτητα του download ίση με 1495 Mbps και upload 170 Mbps, που είναι σίγουρα κάτι που υπόσχεται το 5G TDD @ 3,6GHz.

Παρακάτω, θα ακολουθήσει μια παρόμοια περιγραφή για το "weak scenario", ούτως ώστε στο τέλος να γίνει αναπαράσταση κάποιων διαγραμμάτων excel με τις διαφορές των δύο σεναρίων.

8.2 "Weak" Scenario

Αρχικά, για το "weak scenario", θα πρέπει πρώτα να γίνουν γνωστές οι τιμές των βασικών παραμέτρων που μελετώνται, όπως φαίνονται στην **Εικόνα 36**. Η μπάντα στην οποία έχει κλειδώσει και πάλι η μέτρηση είναι η 2600 MHz, με EARFCN 2850. Η τιμή του **RSRP** έχει μετρηθεί στα -106 dBm που με βάση την **Εικόνα 32** είναι κατά πολύ μικρότερο από το κατώφλι των -80 dBm και γι'αυτό αντιστοιχίζεται στο Weak RF Connectivity, όπως υποδεικνύει η **Εικόνα 32**. Το **RSRQ** έχει μετρηθεί στα -9 dB που αντιστοιχεί οριακά στο Excellent RF Connectivity και το **SNR** στα 18 dB, που αντιστοιχεί στο Good RF Connectivity, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα (**Εικόνα 32**). Το TA και εδώ είναι 0, καθώς και έξω από το lab που έγινε η μέτρηση, δεν είναι κάποια τεράστια απόσταση από την κεραία.

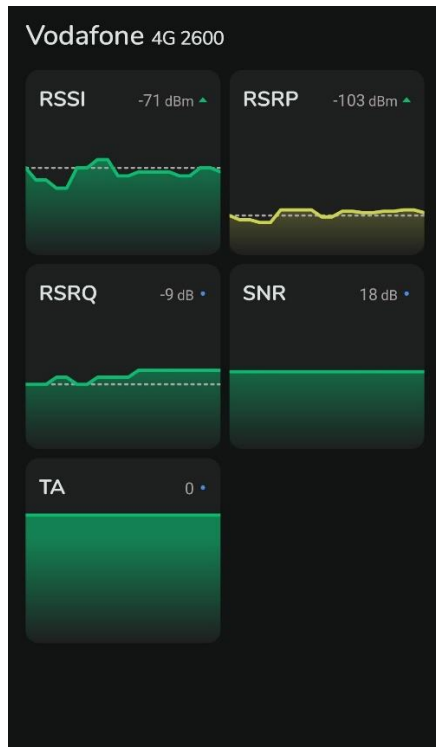
Το ενδιαφέρον στο "weak scenario", είναι πως ακόμα και πιο μακριά από την κεραία, αυτό που ουσιαστικά χαλάει είναι η λαμβανόμενη ισχύς μιας και το εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εξασθενεί. Οι άλλες παράμετροι δεν αντιστοιχούν στο Weak RF Connectivity καθώς επηρεάζονται κυρίως από τις εξωτερικές παρεμβολές οι οποίες στον ελεγχόμενο χώρο του εργαστηρίου είναι μηδενικές.

Vodafone 4G · LTE 2600 + 2100 + 1800 + 800
5G · NSA

CI	3840262	EARFCN	2850
eNb	15001	RSSI	-77 dBm
CID	6	RSRP	-106 dBm
TAC	4016	RSRQ	-9 dB
PCI	501	SNR	18 dB
BW	20 MHz	TA	0 (0 m)
eNb	2261	EARFCN	6300
CID	1	RSSI	-69 dBm
PCI	161	RSRP	-93 dBm
		RSRQ	-13 dB
Krestenon 5, Pallini (± 182 m; 82°)			
PCI	442	EARFCN	1451
		RSSI	-77 dBm
		RSRP	-100 dBm
		RSRQ	-11 dB
PCI	501	EARFCN	50
		RSSI	-61 dBm
		RSRP	-105 dBm
		RSRQ	-20 dB
5G NSA		SS RSRP	-84 dBm
ARFCN	643322	SS RSRQ	-11 dB

Εικόνα 36 Παράμετροι για το “weak” scenario

Αφού λοιπόν παρουσιάστηκαν οι τιμές των βασικών παραμέτρων, στην παρακάτω εικόνα φαίνονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα, όπως παρουσιάστηκαν και για το “good scenario”.

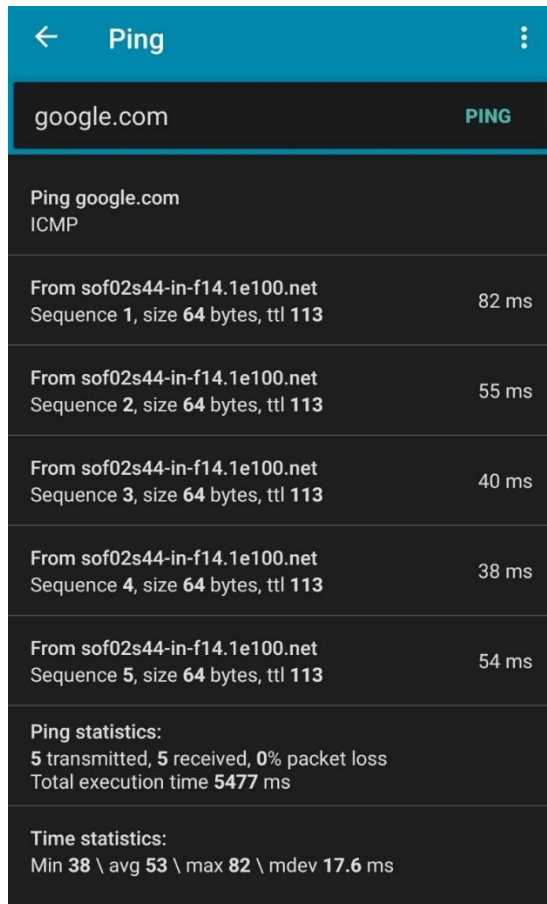


Εικόνα 37 RSSI, RSRP, RSRQ, SNR, TA for “weak” scenario

Και σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται πως υπάρχουν μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τις τιμές που φαίνονται στην **Εικόνα 36** που ήταν και το 1^ο στιγμιότυπο που τραβήχτηκε για το “weak scenario”. Όπως εξηγήθηκε και παραπάνω, οι αποκλίσεις αυτές είναι λογικές να υπάρχουν, καθώς οι μετρήσεις γίνονταν σε πραγματικό χρόνο και με μία συσκευή, επομένως από το ένα στιγμιότυπο στο άλλο, η μεταβλητή προλάβαινε να διακυμανθεί έστω και λίγο. Παρ’όλα αυτά στην **Εικόνα 37** οι παράμετροι RSRQ και SNR, έχουν την ίδια τιμή, ενώ το RSSI από -77 dBm φαίνεται τώρα -71 dBm και το RSRP από -106 dBm στα -103 dBm.

Για την σύγκριση των δύο σεναρίων που θα ακολουθήσει στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές της **Εικόνας 36** όπως και στο “good scenario”.

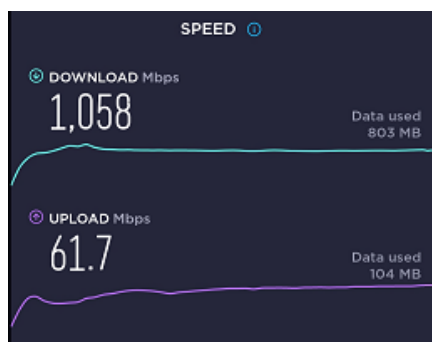
Όσον αφορά το χρόνο μετάδοσης των πακέτων σε αυτό το σενάριο, έγινε και πάλι μετάδοση πέντε πακέτων, χωρίς κανένα packet loss, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 38** παρακάτω. Ο μικρότερος χρόνος ήταν 38 ms, ο μέσος χρόνος 53 ms και ο μέγιστος 82 ms.



Εικόνα 38 Pings for "weak" scenario

Υπενθυμίζεται πως η μετάδοση των πακέτων ήταν ενεργή καθ'όλη τη διάρκεια των μετρήσεων προκειμένου να είναι ανοιχτό το κανάλι του 5G που όπως έχει αναφερθεί ήδη αφορά τα data, κι όχι τη σηματοδότηση.

Τέλος, στο επόμενο στιγμιότυπο, **Εικόνα 39**, φαίνεται το speedtest που πραγματοποιήθηκε και για το "weak scenario".



Εικόνα 39 Speed for "weak" scenario

Όπως φαίνεται, η ταχύτητα του download μετρήθηκε στα 1058 Mbps και του upload στα 61,7 Mbps.

8.3 Σύγκριση των δύο σεναρίων

Μετά την αναπαράσταση των μετρήσεων για το κάθε σενάριο, παρακάτω θα ακολουθήσουν κάποια διαγράμματα excel, ούτως ώστε να αποτυπωθεί η διαφορά τους και η τιμή της δέλτα (Relative Delta), όπου υπολογίζεται ως εξής: $\text{Delta (\%)} = ((A-B)/B) \times 100$. Με τις τωρινές παραμέτρους θα ισχύει $\text{Delta} = ((\text{Weak} - \text{Good}) / \text{Good}) \times 100$.

8.4 Mobile Network Charts

Σε αυτήν την υποενότητα υπάγονται τα συγκριτικά διαγράμματα για τις παραμέτρους: RSRP, RSRQ, RSI σε ασθενές (weak) και ισχυρό (good) ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 40 RSRP (dBm)

Για το “good scenario” η μέτρηση έδειξε -65 dBm και για το weak -106 dBm. Επομένως, θα ισχύει $\text{delta} = [-106 - (-65)] / (-65) \times 100 = 63,08 \%$.



Εικόνα 41 RSRQ (dB)

Όσον αφορά το RSRQ οι τιμές της μέτρησης έχουν ως εξής. Για το “good scenario” είναι -6 dB και για το “weak scenario” -9 dB. Άρα, θα ισχύει $\text{delta} = [-9 - (-6)/(-6)] * 100 = 50\%$.

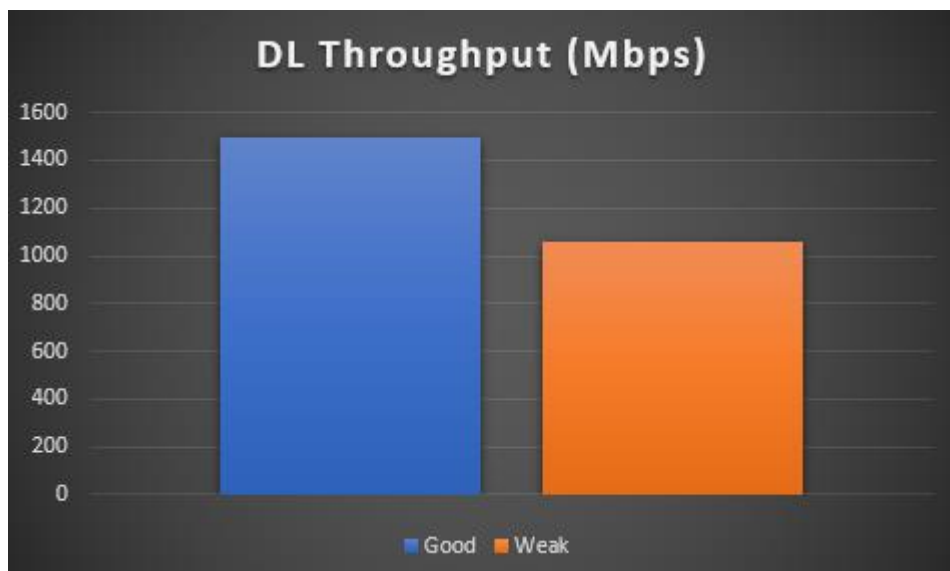


Εικόνα 42 RSSI (dBm)

Για το “good scenario” η μέτρηση έδειξε -51 dBm και για το weak -77 dBm. Επομένως, θα ισχύει $\text{delta} = [-77 - (-51) / (-51)] * 100 = 50,98\%$.

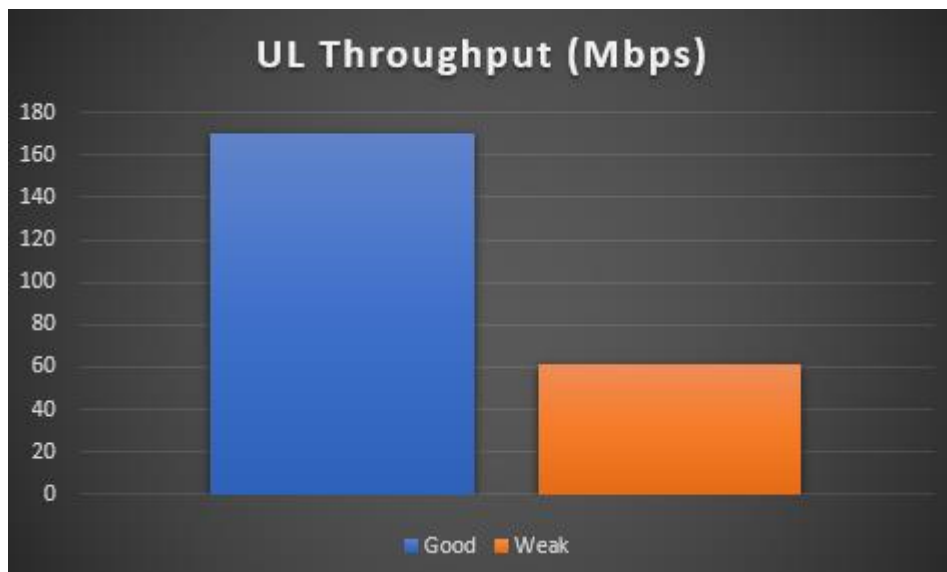
8.5 Performance Charts

Σε αυτήν την υποενότητα υπάγονται τα διαγράμματα για τις παραμέτρους: DL Throughput, UL Throughput, Latency.



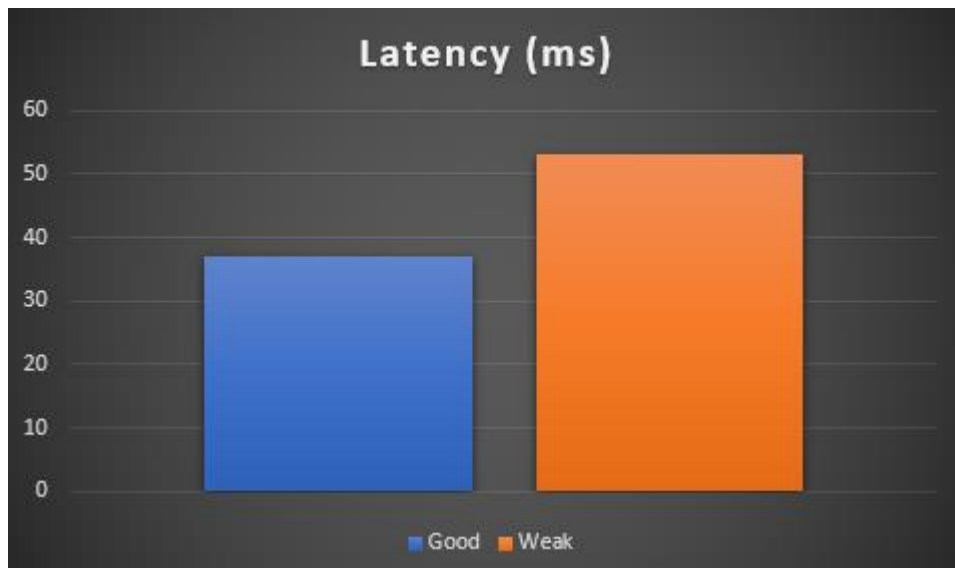
Εικόνα 43 DL Throughput (Mbps)

Για το “good scenario” η ταχύτητα download είναι στα 1495 Mbps, ενώ για το “weak scenario” είναι 1058 Mbps. Επομένως, θα ισχύει $\text{delta} = [1058 - 1495/1495] * 100 = -29,23 \%$.



Εικόνα 44 UL Throughput (Mbps)

Για το “good scenario” η ταχύτητα upload είναι στα 170 Mbps, ενώ για το “weak scenario” είναι 61,7 Mbps. Επομένως, θα ισχύει $\text{delta} = [61,7 - 170/170] * 100 = -63,71 \%$.

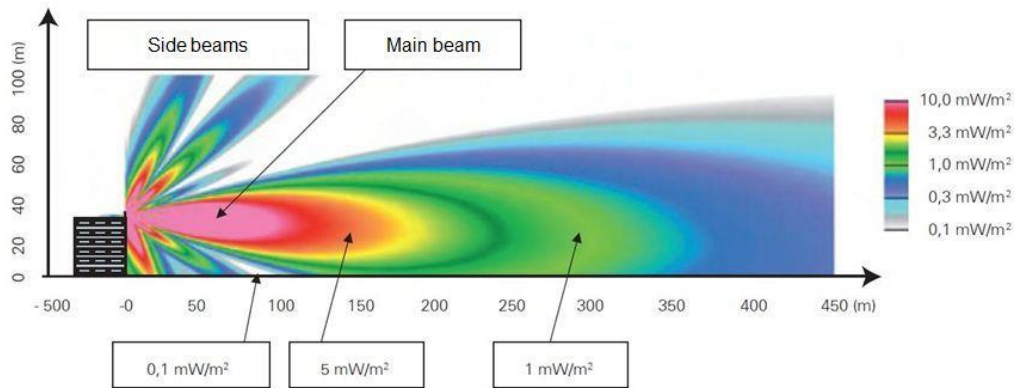


Εικόνα 45 Latency (ms)

Όσον αφορά το latency, για το “good scenario” η καθυστέρηση μετρήθηκε στα 37 ms, ενώ για το “weak scenario” στα 53 ms. Επομένως, θα ισχύει $\text{delta} = [53 - 37/37] * 100 = 43,24 \%$.

8.6 Συμπέρασμα μετρήσεων ποιότητας σήματος

Από τις παραπάνω μετρήσεις μπορεί εύκολα κάποιος να καταλάβει πως όσο απομακρυνόμαστε από την κεραία ενός σταθμό βάσης, η ισχύς του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εξασθενεί επηρεάζοντας κατά αυτό τον τρόπο αρνητικά την απόδοση του δικτύου (latency, UL & DL throughput) και το user experience.



Εικόνα 46 Ισχύς ΗΜ πεδίου [30]

Από τα παραπάνω κεφάλαια, γίνεται κατανοητό πως το φάσμα του 5G είναι τόσο μεγάλο που σίγουρα υπάρχουν και άλλα γνωστικά αντικείμενα, αλλά και τεχνολογίες που θα προστεθούν. Το γεγονός ότι είναι κάτι σχετικά καινούριο δεν θα πρέπει να προκαλεί φόβο για την ασφάλειά του, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί η εκπεμπόμενη ισχύς είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

Όσον αφορά τον μετρητικό εξοπλισμό, αυξάνονται συνεχώς τα εργαλεία μετρήσεων, καθώς και η τεχνολογία τους.

Τέλος, παίρνοντας παράδειγμα τις μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, το μόνο σίγουρο είναι ότι σιγά σιγά θα βλέπουμε όλο και καλύτερες τιμές στις ταχύτητες και στο latency!

9. Μετρήσεις ΗΜ πεδίου 5G

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με σκοπό την καταγραφή των επιπέδων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο περιβάλλον από πηγές ραδιοσυχνοτήτων όπως αναμεταδότες ραδιοφώνου και τηλεόρασης, σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας, ραντάρ, TETRA, σταθμούς ασύρματου internet και μικροκυματικά κάτοπτρα ζεύξης και την σύγκρισή των επιπέδων αυτών με τα όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού όπως καθορίζονται στην κείμενη νομοθεσία.

9.1 Περιγραφή Σταθμού Βάσης υπό μέτρηση

Ο έλεγχος των επιπέδων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων πραγματοποιήθηκε στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο του δεύτερου ορόφου του κτηρίου της Victus Networks.

9.2 Άλλοι πομποί ακτινοβολίας Ραδιοσυχνοτήτων

Πλησίον του υπό μέτρηση σταθμού της VODAFONE εντοπίζονται οι παρακάτω πομποί:

Απόσταση από μετρούμενη πηγή	Πομπός	Προσανατολισμός ως προς την μετρούμενη πηγή
-	Κεραιοδιατάξεις WIFI	Εντός του κτηρίου, στην οροφή
-	Κεραιοδιατάξεις Wind	Εντός του κτηρίου

Πίνακας 1 Άλλοι πομποί ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων

Σε κάθε περίπτωση οι καταγεγραμμένες τιμές συμπεριλαμβάνουν και εκπομπές εκτός της γεωγραφικής αυτής περιοχής (κτηρίου μέτρησης).

9.3 Εξοπλισμός μέτρησης

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω βαθμονομημένα όργανα καθώς και απαραίτητος συμπληρωματικός εξοπλισμός :

1. Πεδιόμετρο **SRM-3006** της εταιρίας **NARDA Safety Test Solutions**. Η βασική μονάδα είναι φορητή και παρέχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης συχνοεπιλεκτικών μετρήσεων σε συχνοτικό εύρος από 9kHz – 6GHz. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για ευρυζωνικές μετρήσεις (με ολοκλήρωση σε όλη την μπάντα συχνοτήτων) όσο και για την ανάλυση του μετρούμενου πεδίου στις φασματικές του συνιστώσες αναγνωρίζοντας τις πηγές εκπομπής και επιμερίζοντας τη συνεισφορά τους στο συνολικό μετρούμενο πεδίο. Η βασική μονάδα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ανιχνευτές οι οποίοι προσαρτώνται είτε απευθείας είτε με χρήση καλωδίου προέκτασης 1,5m. Το σύστημα SRM 3006 του εργαστηρίου έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Δέκτης 1

Εξοπλισμός	Serial No: B-0057
Κατασκευαστής: NARDA	Εύρος συχνοτήτων: 9 kHz – 6 GHz
Τύπος: Συχνοεπιλεκτικός δέκτης	Ημερ. τελευταίας Διακρίβωσης: 03/11/2022

Ανιχνευτήρας (Probe)

Ανιχνευτής	No 1
Κατασκευαστής	NARDA
Τύπος:	E-Field (ισοτροπικός)
Serial No:	B-0056
Εύρος συχνοτήτων	420MHz- 6GHz
Ημερ. τελευταίας Διακρίβωσης	03/11/2022

Καλώδιο επέκτασης της εταιρίας Narda Safety Test Solutions

Καλώδιο επέκτασης μήκους 1,5m	Serial No: AA-0092
Κατασκευαστής: NARDA	Ημερ. τελευταίας Διακρίβωσης: 03/11/2022

2. Τρίποδο (κατάλληλα επισημασμένο) στο οποίο στηρίζεται κατάλληλα ο ανιχνευτής σε ύψη 110cm, 150cm & 170cm από το έδαφος.

10.3.1 Προσδιορισμός θέσεων μέτρησης

Οι χώροι στους οποίους πραγματοποιούνται μετρήσεις στο περιβάλλον μιας κεραίας εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας επιλέγονται με σκοπό να ελεγχθούν οι πιο «επιβαρημένες» από πλευράς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, θέσεις και συνθήκες έκθεσης του κοινού σε σχέση με τα όρια ασφαλούς έκθεσης όπως καθορίζονται από τη νομοθεσία. Γι' αυτό το λόγο πριν την αναλυτική καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιείται επισκόπηση του χώρου στην ευρύτερη περιοχή εγκατάστασης του πομπού ΗΜ ακτινοβολίας προκειμένου να εντοπιστούν οι θέσεις στις οποίες παρουσιάζονται οι τοπικά μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου.

Εν συνεχεία, στο σημείο επιλογής εξετάζεται η μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας μετακινώντας τον probe 10 cm κατακόρυφα και οριζόντια προκειμένου να ελεγχτεί η ομογένεια του πεδίου. Σε περίπτωση που η ένδειξη της έντασης μεταβάλλεται περισσότερο από 1dB, αντί της μέτρησης στα τρία ύψη (που αντιστοιχούν στο χώρο που καταλαμβάνει το σώμα ενός υποτιθέμενου ανθρώπου) πραγματοποιούνται τρεις

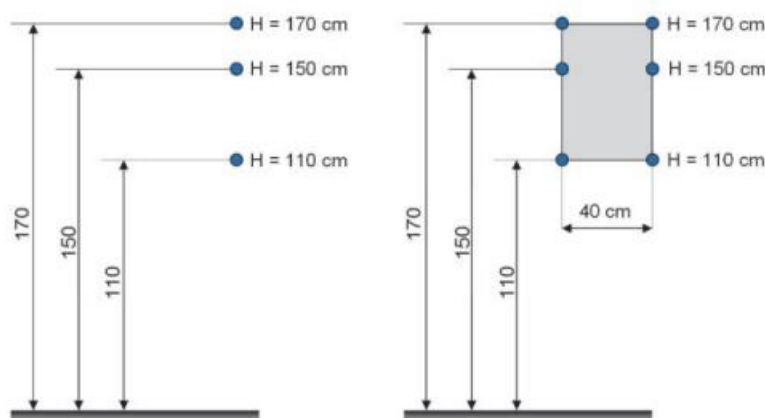
μετρήσεις στο ύψος που, βάσει των ενδείξεων του οργάνου, παρατηρείται η μέγιστη τιμή έντασης της ακτινοβολίας.

9.4 Υπολογισμός συνολικού λόγου έκθεσης

Ο Συνολικός Λόγος Έκθεσης χρησιμοποιείται προκειμένου να εκτιμηθεί η έκθεση του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε σύγκριση με τα όρια όπως αυτά καθορίζονται στην κείμενη νομοθεσία. Στην παράγραφο 10.9 του παρόντος αναφέρονται τα όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού της Ελληνικής Νομοθεσίας (επίπεδα αναφοράς) σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων όπως προκύπτουν για συντελεστή μείωσης 30% και 40% για τα μεγέθη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E), της έντασης του μαγνητικού πεδίου (H) και της ισοδύναμης πυκνότητας ισχύος επίπεδου κύματος (P).

Η μέγιστη τιμή του Συνολικού Λόγου Έκθεσης είναι 1 και **αντιστοιχεί στο 100% των ορίων.** Μετά τον εντοπισμό των θέσεων στις οποίες παρουσιάζονται οι τοπικά μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου πραγματοποιούνται αναλυτικές μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε θέση όπως περιγράφεται παρακάτω:

- I. σε τρία ύψη (110, 150, 170cm από το έδαφος) σε κάθε θέση μέτρησης που αντιστοιχούν στο χώρο που καταλαμβάνει το σώμα ενός υποτιθέμενου εκτεθειμένου ανθρώπου υπολογίζοντας στη συνέχεια την πυκνότητα ισχύος.



Εικόνα 47 Μέτρηση σε 3 ύψη

Η μέτρηση σε κάθε θέση εκφράζει το μέσο όρο των τιμών του ηλεκτρικού πεδίου που καταγράφονται σε χρονικό διάστημα 6min. Σε κάθε θέση υπολογίζονται οι Λόγοι Έκθεσης $\lambda_{i,f}$ για κάθε ύψος i και φασματική περιοχή μέτρησης f . Ο Λόγος Έκθεσης λ_f στη φασματική περιοχή f από την επανάληψη των μετρήσεων στα 3 ύψη στη θέση μέτρησης υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των $\lambda_{i,f}$ όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\lambda_f = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \lambda_{i,f}$$

Ο Συνολικός Λόγος Έκθεσης Λ στη θέση μέτρησης υπολογίζεται ως το άθροισμα των Λόγων Έκθεσης λ_f στη φασματική περιοχή f .

$$\Lambda = \sum_f \lambda_f$$

9.5 Αποτελέσματα μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στα στοιχεία της μέτρησης τα οποία αφορούν τις θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι αναλυτικές μετρήσεις, στη μέθοδο που ακολουθήθηκε στο συντελεστή μείωσης των ορίων που εφαρμόστηκε (30% ή 40% ορίων Ε.Ε) και στις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την ώρα διεξαγωγής της μέτρησης.

Σε κάθε θέση μέτρησης υπολογίζονται ο Λόγος Έκθεσης για κάθε φασματική περιοχή λ_f , ο Συνολικός Λόγος Έκθεσης Λ , η ανεπτυγμένη αβεβαιότητα του λ_f [$+U(\lambda_f)$, $-U(\lambda_f)$] και του Συνολικού Λόγου Έκθεσης [$+U(\Lambda)$, $-U(\Lambda)$] καθώς και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης ($\Lambda_{2,5\%}$ και $\Lambda_{97,5\%}$) του Συνολικού Λόγου Έκθεσης. Κατόπιν της σύγκρισης με τα όρια ασφαλούς έκθεσης συνάγεται το συμπέρασμα της μέτρησης.

9.5.1 Στοιχεία μέτρησης

- Περιγραφή θέσεων μέτρησης

Πραγματοποιήθηκαν τόσο ευρυζωνικές όσο και συχνοεπιλεκτικές μετρήσεις στις θέσεις που αναφέρονται παρακάτω.

Θέση Μέτρησης	Περιγραφή
1	Στο χώρο του εργαστηρίου
2	Στην 1η είσοδο των γραφείων του 2ου ορόφου
3	Στον εξωτερικό χώρο του 2ου ορόφου

Πίνακας 2 Περιγραφή θέσεων μέτρησης

- Μέθοδος μετρήσεων

Στις 3 θέσεις πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 3 διαφορετικά ύψη (110cm, 150cm, 170cm αντίστοιχα από το έδαφος) ώστε να υπολογιστεί η μέση έκθεση που δέχεται το ανθρώπινο σώμα.

9.6 Αποτελέσματα της Έντασης Ηλεκτρικού πεδίου και υπολογισμός της πυκνότητας Ισχύος- Φασματική ανάλυση

Με βάση τις μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E (V/m) υπολογίζεται η επιφανειακή πυκνότητα ισχύος ισοδύναμου επίπεδου κύματος σύμφωνα με τον τύπο $S = E^2 / Z_o \left[\frac{W}{m^2} \right]$ (όπου $Z_o = 377 \Omega$, η εμπέδηση του ελεύθερου χώρου).

Θέση Μέτρησης 1	Στο χώρο του εργαστηρίου				
	Φασματική περιοχή (MHz)	Ηλεκτρικό Πεδίο (V/m)	Πυκνότητα Ισχύος (W/m ²)	E(V/m)- 110cm	E(V/m)- 150cm
420-460	0,02583	0,00000	0,02398	0,02659	0,02682
460-703	0,10516	0,00003	0,09043	0,10778	0,11567
703-758	0,01999	0,00000	0,01853	0,02077	0,02060
758-768	0,00805	0,00000	0,00754	0,00835	0,00823
768-778	0,01867	0,00000	0,01561	0,02041	0,01961
778-788	0,00995	0,00000	0,00912	0,01089	0,00976
788-791	0,00449	0,00000	0,00432	0,00460	0,00453
791-801	0,01728	0,00000	0,01366	0,01691	0,02059
801-811	0,06634	0,00001	0,03441	0,09095	0,06123
811-821	0,01193	0,00000	0,01043	0,01200	0,01321
821-925	0,02246	0,00000	0,02074	0,02336	0,02320
925-935	0,02067	0,00000	0,01374	0,02136	0,02522
935-945	0,02512	0,00000	0,02142	0,02473	0,02869
945-960	0,25207	0,00017	0,24881	0,22232	0,28159
960-1805	0,04415	0,00001	0,04114	0,04654	0,04462
1805-1820	0,20651	0,00011	0,17717	0,22280	0,21658
1820-1845	0,32028	0,00027	0,27037	0,32878	0,35573
1845-1880	0,03744	0,00000	0,03748	0,03072	0,04308
1880-2110	0,01686	0,00000	0,01560	0,01756	0,01736
2110-2120	0,27943	0,00021	0,20599	0,26854	0,34597
2120-2130	0,07674	0,00002	0,07078	0,07539	0,08352
2130-2140	0,04308	0,00000	0,04966	0,03478	0,04348
2140-2150	0,00351	0,00000	0,00327	0,00357	0,00368
2150-2170	0,02263	0,00000	0,01691	0,02045	0,02885
2170-2400	0,01590	0,00000	0,01476	0,01649	0,01639
2400-2483	0,01582	0,00000	0,01129	0,01293	0,02136
2483-2620	0,05517	0,00001	0,08896	0,02912	0,01919
2620-2640	0,16060	0,00007	0,14108	0,19070	0,14529
2640-2670	0,04781	0,00001	0,03464	0,03687	0,06556
2670-2690	0,18683	0,00009	0,16337	0,20601	0,18865
2690-3450	0,04647	0,00001	0,04319	0,04809	0,04797
3450-3600	0,02248	0,00000	0,02093	0,02314	0,02328
3600-3700	0,57363	0,00087	0,64874	0,53292	0,53130
3700-3800	0,01882	0,00000	0,01786	0,01929	0,01926
3800-5150	0,07675	0,00002	0,07176	0,07950	0,07875
5150-5850	0,08941	0,00002	0,08361	0,09231	0,09204
5850-6000	0,06414	0,00001	0,06016	0,06588	0,06619
420-6000	0,85698	0,00195	0,85282	0,83760	0,87998

Πίνακας 3 Υπολογισμός φασματικής πυκνότητας στη θέση μέτρησης 1

Θέση Μέτρησης 2	Στην 1 ^η είσοδο των γραφείων του 2 ^{ου} ορόφου				
Φασματική περιοχή (MHz)	Ηλεκτρικό Πεδίο (V/m)	Πυκνότητα Ισχύος (W/m ²)	E(V/m)-110cm	E(V/m)-150cm	E(V/m)-170cm
420-460	0,02604	0,00000	0,02658	0,02430	0,02715
460-703	0,10038	0,00003	0,10838	0,08885	0,10289
703-758	0,02039	0,00000	0,02105	0,01885	0,02120
758-768	0,00809	0,00000	0,00833	0,00754	0,00837
768-778	0,00850	0,00000	0,00876	0,00790	0,00881
778-788	0,00968	0,00000	0,00984	0,00906	0,01011
788-791	0,00449	0,00000	0,00462	0,00418	0,00467
791-801	0,01977	0,00000	0,02062	0,01803	0,02057
801-811	0,01980	0,00000	0,02071	0,01939	0,01926
811-821	0,01095	0,00000	0,01115	0,01045	0,01122
821-925	0,02283	0,00000	0,02330	0,02147	0,02367
925-935	0,01495	0,00000	0,01308	0,01399	0,01744
935-945	0,02463	0,00000	0,02176	0,02638	0,02549
945-960	0,04346	0,00001	0,03940	0,04995	0,04026
960-1805	0,04688	0,00001	0,05302	0,04223	0,04471
1805-1820	0,82851	0,00182	0,82936	0,85771	0,79737
1820-1845	0,59649	0,00094	0,65327	0,50896	0,61773
1845-1880	0,03663	0,00000	0,03609	0,03334	0,04014
1880-2110	0,01710	0,00000	0,01722	0,01687	0,01722
2110-2120	0,04423	0,00001	0,04939	0,04412	0,03852
2120-2130	0,11173	0,00003	0,11940	0,11390	0,10112
2130-2140	0,12922	0,00004	0,11746	0,12969	0,13957
2140-2150	0,00339	0,00000	0,00348	0,00319	0,00351
2150-2170	0,02309	0,00000	0,02038	0,02523	0,02340
2170-2400	0,01597	0,00000	0,01649	0,01487	0,01649
2400-2483	0,04775	0,00001	0,06938	0,01588	0,04213
2483-2620	0,03628	0,00000	0,03829	0,03712	0,03323
2620-2640	0,01597	0,00000	0,01547	0,01673	0,01569
2640-2670	0,03980	0,00000	0,03630	0,04072	0,04215
2670-2690	0,65633	0,00114	0,61999	0,70147	0,64486
2690-3450	0,04705	0,00001	0,04880	0,04357	0,04857
3450-3600	0,02280	0,00000	0,02376	0,02124	0,02333
3600-3700	0,46096	0,00056	0,46573	0,43000	0,48543
3700-3800	0,01878	0,00000	0,01945	0,01740	0,01940
3800-5150	0,07785	0,00002	0,08093	0,07221	0,08010
5150-5850	0,09437	0,00002	0,09885	0,08912	0,09487
5850-6000	0,06546	0,00001	0,06795	0,06066	0,06752
420-6000	1,32838	0,00468	1,34182	1,32069	1,32252

Πίνακας 4 Υπολογισμός φασματικής πυκνότητας στη θέση μέτρησης 2

Θέση Μέτρησης 3	Στον εξωτερικό χώρο του 2 ^{ου} ορόφου				
Φασματική περιοχή (MHz)	Ηλεκτρικό Πεδίο (V/m)	Πυκνότητα Ισχύος (W/m ²)	E(V/m)-110cm	E(V/m)-150cm	E(V/m)-170cm
420-460	0,09600	0,00002	0,08481	0,09650	0,10557
460-703	0,21762	0,00013	0,19461	0,21168	0,24371
703-758	0,07528	0,00002	0,06706	0,07629	0,08175
758-768	0,02912	0,00000	0,02778	0,02995	0,02960
768-778	0,03083	0,00000	0,02771	0,03221	0,03234
778-788	0,03195	0,00000	0,03000	0,03099	0,03467
788-791	0,01584	0,00000	0,01424	0,01595	0,01720
791-801	0,03720	0,00000	0,03322	0,03615	0,04171
801-811	0,04902	0,00001	0,03965	0,04337	0,06129
811-821	0,03113	0,00000	0,02986	0,03074	0,03272
821-925	0,08488	0,00002	0,07484	0,08368	0,09493
925-935	0,04551	0,00001	0,04173	0,03795	0,05506
935-945	0,05318	0,00001	0,04500	0,04259	0,06815
945-960	0,79427	0,00167	0,87339	0,66154	0,83197
960-1805	0,15727	0,00007	0,14083	0,15579	0,17348
1805-1820	0,02549	0,00000	0,02440	0,02656	0,02547
1820-1845	1,04168	0,00288	0,99000	0,78770	1,28635
1845-1880	0,09481	0,00002	0,10030	0,04894	0,12047
1880-2110	0,06195	0,00001	0,05429	0,06167	0,06901
2110-2120	0,03648	0,00000	0,04191	0,04139	0,02286
2120-2130	0,47006	0,00059	0,42584	0,58130	0,37898
2130-2140	0,02653	0,00000	0,02247	0,02031	0,03456
2140-2150	0,01305	0,00000	0,01115	0,01204	0,01556
2150-2170	0,05530	0,00001	0,04496	0,02719	0,08009
2170-2400	0,06013	0,00001	0,05262	0,05891	0,06789
2400-2483	0,03814	0,00000	0,03254	0,03955	0,04172
2483-2620	0,08022	0,00002	0,09906	0,07738	0,05918
2620-2640	0,02619	0,00000	0,02797	0,02549	0,02502
2640-2670	0,08652	0,00002	0,08515	0,05801	0,10881
2670-2690	0,06917	0,00001	0,04662	0,05794	0,09393
2690-3450	0,17705	0,00008	0,15547	0,17560	0,19757
3450-3600	0,08533	0,00002	0,07522	0,08541	0,09429
3600-3700	4,03832	0,04326	3,58889	4,56044	3,90467
3700-3800	0,07693	0,00002	0,06536	0,07585	0,08791
3800-5150	0,29285	0,00023	0,26094	0,29133	0,32299
5150-5850	0,36116	0,00035	0,35294	0,34409	0,38515
5850-6000	0,24785	0,00016	0,21537	0,24720	0,27710
420-6000	4,32634	0,04965	3,89927	4,75731	4,27966

Πίνακας 5 Υπολογισμός φασματικής πυκνότητας στη θέση μέτρησης 3

9.6.1 Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης και Συνολικού Λόγου Έκθεσης στις θέσεις μέτρησης

Από την επισκόπηση του φάσματος, για όλες τις θέσεις μέτρησης, μπορούμε να εντοπίσουμε τις επιμέρους πηγές που συνεισφέρουν στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο καθώς και το πόσο συνεισφέρουν σε αυτό. Από τα δεδομένα αυτά για όλη την μετρούμενη φασματική περιοχή από 420MHz - 6000MHz υπολογίζονται για κάθε θέση μέτρησης ο Λόγος Έκθεσης για κάθε φασματική περιοχή λ_f και ο Συνολικός Λόγος Έκθεσης Λ .

Θέση Μέτρησης 1	Στο χώρο του εργαστηρίου					
Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης						
	Ύψος (cm)			Μέση Τιμή Λόγου Έκθεσης στη φασματική περιοχή f	Ανεπτυγμένη Αβεβαιότητα τύπου A & B ανά φασματική περιοχή	
Φασματική περιοχή (MHz)	110	150	170	λ_f	+U(λ_f)	-U(λ_f)
420-460	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
460-703	0,00002	0,00002	0,00003	0,00002	0,00002	-0,00002
703-758	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
758-768	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
768-778	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
778-788	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
788-791	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
791-801	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
801-811	0,00000	0,00001	0,00000	0,00000	0,00001	-0,00001
811-821	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
821-925	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
925-935	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
935-945	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
945-960	0,00006	0,00005	0,00008	0,00006	0,00006	-0,00005
960-1805	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1805-1820	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	-0,00002
1820-1845	0,00004	0,00005	0,00006	0,00005	0,00005	-0,00004
1845-1880	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1880-2110	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2110-2120	0,00002	0,00003	0,00005	0,00004	0,00005	-0,00005
2120-2130	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2130-2140	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2140-2150	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2150-2170	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2170-2400	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2400-2483	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2483-2620	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2620-2640	0,00001	0,00002	0,00001	0,00001	0,00002	-0,00001
2640-2670	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2670-2690	0,00001	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	-0,00001
2690-3450	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3450-3600	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3600-3700	0,00019	0,00013	0,00013	0,00015	0,00016	-0,00013
3700-3800	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3800-5150	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
5150-5850	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00000
5850-6000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Πίνακας 6 Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης στη θέση μέτρησης 1

Συνολικός Λόγος Έκθεσης Λ	Συνολική Ανεπτ. Αβεβαιότητα Συνολικού Λόγου Έκθεσης (άνω)	Συνολική Ανεπτ. Αβεβαιότητα Συνολικού Λόγου Έκθεσης (κάτω)	95% δ.ε Συνολικού Λόγου Έκθεσης (2,5%)	95% δ.ε Συνολικού Λόγου Έκθεσης (97,5%)	<u>Συμπέρασμα</u> Τηρούνται τα όρια ασφαλούς έκθεσης της ελληνικής νομοθεσίας
	+U(Λ)	-U(Λ)	$\Lambda_{2,5\%}$	$\Lambda_{97,5\%}$	
0,00039	0,00036	-0,00026	0,00013	0,00075	

Πίνακας 7 Συμπέρασμα μέτρησης για τη θέση 1

Θέση Μέτρησης 2	Στην 1 ^η είσοδο των γραφείων του 2 ^{ου} ορόφου					
Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης						
Φασματική περιοχή (MHz)	Ύψος (cm)			Μέση Τιμή Λόγου Έκθεσης στη φασματική περιοχή f	Ανεπτυγμένη Αβεβαιότητα τύπου A & B ανά φασματική περιοχή	
	110	150	170	λ_f	+U(λ_f)	-U(λ_f)
420-460	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
460-703	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	-0,00001
703-758	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
758-768	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
768-778	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
778-788	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
788-791	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
791-801	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
801-811	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
811-821	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
821-925	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
925-935	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
935-945	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
945-960	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
960-1805	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1805-1820	0,00034	0,00036	0,00031	0,00034	0,00028	-0,00020
1820-1845	0,00021	0,00013	0,00019	0,00017	0,00018	-0,00015
1845-1880	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1880-2110	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2110-2120	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2120-2130	0,00001	0,00001	0,00000	0,00001	0,00001	0,00000
2130-2140	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	-0,00001
2140-2150	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2150-2170	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2170-2400	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2400-2483	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2483-2620	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2620-2640	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2640-2670	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2670-2690	0,00017	0,00022	0,00019	0,00019	0,00020	-0,00014
2690-3450	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3450-3600	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3600-3700	0,00010	0,00008	0,00011	0,00010	0,00009	-0,00007
3700-3800	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3800-5150	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
5150-5850	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00000
5850-6000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Πίνακας 8 Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης στη θέση μέτρησης 2

Συνολικός Λόγος Έκθεσης Λ	Συνολική Ανεπτ. Αβεβαιότητα Συνολικού Λόγου Έκθεσης (άνω)	Συνολική Ανεπτ. Αβεβαιότητα Συνολικού Λόγου Έκθεσης (κάτω)	95% δ.ε Συνολικού Λόγου Έκθεσης (2,5%)	95% δ.ε Συνολικού Λόγου Έκθεσης (97,5%)	<u>Συμπέρασμα</u>
	+U(Λ)	-U(Λ)	$\Lambda_{2,5\%}$	$\Lambda_{97,5\%}$	Τηρούνται τα όρια ασφαλούς έκθεσης της ελληνικής νομοθεσίας
0,00085	0,00076	-0,00053	0,00032	0,00162	

Πίνακας 9 Συμπέρασμα μέτρησης για τη θέση 2

Θέση Μέτρησης 3	Στον εξωτερικό χώρο του 2 ^{ου} ορόφου					
Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης						
Φασματική περιοχή (MHz)	Ύψος (cm)			Μέση Τιμή Λόγου Έκθεσης στη φασματική περιοχή f	Ανεπτυγμένη Αβεβαιότητα τύπου A & B ανά φασματική περιοχή	
	110	150	170	λ_f	+U(λ_f)	-U(λ_f)
420-460	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	-0,00001
460-703	0,00007	0,00009	0,00011	0,00009	0,00009	-0,00007
703-758	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	-0,00001
758-768	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
768-778	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
778-788	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
788-791	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
791-801	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
801-811	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
811-821	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
821-925	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	-0,00001
925-935	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
935-945	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
945-960	0,00075	0,00043	0,00068	0,00062	0,00062	-0,00053
960-1805	0,00002	0,00002	0,00003	0,00002	0,00002	-0,00002
1805-1820	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1820-1845	0,00048	0,00030	0,00081	0,00053	0,00077	-0,00071
1845-1880	0,00000	0,00000	0,00001	0,00000	0,00001	-0,00001
1880-2110	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2110-2120	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2120-2130	0,00008	0,00015	0,00006	0,00010	0,00014	-0,00013
2130-2140	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2140-2150	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2150-2170	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2170-2400	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2400-2483	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2483-2620	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2620-2640	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2640-2670	0,00000	0,00000	0,00001	0,00000	0,00001	-0,00001
2670-2690	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2690-3450	0,00001	0,00001	0,00002	0,00001	0,00002	-0,00001
3450-3600	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3600-3700	0,00578	0,00934	0,00684	0,00732	0,00804	-0,00640
3700-3800	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
3800-5150	0,00003	0,00004	0,00005	0,00004	0,00004	-0,00003
5150-5850	0,00006	0,00005	0,00007	0,00006	0,00008	-0,00005
5850-6000	0,00002	0,00003	0,00003	0,00003	0,00005	-0,00003

Πίνακας 10 Υπολογισμός Λόγου Έκθεσης στη θέση μέτρησης 3

Συνολικός Λόγος Έκθεσης Λ	Συνολική Αβεβαιότητα Συνολικού Λόγου Έκθεσης (άνω)	Συνολική Αβεβαιότητα Συνολικού Λόγου Έκθεσης (κάτω)	95% δ.ε Συνολικού Λόγου Έκθεσης (2,5%)	95% δ.ε Συνολικού Λόγου Έκθεσης (97,5%)	Συμπέρασμα
	+U(Λ)	-U(Λ)	Λ _{2,5%}	Λ _{97,5%}	Τηρούνται τα όρια ασφαλούς έκθεσης της ελληνικής νομοθεσίας
0,00890	0,00918	-0,00711	0,00179	0,01808	

Πίνακας 11 Συμπέρασμα μέτρησης για τη θέση 3

9.7 Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων μέτρησης- Σύγκριση με τα όρια ασφαλείας

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο συνολικός λόγος έκθεσης για κάθε θέση μέτρησης σε σύγκριση με το όριο.

Θέση Μέτρησης	Συνολικός Λόγος Έκθεσης	Φορές κάτω από τα όρια*
1	0,00039	2564
2	0,00085	1176
3	0,0089	112

Πίνακας 12 Συνολικός Λόγος Έκθεσης

*ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Η σύγκριση του Συνολικού Λόγου Έκθεσης έγινε με τη μονάδα (1), η οποία αντιστοιχεί στο 100% των μειωμένων κατά 60% ορίων της Ε.Ε. Αν ο Συνολικός Λόγος Έκθεσης βρεθεί από τις μετρήσεις ίσος με μια τιμή Λ αυτό σημαίνει ότι είμαστε 1/Λ φορές κάτω από τα όρια της κείμενης νομοθεσίας.

9.8 Τελικά συμπεράσματα

Σε κάθε θέση μέτρησης υπολογίστηκε ο συνολικός λόγος έκθεσης και η αβεβαιότητά του και κατασκευάστηκε το 95% διάστημα εμπιστοσύνης για αυτόν βάσει του οποίου εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με την τήρηση ή όχι των ορίων ασφαλούς έκθεσης του κοινού σε εκπομπές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε κάθε θέση μέτρησης ξεχωριστά. Με βάση τα προαναφερθέντα μπορεί συμπερασματικά να αναφερθεί ότι σε όλες τις θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο δεύτερο όροφο του κτηρίου της Victus στην Παλλήνη, δεν διαπιστώθηκαν υπερβάσεις ή πιθανές υπερβάσεις των ορίων ασφαλούς έκθεσης του κοινού σε εκπομπές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας λαμβάνοντας υπόψη τα αυστηρότερα όρια της Ελληνικής Νομοθεσίας.

Συνεπώς τηρούνται τα όρια αυτά σε όλες τις θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των πηγών ραδιοσυχνοτήτων στη φασματική περιοχή από 420MHz - 6000MHz δείχνουν ότι το επίπεδο του συνολικού πεδίου από όλες τις πηγές ραδιοσυχνοτήτων σε όλες τις

θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις είναι από 112 έως 2564 φορές κάτω από το όριο ασφαλείας του Συνολικού Λόγου Έκθεσης λαμβάνοντας υπόψη τα αυστηρότερα όρια της Ελληνικής Νομοθεσίας.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως στις μπάντες συχνοτήτων του 5G (3,5 GHz), τα επίπεδα ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι χαμηλά, καθώς και η κίνηση τη δεδομένη στιγμή ήταν μικρή. Η πληρότητα στο γραφείο δεν είναι 100% και το σημαντικότερο όλων δεν έχουν όλοι στο κινητό τους την τεχνολογία 5G, ούτως ώστε να δημιουργηθεί κίνηση στην κεραία.

9.9 Παράρτημα

9.9.1 Όρια ασφαλούς έκθεσης

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην Ελλάδα έχουν ενσωματωθεί επιπλέον παράγοντες ασφαλείας στα όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού. Ειδικά, σε περίπτωση εγκατάστασης σταθμού βάσης σε απόσταση μέχρι 300 μέτρων από την περίμετρο κτιριακών εγκαταστάσεων βρεφονηπιακών σταθμών, σχολείων, γηροκομείων και νοσοκομείων, τα όρια της Ελλάδας έχουν τεθεί στο 60% αυτών της σύστασης της Ε.Ε, ενώ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις είναι στο 70%.

Περιοχή Συχνοτήτων	Όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού της Ευρωπαϊκής Ένωσης		
	E (V/m)	H (A/m)	P (W/m ²)
10-400 MHz	28	0,073	2
600 MHz	33,7	0,091	3
700MHz	36,92	0,096	3,5
800 MHz	38,9	0,105	4
900 MHz	41,25	0,111	4,5
1800 MHz	58,3	0,157	9
2 - 300GHz	61	0,16	10

Πίνακας 13 Επίπεδα αναφοράς (κοινό) της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα μεγέθη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E), της έντασης του μαγνητικού πεδίου (H) και της ισοδύναμης πυκνότητας ισχύος επιπέδου κύματος (P).

	Ποσοστό (%) των ορίων ασφαλούς έκθεσης του κοινού της Ευρωπαϊκής Ένωσης					
	70%			60%		
Περιοχή Συχνοτήτων	E (V/m)	H (A/m)	P (W/m ²)	E (V/m)	H (A/m)	P (W/m ²)
10-400MHz	23,4	0,0611	1,4	21,7	0,0565	1,2
600 MHz	28,2	0,0758	2,1	26,1	0,0702	1,8
700MHz	30,39	0,081	2,4	28,14	0,075	2,1
800 MHz	32,5	0,0876	2,8	30,1	0,0811	2,4
900 MHz	34,5	0,0929	3,1	31,9	0,0860	2,7
1800 MHz	48,8	0,1313	6,3	45,2	0,1216	5,4
2 -300 GHz	51	0,1339	7	47,2	0,1239	6

Πίνακας 14 Επίπεδα αναφοράς της Ελληνικής Νομοθεσίας σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων όπως προκύπτουν με το συντελεστή μείωσης 30% και 40% για τα μεγέθη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E), της έντασης του μαγνητικού πεδίου (H) και της ισοδύναμης πυκνότητας ισχύος επίπεδου κύματος (P).

Σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία, τα παραπάνω όρια έκθεσης στην περιοχή συχνοτήτων από 100 kHz έως 10 GHz, αφορούν τον μέσο όρο των τετραγώνων των εντάσεων των πεδίων E² και H² ή της πυκνότητας ισχύος P για κάθε χρονική **περίοδο διάρκειας 6 λεπτών**. Για συχνότητες που υπερβαίνουν τα 10 GHz η αντίστοιχη χρονική περίοδος υπολογίζεται από την έκφραση $68/f^{1.05}$.

9.9.2 Ζώνες συχνοτήτων του SRM 3006 και υπηρεσίες που προβλέπεται να τις χρησιμοποιούν

(MHz)	Υπηρεσία σύμφωνα με τα όσα προβλέπονται στο (ΕΚΚΖΕ)	Παρατηρήσεις
87,5-108	Radio FM	Ραδιοφωνικές εκπομπές στη φασματική περιοχή των FM
108-130	VHF Com	Επικοινωνίες στη φασματική περιοχή VHF
132-272	TV VHF	Τηλεοπτικές εκπομπές στην φασματική περιοχή VHF
370-430	TETRA	Ενδοεπικοινωνίες ιδιωτικών δικτύων και δικτύων σωμάτων ασφαλείας
460-703	TV UHF	Τηλεοπτικές εκπομπές στη φασματική περιοχή UHF
758-768	LTE 700 WIND	Εκπομπές σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας στο σύστημα LTE 700
768-778	LTE 700 VODAFONE	
778-788	LTE 700 COSMOTE	
801-811	LTE800 WIND	Εκπομπές σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας στο σύστημα LTE 800
811-821	LTE800 VODAFONE	
821-925	LTE800 COSMOTE	
925-935	COSMOTE 900	Εκπομπές σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας στο σύστημα GSM / UMTS 900
935-945	WIND 900	
945-960	VODAFONE 900	
1805-1820	WIND 1800	Εκπομπές κινητής τηλεφωνίας στο σύστημα DCS / LTE 1800
1820-1845	VODAFONE 1800	
1845-1880	COSMOTE 1800	
2110-2130	VODAFONE UMTS +NR	Εκπομπές κινητής τηλεφωνίας στο σύστημα UMTS+NR
2130-2150	WIND UMTS+NR	
2150-2170	COSMOTE UMTS+NR	
2170-2400	OTHER Services	Μικροκυματικές ζεύξεις, δορυφορικές επικοινωνίες
2400-2483,5 & 5150 - 5850	WIFI (2,45GHz) WiFi (5,7GHz)	Εκπομπές ασύρματων δικτύων (Wi-Fi)
2620 - 2640	LTE VODAFONE	Εκπομπές σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας στο σύστημα LTE 2600
2640 - 2670	LTE COSMOTE	
2670 - 2690	LTE WIND	
3450-3600	5G COSMOTE	Εκπομπές σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας στο σύστημα 5G / C-BAND
3600-3700	5G VODAFONE	
3700-3800	5G WIND	
3800 - 6000	GENERAL	Μικροκυματικές ζεύξεις, δορυφορικές επικοινωνίες
	BEFORE (1,G2,G3,G4,G5,G6,G7,G8,G9,G10)	Οι υπόλοιπες περιοχές συχνοτήτων από 75MHz - 6000MHZ οι οποίες δεν περιέχονται στις παραπάνω περιοχές

9.9.3 Υπολογισμός Αβεβαιότητας

Ο υπολογισμός της συνολικής ανεπτυγμένης αβεβαιότητας τύπου A και B του Συνολικού Λόγου Έκθεσης $U(\Lambda)$ για κάθε θέση μέτρησης προϋποθέτει:

1. τον υπολογισμό της ανεπτυγμένης αβεβαιότητας τύπου A για το Συνολικό Λόγο Έκθεσης $U_A(\Lambda)$ και
2. τον υπολογισμό της ανεπτυγμένης αβεβαιότητας τύπου B για το Συνολικό Λόγο Έκθεσης $U_B(\Lambda)$.

Ο υπολογισμός της ανεπτυγμένης αβεβαιότητας τύπου A προκύπτει από στατιστικές μεθόδους. Η συνολική ανεπτυγμένη αβεβαιότητα τύπου A και B του συνολικού Λόγου Έκθεσης υπολογίζεται στο άνω και κάτω άκρο σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$+U(\Lambda) = \sqrt{[U_A(\Lambda)]^2 + [+U_B(\Lambda)]^2}$$

$$-U(\Lambda) = \sqrt{[U_A(\Lambda)]^2 + [-U_B(\Lambda)]^2}$$

Οι ανεπτυγμένες αβεβαιότητες (expanded uncertainty) τύπου B του Συνολικού Λόγου Έκθεσης υπολογίζονται σύμφωνα με:

$$+U_B(\Lambda) \leq \sum_f +U_B(\lambda_f) \quad \& \quad -U_B(\Lambda) \geq \sum_f -U_B(\lambda_f)$$

10. Βιβλιογραφία

- [1] [<https://slideplayer.gr/slide/11167086/>]
- [2] <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/5G>
- [3] [<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/what-is-5g.html#~faqs>]
- [4]
<https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/markets/communications/5g-solutions/understanding-massive-mimo-technology/>]
- [5] <https://www.qualcomm.com/>
- [6] [T. E. Bogale and L. B. Le, "Massive MIMO and mmWave for 5G Wireless HetNet: Potential Benefits and Challenges," in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 11, no. 1, pp. 64-75, March 2016, doi: 10.1109/MVT.2015.2496240.]
- [7] [https://www.jstage.jst.go.jp/article/transcom/E99.B/3/E99.B_2015EBI0002/_pdf]
- [8] [<https://www.everythingrf.com/community/what-is-beamforming/>]
- [9]
<https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/markets/communications/5g-solutions/5g-beamforming/>].
- [10] [<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/phased-array-beamforming-ics-simplify-antenna-design.html>]
- [11] <https://spectrum.ieee.org/5g-bytes-full-duplex-explained>
- [12] [<https://www.5gmmwave.com/5g-mmwave/introducing-5g-mmwave/>]
- [13] [<https://www.androidauthority.com/what-is-5g-mmwave-933631/>]
- [14] [<https://www.qualcomm.com/videos/rcr-webinar-deploying-mmwave-unleash-full-potential-5g>]
- [15] [<https://www.konyse.com/articles/advantages-and-disadvantages-of-mmwave-5g/>]
- [16] [Ojaroudi Parchin, Naser & Jahanbakhsh, Haleh & Al-Yasir, Yasir & Abdulkhaleq, Ahmed & Abd-Alhameed, Raed & Excell, Peter. (2020). 60 GHz Multi-Sector Antenna Array with Switchable Radiation-Beams for Small Cell 5G Networks.]
- [17] [<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Small-Cells.html>]
- [18] [<https://www.rfpage.com/applications-5g-technology/>]
- [19] <https://futurenetworks.ieee.org/roadmap/perspectives-on-5g-applications-and-services>

- [20] [<https://www.liberal.gr/autokinito/autonomi-odigisi-mechri-ta-teli-tou-2021-uposchetai-i-tesla/388052>]
- [21] [<https://www.icnirp.org/en/activities/news/news-article/rf-guidelines-2020-published.html>]
- [22] GSMA. (2020, October). EMF exposure guidelines
- [23]
[<http://www.eekt.gr/TechnologyofMobileTelephonyHuman/ScientificOrganizationLimitsMeasurements/tabid/104/language/el-GR/default.aspx>]
- [24]
http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihp/docs/scenihp_o_022.pdf
- [25]
[https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic_Communications/Antennas_EMR/health/Policies/]
- [26] <https://www.narda-sts.com/en/applicationstechnology/5g-measurements/>
- [27] [<https://www.narda-sts.com/en/products/>]
- [28] [<https://5g-tools.com/5g-nr-arfcn-calculator/>]
- [29] [<https://www.signalbooster.com/blogs/news/acronyms-rsrp-rssi-rsrq-sinr>]
- [30] [<https://www.emf-portal.org/en/cms/page/home/technology/radio-frequency/mobile-communication>]