



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**



**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**

## **Διπλωματική εργασία**

**Μελέτη και ανάλυση επίδοσης κυψελωτών  
συστημάτων με χρήση τεχνολογίας φεμτοκυψελών**

**Μιχαηλούδης Γεώργιος**

**Επιβλέπων καθηγητής : Δρ. Μαλαματή Λούτα**

**Κοζάνη, Οκτώβριος 2013**



.....  
Γιώργος Χ. Μιχαηλούδης

Διπλωματούχος Μηχανικός Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών Π.Δ.Μ

Copyright Γιώργος Χ. Μιχαηλούδης, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της κατεύθυνσης Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων της Πολυτεχνικής Σχολής Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κ. Μαλαματή Λούτα, υπεύθυνη καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας, για την ανάθεση αυτής και τη δυνατότητα που μου δόθηκε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς επίσης και για την καταλυτική βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Σε όσους με στήριξαν και με βοήθησαν όλα αυτά τα χρόνια.

Γιώργος Χ. Μιχαηλίδης

Οκτώβριος 2013



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το πρόβλημα της ανάλυσης, σχεδίασης και προσομοίωσης κυψελωτών δικτύων με χρήση τεχνολογιών femtocell και τη μελέτη των παρεμβολών που προκύπτουν από την τεχνολογία αυτή, βασιζόμενοι σε σενάρια τα οποία δημιουργούμε. Αρχικά, παρουσιάζονται τα βασικά δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των φεμτοκυψελών, η αρχιτεκτονική της δομής τους, καθώς επίσης και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν. Επίσης παρουσιάζεται η τεχνική με την οποία αυξάνουν την χωρητικότητα των δικτύων, γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματά αλλά και τα μειονεκτήματά τους, καθώς επίσης και στους περιοριστικούς παράγοντες λειτουργίας τους. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε μελέτη, ανάλυση και σχεδίαση σεναρίων, τεχνολογιών δικτύων σε συνεργασία με τα femtocells και έγινε εξαγωγή διάφορων γραφημάτων και αποτελεσμάτων έτσι ώστε να φανούν και στην πράξη τα οφέλη χρησιμοποίησης φεμτοκυψελών.

**Λέξεις κλειδιά:** Femtocells, κυψέλες, φεμτοκυψέλες Home NodeB, Ιδιωτικός σταθμός βάσης, μακροκυψέλη, παρεμβολή



## Abstract

This thesis examines the problem of analysis, design and simulation of cellular networks using femtocell technology and the study of interference generated by this technology , based on scenarios which create. Initially, key structural and functional features of femtocells , the architecture of the structure , and the protocols they use. This paper presents the technique by which increase network capacity , referring to advantages and disadvantages , as well as the limiting factors operate. While a study , analysis and design scenarios , network technologies in cooperation with femtocells and was exported various graphs and results so they look and act the benefits of using femtocells.

**Keywords:** Femtocells, hives, femtocells Home NodeB, private base station, macro cells, interference





## Περιεχόμενα

### Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή.....	Σελ. 12
1.2 Ιστορία των κυψελοειδών δικτύων.....	Σελ. 12
1.2.1 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας πρώτης γενιάς (1G).....	Σελ. 12
1.2.2 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (2G).....	Σελ. 13
1.2.3 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 2.5 γενιάς.....	Σελ. 15
1.2.4 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς (3G).....	Σελ. 17
1.2.5 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 3.5 γενιάς.....	Σελ. 19
1.2.6 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς (4G).....	Σελ. 20
1.3 Ιστορία των φεμτοκυψελών.....	Σελ. 22
1.4 Εισαγωγή στη φεμτοκυψέλη (femtocell).....	Σελ. 22

### Κεφάλαιο 2 : Αρχιτεκτονική και λειτουργία femtocell

2.1 Εισαγωγή.....	Σελ. 30
2.2 Αρχιτεκτονική των φεμτοκυψελών.....	Σελ. 30
2.2.1 Νέα στοιχεία που εμφανίζονται στο δίκτυο.....	Σελ. 30
2.2.2 Στοίβα πρωτοκόλλων φεμτοκυψέλης.....	Σελ. 33
2.3 Λειτουργία των φεμτοκυψελών.....	Σελ. 34

### Κεφάλαιο 3 : Ανάλυση ενός συστήματος femtocell

3.1 Εισαγωγή.....	Σελ. 37
3.2 Πολιτικές πρόσβασης φεμτοκυψελών και παρεμβολή.....	Σελ. 37
3.3 Τρόποι ανάθεσης φάσματος.....	Σελ. 41



3.4 Διαδικασία διαπομπής.....	Σελ. 42
3.5 Πρότυπα υπολογισμού απώλειας διαδρομής (path loss) σε περιβάλλον φεμτοκυψέλης .....	Σελ. 43
3.5.1 Σύγκριση προτύπων.....	Σελ. 49

#### **Κεφάλαιο 4 : Κατάσταση αγοράς. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα femtocell**

4.1 Εισαγωγή.....	Σελ. 52
4.2 Κατάσταση της τηλεπικοινωνιακής αγοράς.....	Σελ. 52
4.2.1 Πρόσφατες εξελίξεις στην αγορά.....	Σελ. 52
4.2.2 Κοστολόγηση υπηρεσιών femtocell.....	Σελ. 55
4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	Σελ. 57
4.3.1 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί για το χρήστη του femtocell.....	Σελ. 57
4.3.2 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί για τον πάροχο του δικτύου.....	Σελ. 59
4.4 Θέματα υγείας και ασφάλειας.....	Σελ. 61

#### **Κεφάλαιο 5 : Παρεμβολές**

5.1 Εισαγωγή.....	Σελ. 63
5.2 Σενάρια παρεμβολών.....	Σελ. 63
5.2.1 Παρεμβολές μακροκυψέλης προς χρήστη ο οποίος λαμβάνει υπηρεσίες από προσωπικό σταθμό βάσης.....	Σελ. 64
5.2.2 Παρεμβολές οικιακού χρήστη προς σταθμό βάσης μακροκυψέλης.....	Σελ. 70
5.2.3 Παρεμβολές οικιακού σταθμού βάσης προς χρήστη μακροκυψέλης. ....	Σελ 73
5.2.4 Παρεμβολές συσκευής MU προς τον προσωπικό σταθμό βάσης .....	Σελ 82
5.2.5 Παρεμβολές φεμτοκυψέλης προς χρήστη ο οποίος λαμβάνει υπηρεσίες από γειτονικό οικιακό σταθμό βάσης.....	Σελ. 87

5.2.6 Παρεμβολές κινητού τερματικού προς γειτονικό οικιακό σταθμό βάσης.....	Σελ. 90
5.2.7 Βελτίωση σεναρίου 3.1.....	Σελ. 93
5.2.8 Βελτίωση σεναρίου 3.4.....	Σελ. 100
<b>Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα.....</b>	<b>Σελ. 104</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>Σελ. 106</b>



Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

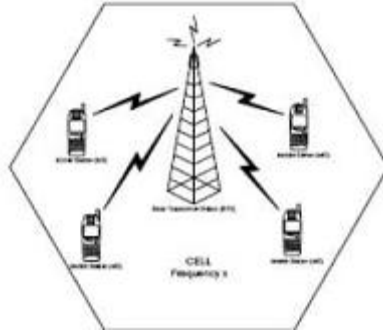
## **1.1 Εισαγωγή**

Στο πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο, πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή στα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, αρκετά από τα οποία, μπορούν να συνεργαστούν με ιδιωτικούς σταθμούς βάσης (femtocell). Κατόπιν, παρουσιάζονται τα είδη των κυψελών που υπάρχουν στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και αναλύεται η έννοια της φεμτοκυψέλης, η οποία αποτελεί την θεμελιώδη έννοια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## **1.2 Ιστορία των κυψελωτών δικτύων**

### **1.2.1 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας πρώτης γενιάς (1G)**

Τα πρώτα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών σχεδιάστηκαν και ξεκίνησε η εφαρμογή τους, στα τέλη της δεκαετίας του 70 στις Η.Π.Α και Ιαπωνία και στις αρχές της δεκαετίας του 80 στην Ευρώπη. Τα αποκάλεσαν ασύρματα δίκτυα 1ης γενιάς ή αλλιώς αναλογικά. Παρόλο που οι δυνατότητες τους ήταν περιορισμένες, η εμφάνισή τους την εποχή εκείνη θεωρήθηκε ως ένα τεράστιο τεχνολογικό επίτευγμα. Το Advanced Mobile Phone Service (AMPS), ήταν το πρώτο σύστημα στις κινητές τηλεπικοινωνίες που έκανε την εμφάνισή του, το 1978 σε μερικές πολιτείες των Η.Π.Α και εφαρμόστηκε συνολικά το 1983. Στην συνέχεια, η ιδέα της κινητής τηλεφωνίας διαδόθηκε στις υπόλοιπες ηπείρους. Μια από τις μεγαλύτερες εξελίξεις στο τομέα των κινητών τηλεπικοινωνιών ήταν η έννοια της κυψέλης. Ο λόγος για τον οποίο τα συστήματα αυτά ονομάζονται κυψελωτά, είναι γιατί ακόμα και σήμερα στηρίζουν την λειτουργία τους στις κυψέλες, το σχήμα των οποίων, αντιπροσωπεύει κατά μια έννοια τα γεωγραφικά όρια μέσα στα οποία μπορούν να εξυπηρετούνται οι κινητοί χρήστες. Σε κάθε κυψέλη υπάρχει ένας σταθμός βάσης ο οποίος αναλαμβάνει την υλοποίηση και τη δρομολόγηση των κλήσεων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Η ακτίνα της κυψέλης εξαρτάται από τη γεωγραφική τοπολογία της περιοχής που εξυπηρετείται από το σύστημα, καθώς επίσης και από την πυκνότητα του πληθυσμού των χρηστών. Μπορεί να είναι από λιγότερο από ένα χιλιόμετρο (km), σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και έως 30 χιλιόμετρα σε επαρχιακές αραιοκατοικημένες περιοχές.



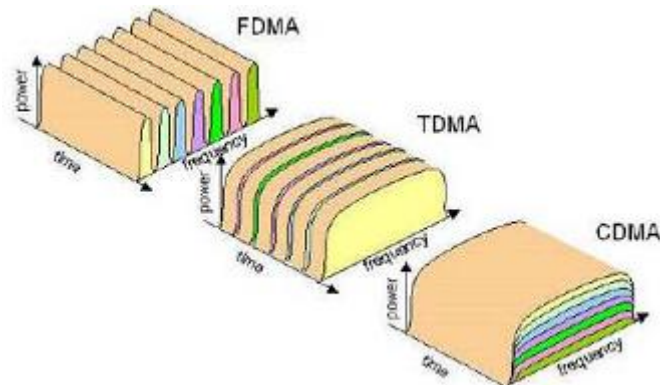
Εικόνα 1: Κυψέλη με τον αντίστοιχο Σταθμό Βάσης που εξυπηρετεί πολλούς χρήστες

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων 1ης γενιάς, είναι ότι τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης εξέπεμπαν και λάμβαναν αντίστοιχα, με χρήση της ίδιας συχνότητας. Επίσης, όταν ο χρήστης επικοινωνούσε εν κινήσει και περνούσε τα όρια της κυψέλης, τότε η κλήση τερματιζόταν, αφού δεν υπήρχε δυνατότητα να διατηρηθεί η κλήση κατά τη διάρκεια μετάβασης σε μια άλλη κυψέλη (handover). Το γεγονός αυτό, περιόριζε σημαντικά τις δυνατότητες της κινητής επικοινωνίας καθώς περιόριζε την κινητικότητα του χρήστη. Ένα άλλο πρόβλημα ήταν η χαμηλή απόδοση των συστημάτων αυτών από άποψη χωρητικότητας, καθώς ήταν πολύ μικρός ο αριθμός των χρηστών που μπορούσαν να μιλήσουν ταυτόχρονα. Γενικά, τα πρώτα συστήματα, δεν άφηναν περιθώρια για βελτιώσεις και για την εφαρμογή τεχνικών όπως συμπίεση και κωδικοποίηση της πληροφορίας, καθώς αυτό θα είχε σαν προϋπόθεση την χρήση ψηφιακού σήματος. Τέλος, τα τερματικά, δηλαδή οι συσκευές που χρησιμοποιούσαν οι χρήστες, ήταν ογκώδεις με μεγάλες κεραίες και υψηλού, για την εποχή εκείνη, κόστους.

### 1.2.2 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (2G)

Πλέον τα δίκτυα 1ης γενιάς ανήκουν στο παρελθόν, κάτι όμως που δεν συμβαίνει μετά δίκτυα 2ης γενιάς, τα οποία λειτουργούν ακόμα, για τον λόγο ότι αποτέλεσαν την βάση για την εξέλιξη στα σημερινά δίκτυα τρίτης και τέταρτης γενιάς. Σε αντίθεση με τα πρώτα δίκτυα που μετέδιδαν αναλογικό σήμα και ο διαχωρισμός μεταξύ των χρηστών για ταυτόχρονη πρόσβαση στο ασύρματο μέσο γινόταν με την Frequency Division Multiple Access (FDMA) τεχνική, τα δίκτυα 2<sup>ης</sup> γενιάς χρησιμοποιούσαν τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης του σήματος, ενώ οι χρήστες διαχωρίζονταν με Time Division Multiple Access (TDMA) ή Code Division Multiple

Access (CDMA). Οι διαφορές μεταξύ των τριών τεχνικών πρόσβασης φαίνονται στην Εικόνα 2.

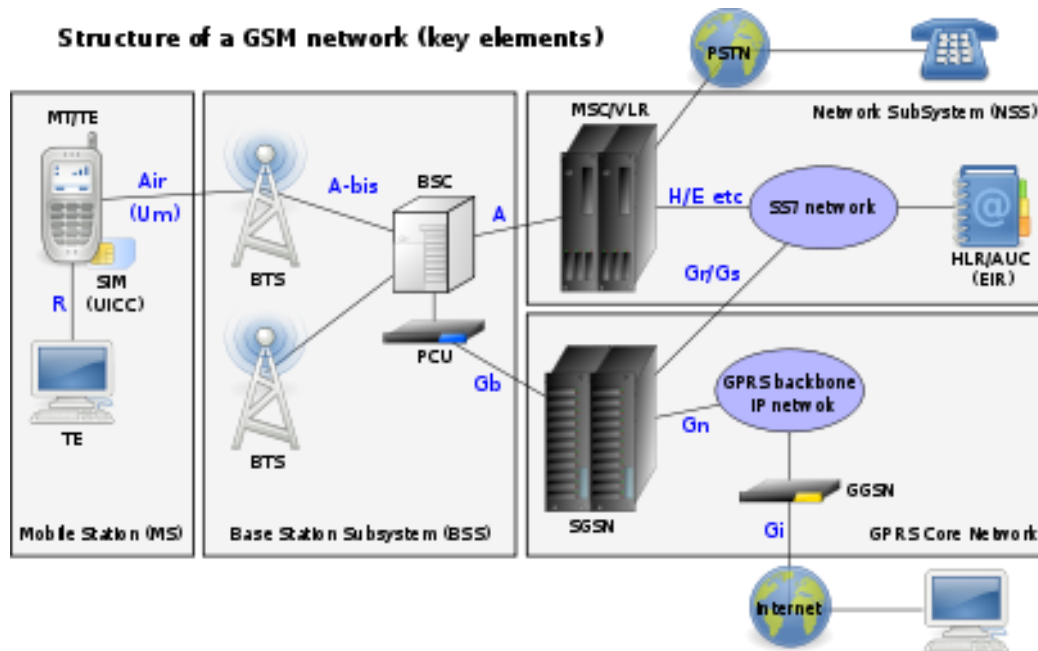


Εικόνα 2: Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης

Τα πιο γνωστά συστήματα 2ης γενιάς είναι:

- Global System for Mobile communication (GSM) το οποίο χρησιμοποιεί την TDMA τεχνική και υποστηρίζει 8 χρόνο-σχισμές (time-slots) με εύρος ζώνης 200 KHz η κάθε μια.
- Interim Standard 54 (IS-54) και το Interim Standard 136 (IS-136) γνωστό και ως North American Digital Cellular (NADC) ή US Digital Cellular (USDC), που χρησιμοποιεί την TDMA ως τεχνική πρόσβασης.
- Pacific Digital Cellular (PDC) ένα Ιαπωνικό σύστημα που είχε αρκετές ομοιότητες με το IS-136
- Interim Standard 95 Code Division Multiple Access (IS-95) επίσης γνωστό ως CDMA One το οποίο χρησιμοποιεί την CDMA τεχνική πρόσβασης.

Στην Ευρώπη, η ανάγκη για τη δημιουργία ενός ενιαίου συστήματος που θα εξυπηρετούσε όλους τους Ευρωπαίους πολίτες ανεξαρτήτως χώρας, οδήγησε στη δημιουργία του GSM υπό την επίβλεψη του European Technical Standards Institute (ETSI). Το σύστημα αυτό ήταν το πιο ευρέως διαδεδομένο, μετρώντας 350 εκατομμύρια χρήστες σε 140 χώρες και 400 δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών. Το GSM ξεκίνησε να λειτουργεί στην ζώνη των 800-900 MHz ενώ σε κάποιες άλλες χώρες που το υιοθέτησαν, λειτουργεί στα 1.8 (DCS 1800) και 2GHz. Στην Εικόνα 3 φαίνεται η δομή του GSM δικτύου.



Εικόνα 3: Δομή δικτύου 2<sup>ης</sup> γενιάς

Τέλος, μερικές από τις υπηρεσίες οι οποίες έκαναν την εμφάνιση τους μαζί με τα δίκτυα 2ης γενιάς, ήταν η δυνατότητα για περιορισμένη πρόσβαση στο Internet και η αποστολή σύντομων γραπτών μηνυμάτων μεταξύ των χρηστών, γνωστά και ως Short Messaging Service (SMS).

### 1.2.3 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 2.5 γενιάς

Με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης, η διεθνής επιστημονική κοινότητα, οδηγήθηκε στον επανασχεδιασμό των προτύπων 2ης γενιάς, έτσι ώστε αυτά να μπορούν να υποστηρίξουν διάφορες εφαρμογές στο χώρο του Internet. Έτσι λοιπόν προέκυψε ένα νέο σύνολο προτύπων που ονομάστηκε γενιά 2.5G. Τα πρότυπα αυτά επέτρεπαν στον υπάρχοντα εξοπλισμό 2ης γενιάς, να τροποποιηθεί έτσι ώστε να μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες όπως πλοήγηση στο Internet, η αποστολή και λήψη e-mail κ.α. Στα πλαίσια της αναβάθμισης των συστημάτων προέκυψαν ένα νέο πρωτόκολλο και τέσσερα νέα συστήματα που αντιπροσώπευαν τη γενιά 2.5. Αυτά είναι τα εξής:

- Wireless Applications Protocol (WAP)

- High Speed Circuit Switched Data (HSCSD)
- General Packet Radio Service (GPRS)
- Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)
- Interim Standard 95B (IS-95B)

Το πρωτόκολλο Wireless Applications Protocol (WAP) ουσιαστικά, είναι το πρωτόκολλο που επιτρέπει στις κινητές συσκευές να μπορούν να απεικονίζουν ιστοσελίδες και να χειρίζονται xml δεδομένα, urls κ.α.

Το GPRS πρότυπο, βασίζεται στη λειτουργία της μεταγωγής πακέτου (packet switched), γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για υπηρεσίες όπως e-mail, fax και asymmetric web browsing όπου ο χρήστης κατεβάζει από το Internet πολύ περισσότερα δεδομένα από ότι ανεβάζει. Οι εφαρμογές του GPRS περιλαμβάνουν από απλό «σερφάρισμα» στο Internet, μέχρι μετάδοση φωνής και video. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα πεδία εφαρμογής του GPRS.

<i>Εφαρμογή</i>	<i>Παράδειγμα εφαρμογής</i>
WWW	Ανάκτηση σελίδων
FTP	Μεταφορά αρχείων
E-mail	Αποστολή μηνυμάτων
Telnet	Πρόσβαση σε απομακρυσμένο τερματικό
Video	Τηλεσυνδιάσκεψη
Εφαρμογές RTTI (Real Time Traffic Information)	Διοίκηση στόλου, καθοδήγηση πορείας
Εφαρμογές τηλεματικής	Μεταφορά χρημάτων

**Πίνακας 1: Πιθανές εφαρμογές GPRS**



Τα κύρια πλεονεκτήματα του, είναι ότι δεσμεύει τους πόρους του δικτύου μόνο όταν υπάρχουν δεδομένα που πρέπει να μεταδοθούν και ότι δεν εξαρτάται τόσο πολύ, από τα μέρη εκείνα των δικτύων που λειτουργούν με μεταγωγή κυκλώματος. Έτσι, ενώ ο χρήστης νομίζει ότι είναι συνεχώς συνδεδεμένος στο Internet, στην πραγματικότητα, μόνο όταν απαιτούνται νέα δεδομένα, η κινητή μονάδα θα ζητήσει επιπλέον πόρους από το δίκτυο. Αν και αρχικά το GPRS σχεδιάστηκε ως μια βελτίωση του συστήματος GSM, επεκτάθηκε ώστε να λειτουργήσει μαζί και με το IS-136 πρότυπο.

Το πρότυπο EDGE, θεωρείται ως μια αρκετά προηγμένη βελτιστοποίηση του προτύπου GSM και αυτό γιατί απαιτεί την αναβάθμιση τόσο στο λογισμικό αλλά και στο hardware. Το EDGE θεωρείται ως ένα πρότυπο που προέκυψε από την κοινή επιθυμία, των υπεύθυνων για τα δίκτυα GSM και IS-136, για μια από κοινού τεχνολογική εξέλιξη που θα τους οδηγούσε σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων 3ης γενιάς. Το EDGE εισάγει μια καινούργια ψηφιακή διαμόρφωση με το όνομα 8-PSK η οποία προσφέρει ρυθμό μετάδοσης μέχρι και 547,2 Kbps όταν χρησιμοποιείται χωρίς διόρθωση λαθών και όταν και οι οκτώ χρονοθυρίδες είναι δεσμευμένες από ένα μόνο χρήστη.

Τέλος, το πρότυπο IS-95B, αποτελεί την μετεξέλιξη του IS-95A που προτάθηκε αρχικά το 1995 και παρέχει μεταγωγή πακέτου αλλά και κυκλώματος, μέσω CDMA καναλιών. Με την ταυτόχρονη κατάληψη και των 8 διαφορετικών καναλιών, μπορούν να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης  $8 \times 14,4 = 115,2$  Kbps.

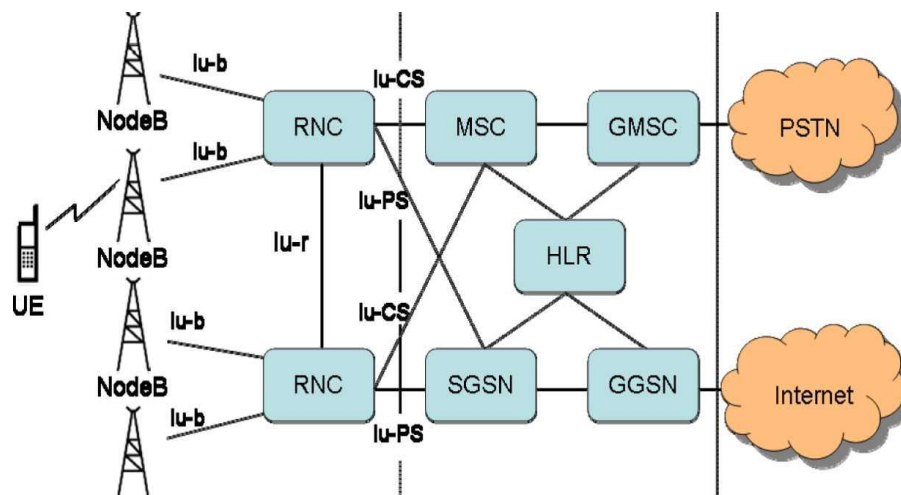
#### **1.2.4 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς (3G)**

Ο ερχομός των δικτύων 3<sup>ης</sup> γενιάς, άνοιξε το δρόμο για την εμφάνιση ακόμα περισσότερων υπηρεσιών, που μέχρι τη στιγμή εκείνη, κανένα από τα προηγούμενα πρότυπα δε μπορούσε να προσφέρει. Με ταχύτητες επιπέδου Megabit, κάποιος που έχει πρόσβαση σε ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να πλοηγηθεί στο Internet, να επικοινωνήσει χρησιμοποιώντας την υπηρεσία Voice over Internet Protocol (VoIP), να κατεβάσει μουσικά κομμάτια και να χρησιμοποιήσει διάφορες άλλες υπηρεσίες με τη βοήθεια το κινητού του τηλεφώνου. Βασικός στόχος της ανάπτυξης των κινητών δικτύων 3<sup>ης</sup> γενιάς είναι η παροχή υπηρεσιών σε οποιοδήποτε μέρος, οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι ένας χρήστης των δικτύων αυτών, θα έχει τη δυνατότητα να μετακινείται οπουδήποτε και να εξυπηρετείται, ακόμα και σε γεωγραφικές περιοχές όπου η κάλυψη που παρέχεται, δεν είναι από δίκτυο της 3ης γενιάς. Οι υπηρεσίες που προσφέρονται επεκτείνονται σε υπηρεσίες Internet και σε

υπηρεσίες που συνδυάζουν εικόνα και ήχο (multimedia) με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Το 1996 ο ETSI, δημοσίευσε την ιδέα του Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS) ως μια αναβάθμιση του συστήματος GSM. Μερικά χρόνια αργότερα συνενώθηκε με παρόμοιες προτάσεις για το CDMA, υπό το όνομα WCDMA. Είναι προς τα πίσω συμβατό με τα 2G συστήματα GSM, IS-136 και PDC καθώς και με τα 2.5G συστήματα GPRS και EDGE. Χρησιμοποιεί την τεχνική spread spectrum και απαιτεί ένα ελάχιστο εύρος ζώνης των 5 MHz. Οι ρυθμοί μετάδοσης μπορεί να φθάσουν και να ξεπεράσουν τα 16 Mbit/sec/user. Για την εφαρμογή του βέβαια απαιτούνται αλλαγές τόσο στο υλικό όσο και στο λογισμικό των υπαρχόντων συστημάτων.

Η αρχιτεκτονική του UMTS, η οποία είναι η επέκταση του General Packed Radio Service (GPRS), προσφέρει καλύτερο έλεγχο στην ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας, τόσο από τη μεριά του UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN), όσο και από τη μεριά του δικτύου κορμού. Η εγγραφή και πιστοποίηση του χρήστη γίνεται μέσω του Serving GPRS Support Node (SGSN), χρησιμοποιώντας τα υπάρχοντα σχήματα του GSM, ώστε να επαληθεύσει την ταυτότητα ενός χρήστη ενώ και η HLR είναι αναβαθμισμένη για να υποστηρίξει IP υπηρεσίες. Εν γένει, η λύση της 3GPP μπορεί να χαρακτηριστεί περισσότερο σαν IP-over-GPRS, με την προσθήκη αναβαθμισμένου συστήματος ραδιοεπαφής (του UTRAN) ώστε να προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες. Το CDMA 2000 είναι προς τα πίσω συμβατό με τα συστήματα IS-95 / IS-95A / IS-95B. Έχει θεωρηθεί ως μια πιθανή λύση στην κατεύθυνση του 3G και βασίζεται στην χρήση εύρους 1.25 MHz καναλιού ανά χρήστη.



Εικόνα 4: Αρχιτεκτονική δικτύου 3<sup>ης</sup> γενιάς

Η China Academy of Communications Technology (CATT), μαζί με το Siemens Information and Communication Mobile Group (ICMobile), υλοποίησαν το Time Division Synchronous Code Division Multiple Access (TD-SCDMA) πρωτόκολλο ως μια εναλλακτική 3G τεχνολογία. Χρησιμοποιεί τις TDMA/TDD και CDMA τεχνικές για μεταφορά δεδομένων υψηλού ρυθμού πάνω από GSM δίκτυα έως 384Kbps. Διαθέτει ραδιοκάναλι των 1.6MHz και 5 msec frame που διαιρείται σε 7 χρονοθυρίδες. Το 2003 παρουσιάστηκε η πρώτη συσκευή που το χρησιμοποιεί. Δύο βασικοί οργανισμοί που πλέον είναι υπεύθυνοι για την εξέλιξη των προτύπων 3G:

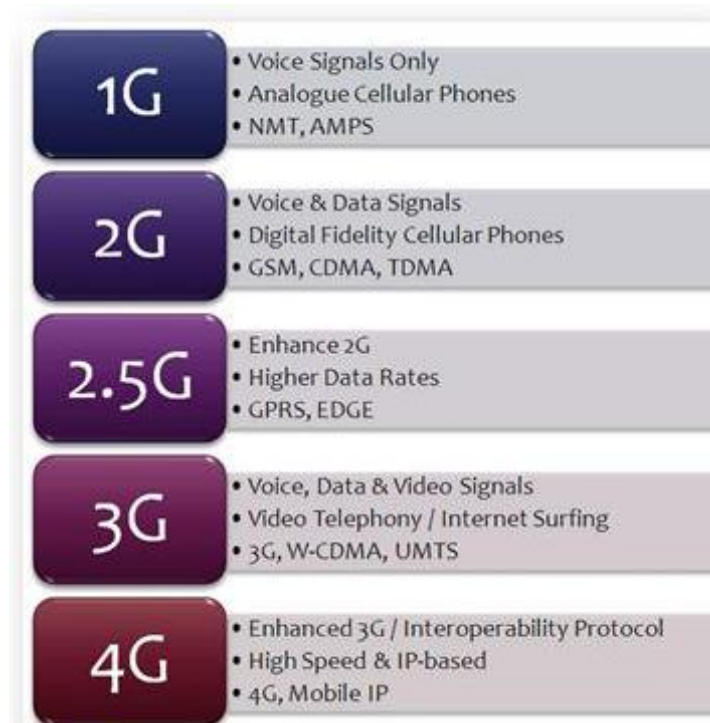
- Το 3G Project Partnership (3GPP) που επεξεργάζεται το WCDMA πρότυπο.
- Το 3G Project Partnership 2 (3GPP2) που επεξεργάζεται το CDMA2000 πρότυπο.

### **1.2.5 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 3.5 γενιάς**

Η γενιά 3.5, περιλαμβάνει τα δίκτυα εκείνα όπου, εκτός από την τεχνολογία WCDMA, έχουν ενσωματώσει και την τεχνολογία High Speed Downlink Packet Access (HSDPA). Το πρότυπο αυτό, αφορά την μετάδοση πακέτων από το σταθμό βάσης προς το χρήστη (downlink) με ρυθμό 5 φορές μεγαλύτερο του UMTS και 15 φορές μεγαλύτερο του GPRS. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι από τα 2 Mbps που μπορεί να προσφέρει το UMTS ο ρυθμός μπορεί να φτάσει θεωρητικά μέχρι και τα 14.4 Mbps. Το HSDPA θεωρείται ως μια εξέλιξη του UMTS προτύπου, παρέχοντας στους χρήστες υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Παρόλο που κάποια μέρη του προτύπου αυτού θεωρούνται απλά στο να υλοποιηθούν με το υπάρχον υλικό το HSDPA σαν γενικότερη έννοια απαιτεί επανασχεδιασμό στην αρχιτεκτονική του δικτύου και αναβάθμιση στο υλικό, όπως αυτό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στους σταθμούς βάσης. Οι τελευταίοι, θα πρέπει να είναι ικανοί όχι μόνο να λειτουργούν αποδοτικά με τέτοιους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αλλά και να υποστηρίζουν τη λειτουργία περισσότερο πολύπλοκων πρωτοκόλλων. Η λειτουργία του HSDPA στηρίζεται στο γεγονός ότι αντί να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά Dedicated Channel (DCH) κανάλια για την αποστολή δεδομένων, θα χρησιμοποιείται ένα Downlink Shared Channel (DSCH) κανάλι το οποίο θα μοιράζονται μεταξύ τους οι χρήστες για την μεταφορά των πακέτων. Το κανάλι αυτό έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης (bandwidth) και για το λόγο αυτό καλείται high-speed DSCH(HS-DSCH).

### 1.2.6 Δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G)

Η σημερινή εξέλιξη στις επικοινωνίες δικτύων κινητών επικοινωνιών είναι κάτι που δύσκολα θα φανταζόμασταν κάποια χρόνια πριν. Σήμερα η διείσδυση της κινητής τηλεφωνίας καταγράφει ποσοστά που σε πολλές χώρες ξεπερνούν το 50 % φθάνοντας ή ακόμη και ξεπερνώντας τα αντίστοιχα ποσοστά της παραδοσιακής σταθερής τηλεφωνίας στον πληθυσμό. Ακόμη πιο ενδιαφέρουσα είναι όμως η παρατήρηση ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μιλάμε για δίκτυα δεύτερης γενιάς, δηλαδή για δίκτυα που επικεντρώνονται στην μετάδοση φωνής και μικρού μήκους μηνυμάτων. Οι υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς οι οποίες στηρίχθηκαν στο πρότυπο GSM, παρείχαν στον χρήστη αμφίδρομη φωνητική επικοινωνία ισοδύναμου εύρους ζώνης ψηφιακών δεδομένων περίπου 4-40 kbps. Λίγο πριν τη μετάβαση στην επόμενη γενιά κινητής επικοινωνίας (3G), οι επικοινωνίες πέρασαν από το στάδιο της μετάδοσης ψηφιακών δεδομένων σε σχετικά υψηλότερες ταχύτητες με υπηρεσίες όπως GPRS, EDGE, και HSCSD.



Εικόνα 5: Εξέλιξη προτύπων κινητής τηλεφωνίας

Η παραπάνω γενιά είναι γνωστή ως 2.5 G και ουσιαστικά αποτέλεσε το μεταβατικό στάδιο μεταξύ της δεύτερης και τρίτης γενιάς κινητών επικοινωνιών. Η γενιά αυτή

προέβλεπε εύρος ζώνης ανά χρήστη από 56 Kbps έως 384 Kbps. Στις μέρες μας βρίσκει εφαρμογή η τρίτη γενιά κινητών επικοινωνιών (3G). Στα δίκτυα 3G προβλέπεται εύρος ζώνης ανά χρήστη από 384 Kbps έως 2 Mbps και δυνατότητα μετάδοσης πολυμεσικής πληροφορίας, δηλαδή κινούμενης εικόνας σε συνδυασμό με πολυκάναλο ήχο.

Πλέον στις μέρες μας, σε πειραματικό συνήθως στάδιο, αρχίζουν να βρίσκουν εφαρμογή σε χώρες του εξωτερικού πρότυπα τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των δικτύων τέταρτης γενιάς. Τα δύο πιο δημοφιλή πρότυπα είναι το WiMAX και το LTE. Το WiMAX είναι σχετικά νέο πρότυπο, το οποίο χρησιμοποιεί OFDM (Ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας) για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση φάσματος και να χειριστεί τις καταστάσεις πολλαπλών διαδρομών αποτελεσματικά. Το σύστημα προσφέρει internet και υπηρεσίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Όπως και άλλα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, απαιτεί αδειοδοτημένο φάσμα και πλήθος σταθμών βάσης για να καλύψει μεγάλες περιοχές. Το WiMAX, λειτουργεί στην Ευρώπη στις συχνότητες των 3.5 GHz, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της ακτινοβολίας που εισέρχεται στα κτήρια. Οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών στις ΗΠΑ οι οποίοι έχουν κερδίσει τις άδειες φάσματος σε δημοπρασία, επιτρέπεται να χρησιμοποιούν το WiMAX σε συχνότητες 700 και 1900 MHz.

Το LTE αποτελεί πρότυπο για την ασύρματη επικοινωνία και εξέλιξη του GSM/UMTS. Ο στόχος του LTE είναι να αυξήσει τη χωρητικότητα και τη ταχύτητα των υφιστάμενων δικτύων με τη χρησιμοποίηση καινοτόμων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας και διαμόρφωσης σήματος. Λειτουργεί σε διαφορετικό εύρος ζώνης συχνοτήτων καθώς η διεπαφή του δεν είναι συμβατή με τα υφιστάμενα δίκτυα 2ης και 3ης γενιάς.

Το LTE προτάθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία το 2004. Το πρότυπο οριστικοποιήθηκε το 2008 και τα πρώτα δίκτυα στο κόσμο που εγκαταστάθηκαν για δημόσια χρήση, ήταν στο Όσλο και τη Στοκχόλμη από την εταιρεία TeliaSonera, τον Δεκέμβριο του 2009.

Τα πρώτα εμπορικά διαθέσιμα LTE smartphone που κυκλοφόρησαν ήταν τα Samsung Galaxy Indulge (από τη MetroPCS) και HTC Thunderbolt για την αγορά της Β. Αμερικής. Αρχικώς, οι διαχειριστές των δικτύων CDMA είχαν σχεδιάσει να αναβαθμίσουν τα συστήματά τους σε μια ανταγωνιστική τεχνολογία ονόματι UMB, ωστόσο όλες οι μεγάλες εταιρείες κινητής τηλεφωνίας αποφάσισαν να συνεχίσουν με το LTE. Η εξέλιξη του LTE είναι το LTE Advanced, το οποίο προτυποποιήθηκε το Μάρτιο του 2011. Οι αναβαθμισμένες υπηρεσίες του LTE Advanced αναμένεται να διατεθούν το 2013.

Το πρότυπο του LTE είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων στη καθοδική ζεύξη (downlink) της τάξης των 300 Mbps και στην ανοδική

(uplink) μέχρι και 75 Mbps. Το εύρος ζώνης του φέροντος σήματος είναι μεταβλητό, κυμαινόμενο από τα 1.4 έως τα 20 MHz και υποστηρίζονται τόσο η διπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDD) όσο και η διπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDD). Η αρχιτεκτονική του δικτύου βασίζεται σε μια απλοποιημένη μορφή αρχιτεκτονικής IP, το Evolved Packet Core (EPC), το οποίο σχεδιάστηκε για να αντικαταστήσει το GPRS Core Network και υποστηρίζει την απρόσκοπτη μετάδοση τόσο δεδομένων όσο και φωνής ακόμα και σε δίκτυα με παλαιότερη τεχνολογία δικτύου (GSM, UMTS, CDMA2000). Η απλούστερη αρχιτεκτονική αποσκοπεί σε χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα.

### **1.3 Ιστορία των femτοκυψελών**

Το πρώτο ενδιαφέρον για τα femtocells άρχισε περίπου το 2002, όταν μια ομάδα μηχανικών της Motorola ερευνούσε νέες μεθόδους που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην κινητή επικοινωνία. Η ιδέα ήταν, παράλληλα με την ανάπτυξη ολόκληρου του δικτύου, να τοποθετείται και ένας αρκετά μικρός σταθμός βάσης UMTS σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα χρηστών. Η ιδέα αυτή κέρδισε οπαδούς και το 2004 αρκετές επιχειρήσεις ασχολήθηκαν με τη βελτίωση του παραπάνω σχεδίου. Το 2007 ιδρύθηκε το femtoforum ([www.femtoforum.org](http://www.femtoforum.org)) το οποίο έχει σαν στόχο, την προώθηση και υιοθέτηση των femτοκυψελών σε ευρεία κλίμακα. Καθώς οι επιχειρήσεις επέκτειναν την τεχνολογία των femtocells, το femtoforum αποτέλεσε ρυθμιστή και συντονιστικό παράγοντα στην εξασφάλιση κοινών προτύπων. Στις μέρες μας, αρκετές εταιρίες του εξωτερικού, που δραστηριοποιούνται στον χώρο των κινητών τηλεπικοινωνιών, προσφέρουν υπηρεσίες femtocell εδώ και αρκετό καιρό, ενώ αντιθέτως στην Ελλάδα τώρα άρχισαν λιγότερες εταιρίες (Vodafone και Cosmote) να παρέχουν τέτοιου είδους υπηρεσίες.

### **1.4 Εισαγωγή στην femτοκυψέλη (HNB)**

Η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη παροχής υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και η υψηλής ποιότητας υπηρεσία (QoS) στο εσωτερικό των κτηρίων, σε συνδυασμό με τη περιορισμένη ρυθμαπόδοση και ακριβή λύση εξυπηρέτησης που παρέχεται από την μακροκυψέλη στους χρήστες ενός κυψελωτού συστήματος, καθιστούν την απαίτηση για νέες εναλλακτικές λύσεις όλο και πιο επιτακτική. Ταυτόχρονα η ραδιοκάλυψη είναι

ένα σημαντικό ζήτημα προς επίλυση στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Είναι ένα πρόβλημα που παραδοσιακά εμφανίζεται στις αγροτικές περιοχές λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ των σταθμών βάσης και των κινητών τερματικών, καθώς επίσης και στις εσωτερικές αλλά και υπόγειες περιοχές λόγω της εξασθένησης από τα τοιχώματα των κτηρίων. Ακόμη, οι μελλοντικοί χρήστες θα απαιτούν μεταφορά δεδομένων με ρυθμούς 100 Mbps και ευρυζωνικές εφαρμογές, όπως αναζήτηση στον παγκόσμιο ιστό, video streaming, τηλεοπτικές κλήσεις κ.α. Ταυτόχρονα εκτιμάται ότι τα 2/3 των κλήσεων και το 90% της μεταφοράς δεδομένων πραγματοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους όπου δυστυχώς η ραδιοκάλυψη είναι ανεπαρκής.

Οι πάροχοι, αναζητούν συνεχώς νέες λύσεις να βελτιώσουν και να βελτιστοποιήσουν τους περιορισμένους πόρους και κατ' επέκταση τις ανάγκες των χρηστών. Ως λύση, υιοθετήθηκε η επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων καθώς επίσης και η μείωση του μεγέθους των κυψελών, (microcells και nanocells) τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως στις αστικές περιοχές. Τα microcells και nanocells χρησιμοποιούνται επίσης για να βελτιώσουν την ραδιοκάλυψη μέσα στα κτήρια και τους υπόγειους χώρους αυτών. Οι παραπάνω λύσεις, ναι μεν, είναι αποτελεσματικές αλλά ταυτόχρονα είναι και αρκετά ακριβές. Το κόστος, είναι ίσως ο κυριότερος παράγοντας που οδήγησε στην αναζήτηση και δημιουργία νέων λύσεων.

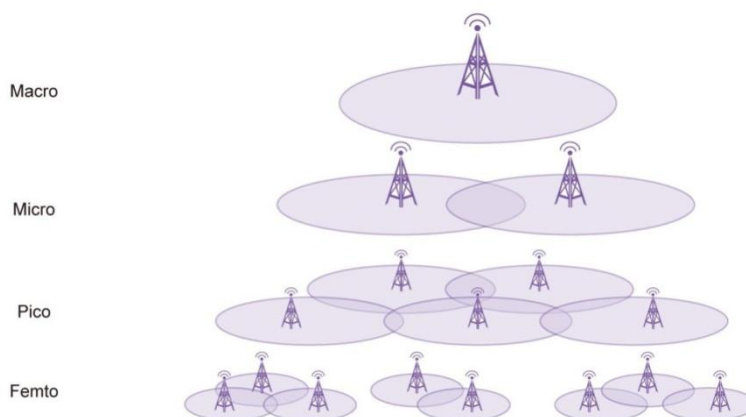
Νέα λύση αποτελεί η χρήση σημείων πρόσβασης femtocells (HNB) ή αλλιώς οικιακών σταθμών βάσης, τα οποία έχουν σαν στόχο την αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων και την ταυτόχρονη βελτίωση ραδιοκάλυψης των εσωτερικών χώρων. Η τεχνολογία των φεμτοκυψελών έχει αναπτυχθεί πάρα πολύ τα τελευταία χρόνια, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο, για μια πληθώρα υπαρχόντων τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (π.χ. WiMAX, LTE, CDMA, OFDMA κτλ.). Μπορούμε να ισχυριστούμε ότι οι φεμτοκυψέλες αποτελούν τεχνολογία αιχμής, καθώς προσφέρουν τη βάση σύγκλισης των τεχνολογιών σταθερών και κινητών επικοινωνιών.

Πριν γίνει εκτενείς αναφορά στην φεμτοκυψέλη (femtocell), καλό θα ήταν να οριστούν οι συναφείς έννοιες μακροκυψέλη (macrocell), μικροκυψέλη (microcell) και πικοκυψέλη (picocell).

Μια **μακροκυψέλη** παρέχει την μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Οι κεραιές των μακροκυψελών συνήθως αναρτώνται σε ιστούς μεγάλου ύψους ή άλλες κατασκευές, οι οποίες στηρίζονται στο έδαφος ή σε στέγες κτηρίων. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το ύψος αλλά και η τοποθεσία τοποθέτησης των κεραιών και γίνεται με τρόπο τέτοιο, ώστε το έδαφος ή τα κτίρια να μην επηρεάζουν και εμποδίζουν την σωστή λειτουργία και παροχή ραδιοκάλυψης της κεραιάς. Οι μακροκυψέλες παρέχουν ραδιοκάλυψη σε κυμαινόμενες αποστάσεις, που εξαρτώνται

από τη χρησιμοποιούμενη συχνότητα, τον αριθμό των κλήσεων που πραγματοποιούνται καθώς επίσης και από το έδαφος. Η τυπική ισχύς εξόδου ενός σταθμού βάσης μακροκυψέλης είναι συνήθως 10 W ή και περισσότερο. Συμπερασματικά, οι μακροκυψέλες χρησιμοποιούνται για την κάλυψη μιας ευρύτερης περιοχής, όπου λιγότερες τερματικές συσκευές έχουν πρόσβαση στο δίκτυο.

Μια **μικροκυψέλη** παρέχει πρόσθετη κάλυψη και χωρητικότητα σε περιοχές όπου υπάρχει αυξημένος αριθμός χρηστών, όπως αστικές και προαστιακές περιοχές. Οι κεραιές των μικροκυψελών τοποθετούνται στο επίπεδο του δρόμου και ως συνήθως κάτω από το μπαλκόνι του πρώτου ορόφου ενός κτηρίου, σε στύλους φωτισμού κτλ. Οι κεραιές των μικροκυψελών είναι μικρότερες από τις κεραιές των μακροκυψελών και καθώς τοποθετούνται σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, είναι δυνατό να μεταμφιεστούν σε χαρακτηριστικά του κτηρίου. Οι μικροκυψέλες καλύπτουν μια περιορισμένη περιοχή, όπως ένα εμπορικό κέντρο, ένα ξενοδοχείο κτλ, καθώς ο σταθμός βάσης έχει χαμηλή ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, οι μικροκυψέλες παρέχουν ραδιοκάλυψη σε αποστάσεις μεταξύ 300 και 1000 μέτρων και απαιτούν χαμηλότερη ισχύ εξόδου από τον πομπό, σε σύγκριση με τις μακροκυψέλες, της τάξης των μερικών W. Μια μικροκυψέλη χρησιμοποιεί τον έλεγχο της ισχύος ως μέσο της περιοχής που καλύπτει, διευκολύνοντας την αποφυγή παρεμβολών με γειτονικές κυψελίδες που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες. Συμπερασματικά οι μικροκυψέλες χρησιμοποιούνται σε περιοχές με αυξημένη πυκνότητα χρηστών, όπως σε μεγάλα αστικά κέντρα, καλύπτοντας μικρές περιοχές και προσφέροντας ικανή χωρητικότητα για όλες τις τερματικές συσκευές της περιοχής αυτής.

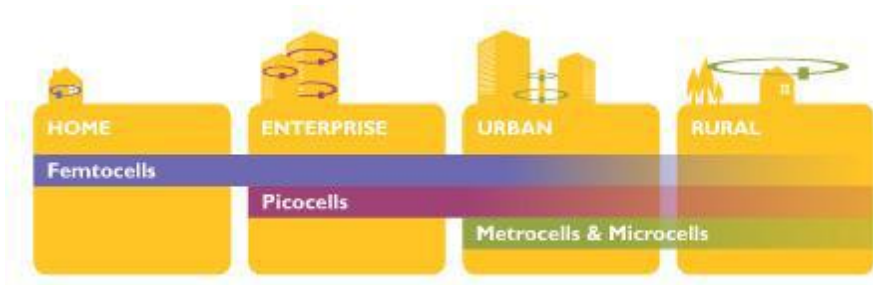


Εικόνα 6: Διαφορές μεταξύ των κυψελών



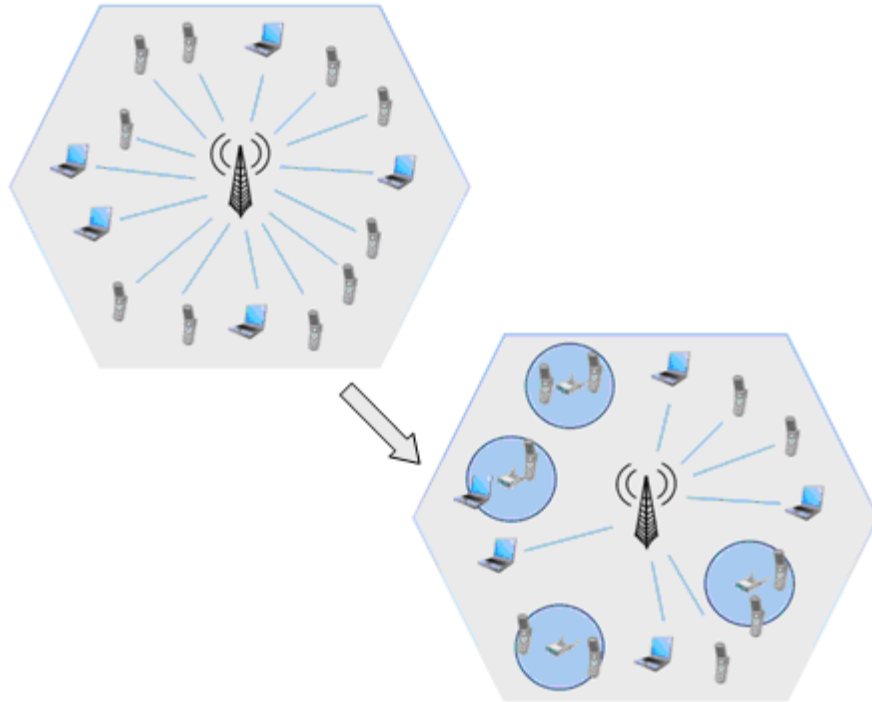
Μια **πικοκυψέλη** παρέχει πιο εντοπισμένη κάλυψη από μια μικροκυψέλη. Οι πικοκυψέλες συνήθως τοποθετούνται στο εσωτερικό των κτηρίων, όπου η κάλυψη δεν είναι η επιθυμητή και η αναμενόμενη, ή σε περιοχές με ιδιαίτερα αυξημένο αριθμό χρηστών, όπως σε αεροδρόμια, γήπεδα, σιδηροδρομικούς σταθμούς κτλ. Μια πικοκυψέλη καλύπτει σχετικά μικρή περιοχή όπως γραφεία, εμπορικά κέντρα ή ακόμη και το εσωτερικό ενός αεροπλάνου. Πιο συγκεκριμένα η ακτίνα ραδιοκάλυψης μιας πικοκυψέλης είναι περίπου κάτω από 200 μέτρα, αν και τα όρια ραδιοκάλυψης των κυψελών είναι συγκεκριμένα. Στα κυψελοειδή δίκτυα, οι πικοκυψέλες παρέχουν καλύτερη ραδιοκάλυψη σε εσωτερικούς χώρους περιοχών όπου η κάλυψη είναι ασθενής, καθώς επίσης χρησιμοποιούνται και για να αυξήσουν την χωρητικότητα των δικτύων σε περιοχές με αυξημένη πυκνότητα χρηστών.

Μια **φεμτοκυψέλη** (femtocell) είναι ένας μικρός κυψελοειδής σταθμός βάσης, χαμηλού κόστους που τοποθετείται από τον χρήστη, δηλαδή ένα μικρής κλίμακας ασύρματο σημείο πρόσβασης χαμηλής ισχύος, που απευθύνεται σε οικιακά περιβάλλοντα ή σε μικρές επιχειρήσεις, παρέχοντάς τους υψηλής ποιότητας και ταχύτητας τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Η φεμτοκυψέλη συνδέεται με τον πάροχο του δικτύου με DSL συνδέσεις ή οπτικές ίνες. Σε οικιακά περιβάλλοντα, όπως απεικονίζεται και στην παρακάτω εικόνα, οι φεμτοκυψέλες παρέχουν κάλυψη της τάξεως των 10 έως 100 μέτρων.



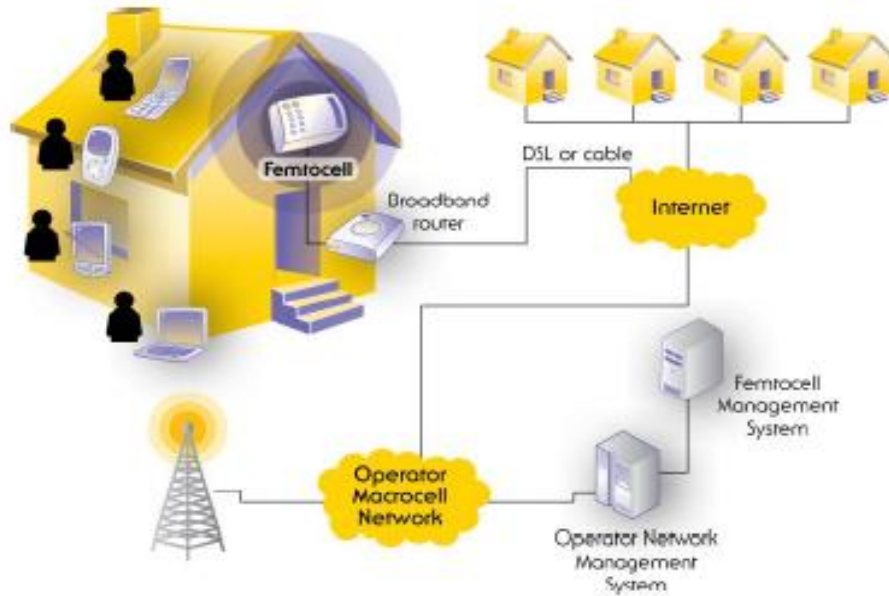
Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση κατάταξης κυψελών

Πιο συγκεκριμένα στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το δίκτυο δύο επιπέδων που αποτελείται από μια μακροκυψέλη, η οποία υπερκαλύπτει τις τέσσερις φεμτοκυψέλες.



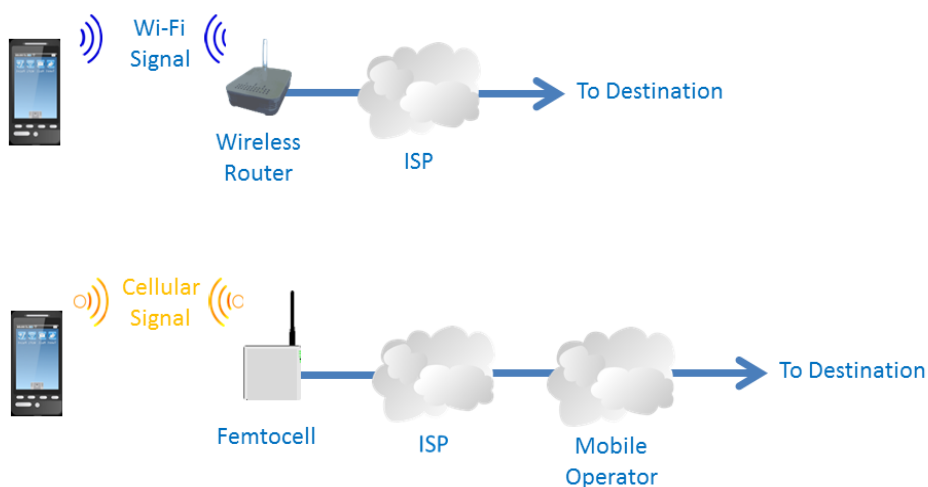
Εικόνα 8: Δίκτυο δύο επιπέδων μακροκυψέλης – φεμτοκυψελών

Η φεμτοκυψέλη παρουσιάζει βελτιώσεις από άποψη κάλυψης και χωρητικότητας, κυρίως για εσωτερικούς χώρους, με θετικές επιπτώσεις στις κεφαλαιούχες δαπάνες και τα λειτουργικά έξοδα. Παράλληλα επιτρέπει στον πάροχο να επεκτείνει την κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους, ειδικά όπου η πρόσβαση είναι περιορισμένη ή ανύπαρκτη. Επίσης, η χρήση femtocells παρέχει μεγαλύτερη επαναχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος και άρα μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Ακόμη, συντελεί στην αποσυμφόρηση της κίνησης της μακροκυψέλης με τρόπο ο οποίος θα περιγραφεί αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο. Τέλος με τη χρήση φεμτοκυψελών είναι δυνατή η χρήση πραγματικών 3G υπηρεσιών. Παρόλο που συνήθως εστιάζομαστε στο WCDMA, η έννοια της φεμτοκυψέλης αφορά όλα τα πρότυπα όπως το GSM, WiMAX, LTE κτλ.



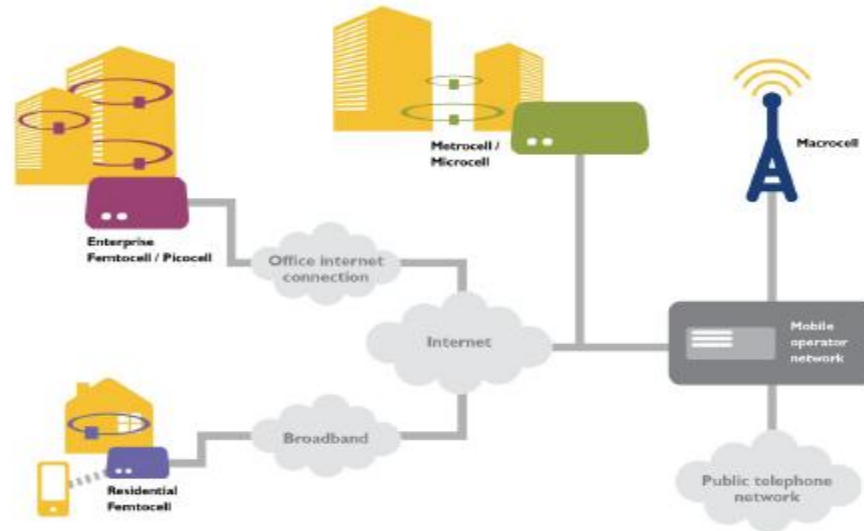
Εικόνα 9: Σχηματικό διάγραμμα δικτύου φεμτοκυψέλης (femtocell)

Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ της φεμτοκυψέλης και ενός ασύρματου τοπικού δικτύου, είναι ότι τα femtocell έχουν την ίδια υποδομή με τα κυψελωτά δίκτυα (Εικόνα 10). Κατ' αυτόν τον τρόπο συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα ενός ασύρματου τοπικού δικτύου με εκείνα ενός κυψελωτού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούν τις ίδιες τεχνικές πρόσβασης στο μέσο και πολυπλεξίας χρηστών με τις μακροκυψέλες, καθώς και το ίδιο φάσμα.



Εικόνα 10: Διαφορά μεταξύ Wi-Fi & femtocell

Το γεγονός αυτό δίνει στον πάροχο τη δυνατότητα να ελέγχει την ποιότητα υπηρεσίας (QoS), να χρεώνει τον πελάτη βάση διαφόρων στρατηγικών χρέωσης, όπως αντίστοιχα συμβαίνει σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι αρκετά σημαντικό, καθώς δίνεται η δυνατότητα στον πάροχο να ελέγχει το δίκτυο σαν να ήταν ενοποιημένο (Εικόνα 11).



Εικόνα 11: Αρχιτεκτονική τηλεπικοινωνιακού δικτύου



## Κεφάλαιο 2

### Αρχιτεκτονική και λειτουργία femtocell

## 2.1 Εισαγωγή

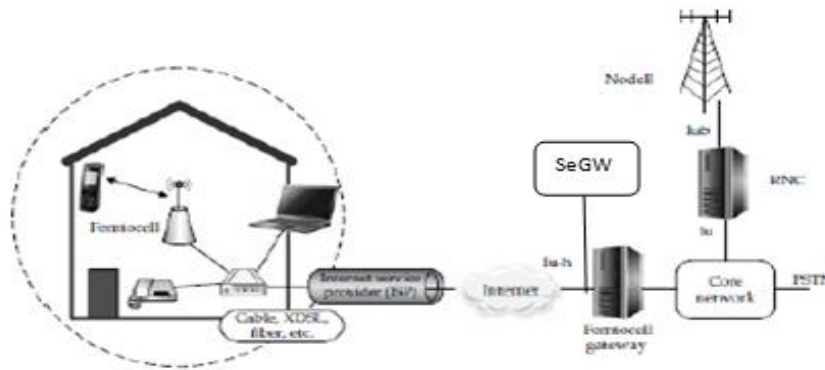
Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, θα αναλυθούν έννοιες σχετικές με τις φεμτοκυψέλες και θα παρουσιαστούν η αρχιτεκτονική και ο τρόπος λειτουργίας των φεμτοκυψελών. Επίσης, θα περιγραφούν οι πολιτικές πρόσβασης που χρησιμοποιούνται, καθώς επίσης και οι διαθέσιμοι τρόποι ανάθεσης του φάσματος σε δίκτυα δύο επιπέδων. Στόχος του κεφαλαίου, είναι να μπορέσει ο αναγνώστης να καταλάβει και να διακρίνει τον τρόπο λειτουργίας των femtocells καθώς επίσης και την αρχιτεκτονική του δικτύου που χρησιμοποιείται.

## 2.2 Αρχιτεκτονική των φεμτοκυψελών

Το συγκεκριμένο τμήμα της διπλωματικής εργασίας εμβαθύνει και αναλύει την αρχιτεκτονική της φεμτοκυψέλης ως συσκευή, καθώς επίσης και του δικτύου που περιέχει την φεμτοκυψέλη.

### 2.2.1 Νέα στοιχεία που εμφανίζονται στο δίκτυο

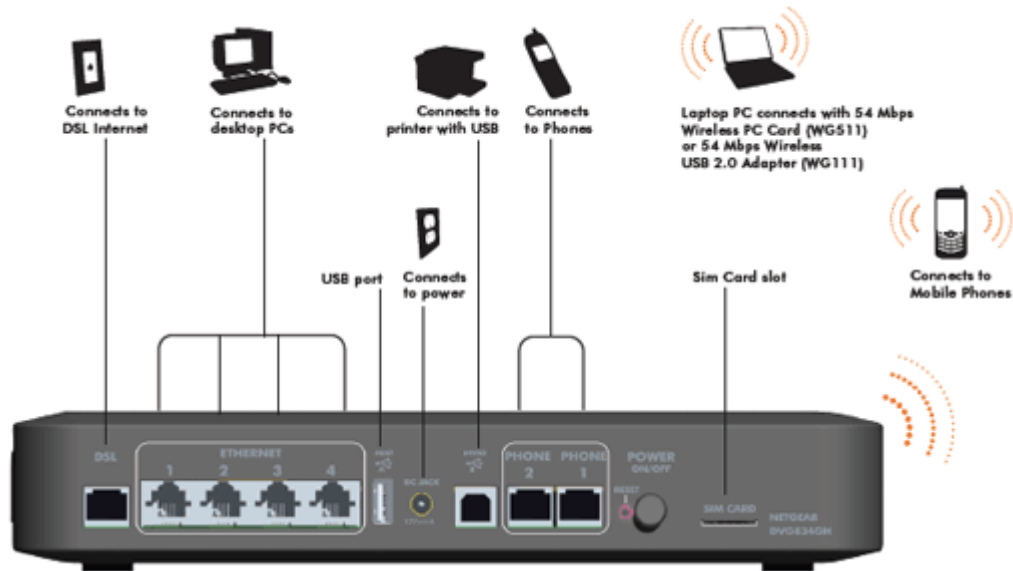
Τα νέα στοιχεία που εμφανίζονται στο δίκτυο στο οποίο χρησιμοποιούνται femtocells είναι: η ίδια η φεμτοκυψέλη η οποία είναι γνωστή και σαν Home NodeB (HNB), η πύλη της φεμτοκυψέλης (HNBGW), η πύλη ασφαλείας (SeGW), το σύστημα διαχείρισης του femtocell (HMS) και τέλος η διεπαφή Iu-h. Τα νέα αυτά στοιχεία θα συζητηθούν σε αυτό το τμήμα.



Εικόνα 15: Διάγραμμα δικτύου με χρήση femtocell

## Home NodeB (HNB)

Ο οικιακός σταθμός βάσης (femtocell) ή αλλιώς Home NodeB (HNB) εγκαθίσταται στις οικίες ή τις επιχειρήσεις των χρηστών. Μπορεί να υποστηρίξει από 4 έως 8 χρήστες ταυτόχρονα για οικιακή χρήση και 8 έως 16 χρήστες ταυτόχρονα για επιχειρησιακή χρήση, προσφέροντας τις ίδιες υπηρεσίες με ένα σταθμό βάσης μακροκυψέλης.



Εικόνα 16: Αρχιτεκτονική φεμτοκυψέλης

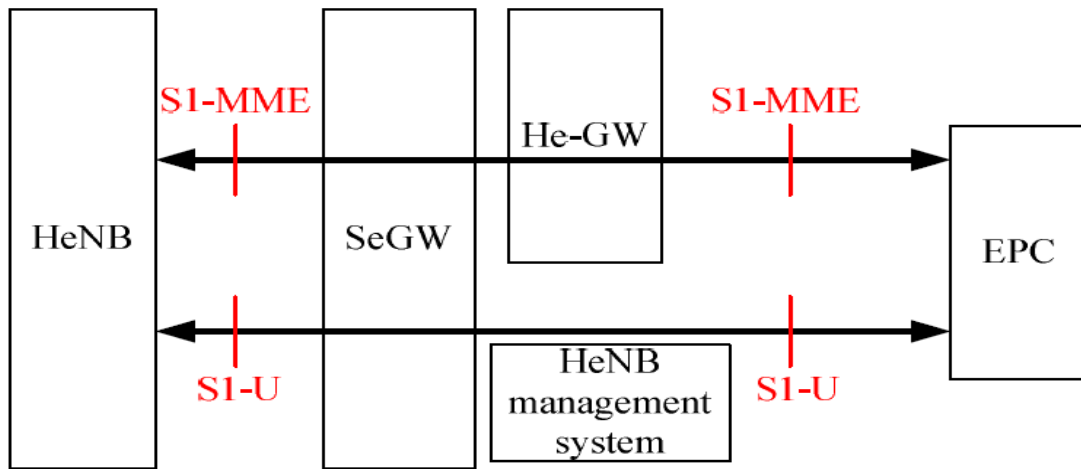
Η συσκευή έχει σχετικά χαμηλό κόστος και είναι μικρή σε μέγεθος. Έτσι μπορεί να εγκατασταθεί σχεδόν σε οποιοδήποτε μέρος στο σπίτι ή το γραφείο του χρήστη. Το HNB τροφοδοτείται από το ηλεκτρικό δίκτυο στο οποίο ανήκει ο χρήστης.

## Πύλη Home NodeB (HNB GW)

Η πύλη του NodeB, είναι η συσκευή που έχει σαν στόχο, να συνδέσει το HNB με το υπόλοιπο δίκτυο. Είναι υπεύθυνη για την συλλογή των συνδέσεων από τις φεμτοκυψέλες και μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε περιοχή των εγκαταστάσεων των παρόχων.

### ***Iu-h διεπαφή***

Η Iu-h είναι η διεπαφή μεταξύ του οικιακού σταθμού βάσης (HNB) και της femtocell πύλης (HNBGW). Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ των παραπάνω οντοτήτων.



Εικόνα 17: Αρχιτεκτονική προσωπικού σταθμού βάσης

### ***Σύστημα διαχείρισης Home NodeB***

Το σύστημα διαχείρισης του οικιακού σταθμού βάσης, είναι υπεύθυνο για την αποστολή στοιχείων διαμόρφωσης στο HNB. Χρησιμοποιείται για την ανακάλυψη της πύλης του femtocell (HNBGW) αλλά και της πύλης ασφαλείας (SeGW), από τον σταθμό βάσης. Μπορεί να ενημερώνει το λογισμικό και να εκτελεί επαλήθευση θέσης για τον HNB.

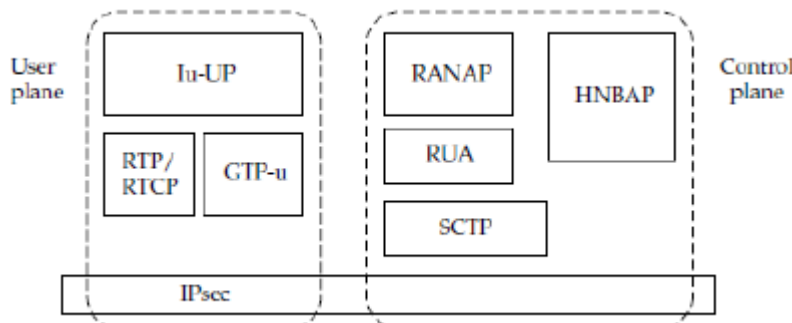
### ***Πύλη ασφαλείας (SeGW)***

Η πύλη ασφαλείας είναι ένα στοιχείο το οποίο μπορεί να εφαρμοσθεί ξεχωριστά στο δίκτυο ή να ενσωματωθεί στην πύλη της φεμτοκυψέλης (HNBGW). Χρησιμοποιείται ως "αντιπυρική ζώνη" μεταξύ του δικτύου των παρόχων και του internet.



## 2.2.2 Στοιβά Πρωτοκόλλων φεμτοκυψέλης

Μια επισκόπηση του πρωτοκόλλου της φεμτοκυψέλης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, στην οποία περικλείονται τα επίπεδα του χρήστη και του ελέγχου.



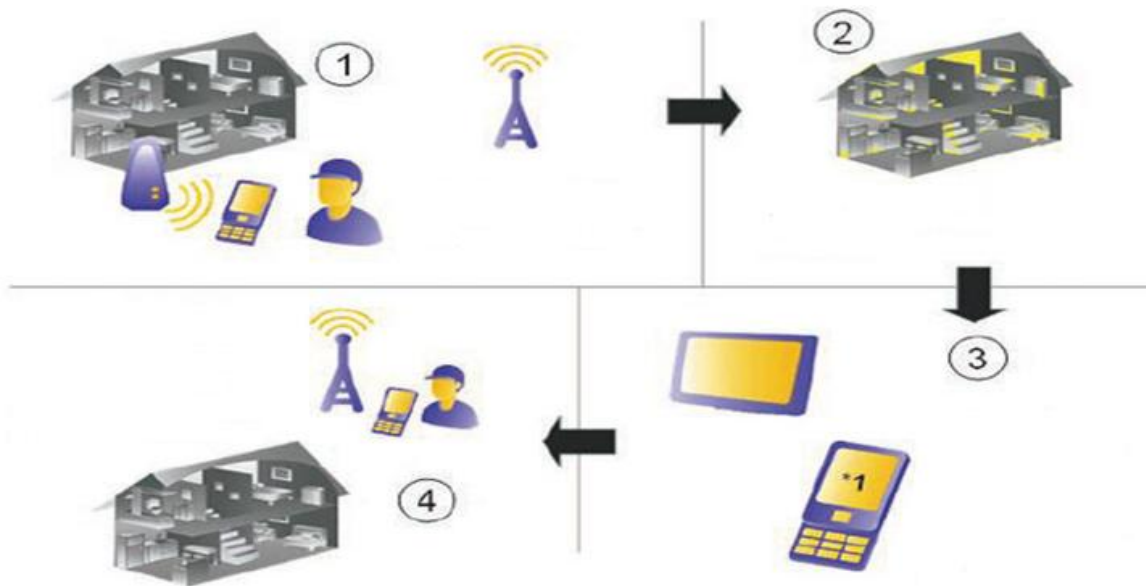
Εικόνα 18: Πρωτόκολλο femtocell

Αρχικά θα αναφερθούν τα πεδία που περικλείονται στο επίπεδο του χρήστη, τα οποία αποτυπώνονται στο αριστερό τμήμα της παραπάνω εικόνας. Το GTP (GPRS Tunneling Protocol) είναι το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για την σηματοδότηση και την μεταφορά δεδομένων. Το RTP (Real-Time Protocol) παρέχει end-to-end διανομή δεδομένων για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Τέλος το RTCP (Real Time Control Protocol) παρέχει μια ένδειξη της μετάδοσης και της λήψης των δεδομένων που μεταφέρει το RTP.

Στο επίπεδο του ελέγχου περικλείονται τα πεδία που θα αναφερθούν παρακάτω. Αρχικά το RANAP (Radio Access Network Application Protocol) προσφέρει σηματοδότηση στο επίπεδο ελέγχου. Το RUA (RANAP User Adaptation) υποστηρίζει τον οικιακό σταθμό βάσης (HNB) και την πύλη femtocell (HNB-GW), την διαχείριση λαθών κτλ. Το HNBAP (Home NodeB Application Protocol) υποστηρίζει την καταχώριση του HNB και του κινητού τερματικού, την επικοινωνία μεταξύ HNB και HNB-GW κτλ. Τέλος το SCTP (Stream Control Transmission Protocol) είναι ένα πρωτόκολλο μεταφοράς που χρησιμοποιείται για να παρέχει αξιόπιστη μεταφορά για δίκτυα επόμενης γενιάς όταν επιτρέπονται πολλαπλές ροές δεδομένων.

### 2.3 Λειτουργία των φεμτοκυψελών

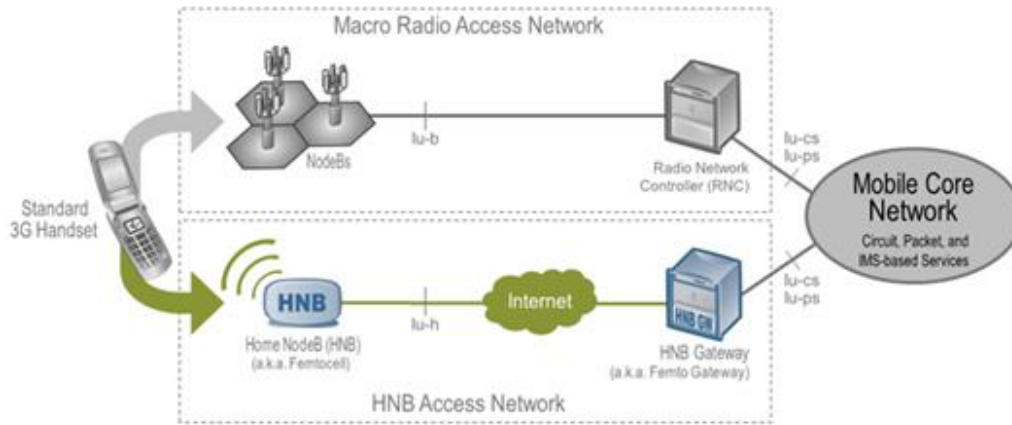
Όπως είπαμε και πιο πάνω, η φεμτοκυψέλη ή αλλιώς ο προσωπικός σταθμός βάσης, τοποθετείται στην οικία του χρήστη, με στόχο την καλύτερη ενδοοικιακή κάλυψη και ταυτοχρόνως να προσφέρει ανακούφιση στην εξωτερική μακροκυψέλη. Οπότε καθώς ο χρήστης μπαίνει στην οικία του, το κινητό τηλέφωνο αναγνωρίζει την παρουσία της φεμτοκυψέλης και ειδοποιείται η δημόσια μακροκυψέλη, ότι οι επικοινωνίες του συγκεκριμένου χρήστη θα πραγματοποιούνται πλέον μέσω του οικιακού ISP. Στην περίπτωση αυτή το κινητό τηλέφωνο λειτουργεί σαν ένα τυπικό ασύρματο τηλέφωνο.



Εικόνα 19: Παράδειγμα λειτουργίας femtocell

Ο χρήστης της φεμτοκυψέλης είναι ακόμη στο δίκτυο του ISP αλλά πλέον έχει ελευθερώσει πόρους της δημόσιας μακροκυψέλης, πόροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από εξωτερικούς χρήστες. Η πρόσβαση του χρήστη της φεμτοκυψέλης γίνεται μέσω μιας φεμτοκυψελοειδούς πύλης (HNBGW).

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ανάπτυξης φεμτοκυψελών. Οι οικίες διαθέτουν ευρυζωνική σύνδεση μέσω ISP στο δίκτυο. Τα δεδομένα διοχετεύονται μέσω της φεμτοκυψέλης (HNB) στην φεμτοκυψελοειδή πύλη (femtocell gateway) ώστε να φτάσουν στο κυψελοειδές δίκτυο. Επίσης παρουσιάζεται ο πυρήνας του δικτύου που έχει πρόσβαση στις υπηρεσίες του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου για φωνητικές υπηρεσίες και ευρυζωνικές υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων.



Εικόνα 20: Παράδειγμα δικτύου φεμτοκυψέλης

Τα κινητά τηλέφωνα χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένες ζώνες συχνότητων. Έτσι δεν θα επιτρέπεται στη φεμτοκυψέλη να μεταδίδει σε περιοχές όπου ο πάροχος δεν παρέχει υπηρεσίες ή δεν έχει δικαίωμα να χρησιμοποιεί την συγκεκριμένη ζώνη συχνότητων. Έτσι η γνώση της γεωγραφικής θέσης της φεμτοκυψέλης είναι εξαιρετικά σημαντική. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που οι φεμτοκυψέλες διαθέτουν ικανότητα GPS ώστε να προσφέρουν στον πάροχο κινητής τηλεφωνίας την ακριβή τοποθεσία του χρήστη. Επιπλέον η γνώση της γεωγραφικής τοποθεσίας χρησιμοποιείται για να υποστηρίξει υπηρεσίες εκτάκτου ανάγκης, καθώς και μόνιμη παρακολούθηση. Πάντως το GPS δεν είναι η μόνη μέθοδος εξακρίβωσης της ακριβούς τοποθεσίας, καθώς για τον ίδιο λόγο χρησιμοποιούνται και οι διευθύνσεις IP.



## Κεφάλαιο 3

### Ανάλυση ενός συστήματος femtocell

### **3.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιασθούν και θα αναλυθούν διάφορα πρότυπα υπολογισμού της απώλειας διαδρομής για περιβάλλον φεμτοκυψέλης. Ακόμη θα περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η διαδικασία της διαπομπής σε δίκτυα δύο επιπέδων. Στόχος του κεφαλαίου, είναι ο αναγνώστης να αποκτήσει μια σφαιρική άποψη για την διαδικασία του handover και τον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής.

### **3.2 Πολιτικές πρόσβασης φεμτοκυψελών και παρεμβολή**

Οι χρήστες ενός οικιακού σταθμού βάσης μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες. Στους **συνδρομητές**, όπου πρόκειται για χρήστες που έχουν δικαίωμα πρόσβασης και εξυπηρέτησης από το femtocell και στους **μη-συνδρομητές**, οι οποίοι δεν έχουν δικαίωμα πρόσβασης σε κάποια κοντινή φεμτοκυψέλη και έτσι εξυπηρετούνται από την δημόσια μακροκυψέλη.

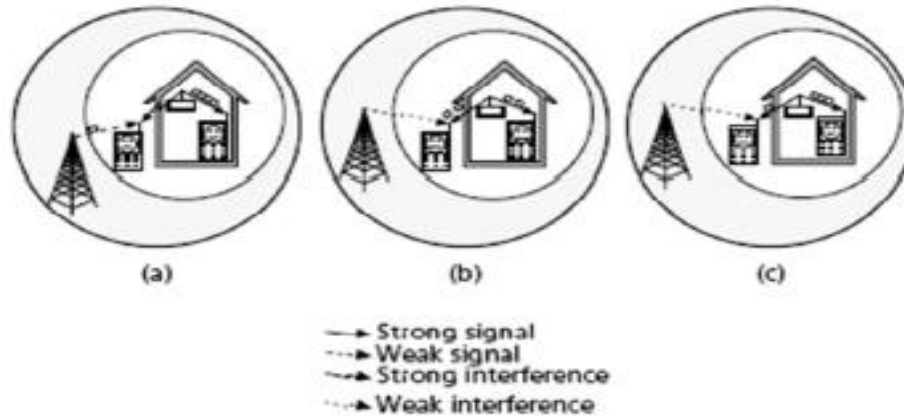
Οι φεμτοκυψέλες παρέχουν τις εξής πολιτικές πρόσβασης:

**Ανοικτού τύπου**, όπου όλοι οι χρήστες μπορούν να συνδεθούν και να εξυπηρετηθούν από έναν οικιακό σταθμό βάσης. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική χρησιμοποιείται συνήθως σε κτήρια όπου είναι θεμιτό να συνδέονται όλοι οι χρήστες στην φεμτοκυψέλη (πχ δημαρχείο).

**Κλειστού τύπου**, όπου μόνο εξουσιοδοτημένοι χρήστες μπορούν να συνδεθούν και να εξυπηρετηθούν από μια φεμτοκυψέλη. Η λίστα των συνδρομητών ενός οικιακού σταθμού βάσης καθορίζεται από τον κάτοχό της, πιθανώς από ένα user interface (διεπαφή χρήστη). Η συγκεκριμένη πολιτική πρόσβασης αποτελεί την προτιμητέα και πιο διαδεδομένη πολιτική, καθώς προστατεύονται οι πόροι, οικονομικοί και πόροι δικτύου, των εξουσιοδοτημένων χρηστών.

**Υβριδικού τύπου**, όπου μέρος των πόρων του ιδιωτικού σταθμού βάσης διατίθεται για ανοικτού τύπου πρόσβαση και το υπόλοιπο μέρος ακολουθεί μια τακτική κλειστού τύπου. Με άλλα λόγια, προτιμάται η σύνδεση και η εξυπηρέτηση των

εξουσιοδοτημένων χρηστών και κατόπιν παρέχεται περιορισμένη πρόσβαση σε όλους τους υπόλοιπους χρήστες. Το γεγονός αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται ο αριθμός των χρηστών που δεν απολαμβάνουν υπηρεσία, αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και η συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος.



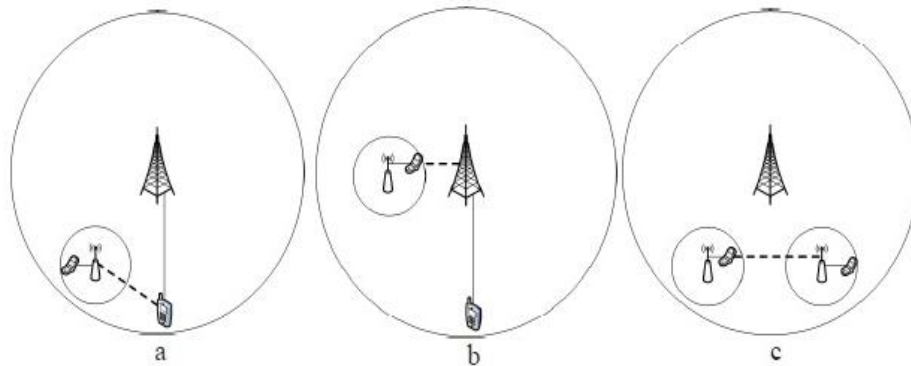
Εικόνα 21: Πολιτικές πρόσβασης α) κλειστού τύπου, β) ανοικτού τύπου και γ) υβριδικού τύπου

Να σημειωθεί ότι το βασικό μειονέκτημα των δικτύων δύο επιπέδων (μακροκυψέλη και φεμτοκυψέλη), αποτελούν οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών, καθώς όλες οι κυψέλες είτε μακρο- είτε φέμτο- διαμοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης. Συγκεκριμένα υπάρχουν δύο είδη παρεμβολών:

- **Παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων:** Παρουσιάζεται μεταξύ χρηστών που βρίσκονται σε διαφορετικό επίπεδο του δικτύου, δηλαδή ανάμεσα σε χρήστες φεμτοκυψέλης και μακροκυψέλης.
- **Παρεμβολή ίδιου επιπέδου:** Παρουσιάζεται μεταξύ χρηστών οι οποίοι ανήκουν στο ίδιο επίπεδο δικτύου, δηλαδή προκαλείται είτε από γειτονικές μακροκυψέλες, είτε από γειτονικές μακροκυψέλες κτλ.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η λειτουργία των φεμτοκυψελών, παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί, οι πιθανοί συνδυασμοί δημόσιων και ιδιωτικών δικτύων.

Να σημειωθεί ότι το δίκτυο που χρησιμοποιείται στις τυπικές κυψελοειδείς τηλεπικοινωνίες ονομάζεται δημόσιο δίκτυο και το δίκτυο που χρησιμοποιείται εντός της φεμτοκυψέλης, ονομάζεται ιδιωτικό δίκτυο. Η δημόσια μακροκυψέλη παριστάνεται με μια μεγάλη ωοειδή περιοχή.



Εικόνα 22: Αλληλεπίδραση HNB με τη δημόσια μακροκυψέλη

- Στην περίπτωση a, υπάρχει ο οικιακός σταθμός βάσης HNB-A, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο όριο της μακροκυψέλης.
- Στην περίπτωση b, υπάρχει η φεμτοκυψέλη HNB-B, η οποία είναι τοποθετημένη κοντά στο σταθμό βάσης της μακροκυψέλης.
- Στην περίπτωση c, υπάρχουν δυο οικιακοί σταθμοί βάσης, HNB-C και HNB-D, τοποθετημένοι σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, έτσι ώστε να παρεμβάλλει ο ένας την λειτουργία του άλλου.

Να σημειωθεί ότι δεν έχει διαφοροποιηθεί ο εξοπλισμός χρήστη, δημόσιος και ιδιωτικός, καθώς θα πρέπει να κινείται ελεύθερα στην μακροκυψέλη και την φεμτοκυψέλη.

Στην περίπτωση a, η θέση HNB-A βρίσκεται κοντά στα όρια της μακροκυψέλης. Εάν η μακροκυψέλη χρησιμοποιεί την ίδια ζώνη συχνοτήτων με τον οικιακό σταθμό βάσης, θα παρουσιασθεί παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων. Επομένως, θα περιμένουμε μικρή downlink (κάτω ζεύξη) παρεμβολή, λόγω της αυξημένης απώλειας διάδοσης στο downlink. Σε αυτό το σενάριο, η χρήση της φεμτοκυψέλης έχει αυξήσει την downlink

ρυθμαπόδοση (throughput) λόγω του καλύτερου SNR της φεμτοκυψέλης σχετικά με αυτό της μακροκυψέλης. Να σημειωθεί ότι το κινητό τερματικό που βρίσκεται εκτός των ορίων του ιδιωτικού σταθμού βάσης, θα μεταδίδει με μεγαλύτερη ισχύ από το κινητό τερματικό που σχετίζεται με το HNB-A. Το γεγονός αυτό θα έχει σαν συνέπεια την αύξηση των παρεμβολών στο uplink κανάλι (άνω ζεύξη), εφόσον μόνο το ένα από τα δύο τερματικά σχετίζονται με το HNB. Στην περίπτωση αυτή καλό θα ήταν να εφαρμοστούν τεχνικές μείωσης της παρεμβολής.

Στην περίπτωση b, η θέση HNB-B βρίσκεται κοντά στον σταθμό βάσης μακροκυψέλης που είναι υψηλής ισχύος. Εάν η μακροκυψέλη χρησιμοποιεί την ίδια ζώνη συχνοτήτων, με τον οικιακό σταθμό βάσης, θα παρουσιασθεί παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων. Επομένως, η κάτω ζεύξη (downlink) του ιδιωτικού και του δημόσιου δικτύου θα έχουν αύξηση των παρεμβολών. Το γεγονός αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα, το κινητό τερματικό που βρίσκεται μέσα στην ακτίνα κάλυψης της φεμτοκυψέλης να έχει υποβαθμισμένη κάτω ζεύξη (downlink), σε σχέση με το τερματικό που βρίσκεται στην μακροκυψέλη. Στην περίπτωση που μετακινούμαστε εντός των ορίων της φεμτοκυψέλης, το δημόσιο σήμα εξασθενεί, ενώ αντιθέτως το ιδιωτικό σήμα ενισχύεται. Εδώ οι τοίχοι της οικίας έχουν ευεργετικές ιδιότητες και θετική συνεισφορά. Οι τοίχοι, όχι μόνο εξασθενούν το σήμα που μπαίνει στην οικία από τη μακροκυψέλη, αλλά ταυτόχρονα εξασθενούν και το σήμα που βγαίνει από τον οικιακό σταθμό βάσης. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η downlink παρεμβολή στο δημόσιο και ιδιωτικό δίκτυο.

Στην περίπτωση c, η θέση HNB-D βρίσκεται κοντά στη θέση HNB-C. Στο σενάριο αυτό έχουμε σκόπιμα συμπεριλάβει παρεμβολές, οι οποίες δημιουργούνται από γειτονικές φεμτοκυψέλες που λειτουργούν είτε στην ίδια συχνότητα, είτε σε γειτονικές συχνότητες (παρεμβολή ίδιου επιπέδου). Είναι φανερό ότι και οι δύο φεμτοκυψέλες αντιμετωπίζουν πρόβλημα uplink και downlink παρεμβολών από τη δημόσια μακροκυψέλη. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι παρεμβολές από το femtocell μπορεί να επιδεινώσουν τις επιδόσεις για χρήστες της μακροκυψέλης. Έτσι, είναι δικαιολογημένη η μικρή πτώση της απόδοσης, σε χρήστες μακροκυψέλης οι οποίοι επικοινωνούν κοντά σε ιδιωτικούς σταθμούς βάσης.

Πιο πάνω δόθηκε ένα παράδειγμα με μια φεμτοκυψέλη, έτσι ώστε να γίνει αντιληπτή η λειτουργία των φεμτοκυψελών αλλά και για να φανούν οι παρεμβολές που μπορεί να αντιμετωπίσει ένας ιδιωτικός σταθμός βάσης. Να σημειωθεί ότι παρόμοια προβλήματα παρεμβολών αντιμετωπίζουν όλων των ειδών (μακροκυψέλες, μικροκυψέλες κτλ) οι γειτονικές κυψέλες οι οποίες λειτουργούν στην ίδια συχνότητα. Έτσι καλό θα είναι να αποφεύγεται η ανάθεση όμοιων συχνοτήτων λειτουργίας σε γειτονικές κυψέλες.



Για να είναι περισσότερο ευδιάκριτη και κατανοητή η διαφορά μεταξύ των πολιτικών πρόσβασης ανοικτού και κλειστού τύπου, παρουσιάζεται ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας.

<i><b>Κλειστού τύπου φεμτοκυψέλες</b></i>	<i><b>Ανοικτού τύπου φεμτοκυψέλες</b></i>
Λιγότερες διαπομπές	Περισσότερες διαπομπές
Λιγότερες παρεμβολές	Υψηλές παρεμβολές
Χαμηλότερη ρυθμαπόδοση συστήματος	Υψηλότερη ρυθμαπόδοση συστήματος
Εξυπηρέτηση εξουσιοδοτημένων χρηστών	Αυξημένη εξωτερική χωρητικότητα
Πιο εύκολη τιμολόγηση	Τίθενται θέματα ασφάλειας

Πίνακας 2 : Σύγκριση πρόσβασης ανοικτού και κλειστού τύπου

### **3.3 Τρόποι ανάθεσης φάσματος**

Στην περίπτωση που οι πάροχοι διαθέτουν περισσότερες από μια αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος, θα πρέπει να διαμοιράσουν κατάλληλα το φάσμα ανάμεσα στην μακροκυψέλη και την φεμτοκυψέλη. Ο διαμοιρασμός αυτός επιτυγχάνεται με τους παρακάτω τρόπους:

- **Αφιερωμένο φάσμα:** Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται μια ζώνη φάσματος για το επίπεδο της μακροκυψέλης και μια άλλη διαφορετικής συχνότητας από το επίπεδο της φεμτοκυψέλης. Το γεγονός αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι παρεμβολές ανάμεσα στα δύο επίπεδα του δικτύου, καθώς αυτά λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου, είναι η χαμηλή επαναχρησιμοποίηση του φάσματος, αφού κυψέλες ενός μόνο επιπέδου μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ένα υποσύνολο των συνολικών διαθέσιμων συχνοτήτων.
- **Μοιρασμένο φάσμα:** Στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται υψηλότερη επαναχρησιμοποίηση του φάσματος, καθώς και τα δύο επίπεδα του δικτύου έχουν πρόσβαση σε όλες τις διαθέσιμες συχνότητες. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η εμφάνιση παρεμβολής διαφορετικών επιπέδων, γεγονός που οδηγεί σε υποβάθμιση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

- **Μερικώς μοιρασμένο φάσμα:** Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια μέση λύση, δηλαδή το επίπεδο της μακροκυψέλης έχει πρόσβαση σε όλες τις διαθέσιμες συχνότητες, ενώ οι οικιακοί σταθμοί βάσης λειτουργούν μόνο σε ένα υποσύνολο αυτών. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι α) η καλύτερη χρησιμοποίηση του φάσματος σε σχέση με τη περίπτωση του αφιερωμένου φάσματος και β) η μείωση της παρεμβολής διαφορετικών επιπέδων, σε σύγκριση με τη προσέγγιση του μοιρασμένου φάσματος, εφόσον οι χρήστες της μακροκυψέλης που παράγουν ή υποφέρουν από υψηλή παρεμβολή διαφορετικών επιπέδων, μπορούν να χρησιμοποιήσουν το αποκλειστικά αφιερωμένο στη μακροκυψέλη φάσμα.

### 3.4 Διαδικασία διαπομπής

Η διαπομπή από και προς τις φεμτοκυψέλες, είναι προφανώς, μια απαραίτητη διαδικασία, έτσι ώστε να λειτουργεί αποδοτικά το κυψελωτό δίκτυο στο σύνολό του. Είναι σημαντικό, το γεγονός ότι οι χρήστες δεν έχουν συνέπειες και προβλήματα με τη διαδικασία της διαπομπής, γεγονός που ενδεχομένως να οδηγούσε σε δυσπιστία ως προς την αξιοπιστία του δικτύου και τελικά την μη χρησιμοποίηση αυτού. Υπάρχουν διάφορα είδη διαπομπής στις φεμτοκυψέλες. Αυτά είναι:

- **Inbound handover:** Είναι η περίπτωση όπου διαπομπή πραγματοποιείται από τη μακροκυψέλη προς τη φεμτοκυψέλη. Αποτελεί μια από τις πιο συνηθισμένες μορφές διαπομπής σε δίκτυα δύο επιπέδων. Η Inbound διαπομπή εμφανίζεται στην περίπτωση που ο χρήστης αρχικά εξυπηρετείται από τη δημόσια κυψέλη και μετά εισέρχεται στην εμβέλεια του ιδιωτικού σταθμού βάσης. Καθώς το femtocell αντιλαμβάνεται την παρουσία του εξουσιοδοτημένου κινητού τερματικού, ειδοποιεί τη μακροκυψέλη και πλέον εξυπηρετεί αυτό, τον χρήστη, απελευθερώνοντας τους κατάλληλους πόρους.
- **Outbound handover:** Στην περίπτωση αυτή, η διαπομπή πραγματοποιείται από τη φεμτοκυψέλη προς τη μακροκυψέλη. Καθώς ο χρήστης απομακρύνεται από τον οικιακό σταθμό βάσης και τείνει στα όρια εμβέλειάς αυτού, θα πρέπει να γίνει διαπομπή στην δημόσια μακροκυψέλη έτσι ώστε να μην διακοπεί η επικοινωνία. Η μακροκυψέλη δεσμεύει, εκ των προτέρων, τους κατάλληλους πόρους για τον συγκεκριμένο χρήστη και τελικά εξυπηρετεί αυτή το κινητό

τερματικό, καθώς είναι πλέον εκτός εμβέλειας και δικαιοδοσίας της φεμτοκυψέλης.

- **Femtocell to femtocell handover:** Στην περίπτωση αυτή, διαπομπή πραγματοποιείται από ένα ιδιωτικό σταθμό βάσης σε κάποιον άλλο. Να σημειωθεί πως ο χρήστης, θα πρέπει να διαθέτει κινητό τερματικό το οποίο είναι εξουσιοδοτημένο και μπορεί να εξυπηρετηθεί από το σύνολο των φεμτοκυψελών που λαμβάνουν χώρα στην διαπομπή. Σε περίπτωση που ο χρήστης δεν μπορεί να λάβει υπηρεσίες από διαφορετική φεμτοκυψέλη, λόγω εξουσιοδότησης, τότε αναγκαστικά θα εξυπηρετηθεί από τη μακροκυψέλη (outbound handover). Παράδειγμα διαπομπής ανάμεσα σε φεμτοκυψέλες, αποτελεί μια επιχείρηση η οποία διαθέτει γραφεία και τοποθετεί femtocells έτσι ώστε να επεκτείνει την κάλυψη σε ολόκληρο το κτήριο.

### **3.5 Πρότυπα υπολογισμού απώλειας διαδρομής (Path Loss) σε περιβάλλον φεμτοκυψέλης**

Η μετάδοση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εντός των κτηρίων αποτελεί κύριο παράγοντα μελέτης, καθώς υπάρχουν πολλαπλά τοιχώματα, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απώλεια ισχύος του σήματος, σε σχέση με την μετάδοση σε εξωτερικούς χώρους. Επιπλέον, η εκτίμηση της απώλειας διαδρομής αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την σχεδίαση του δικτύου. Υπάρχουν αρκετά πρότυπα υπολογισμού της απώλειας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο βασικά.

#### **Πρότυπο #1**

Το πρότυπο που περιγράφεται παρακάτω προέρχεται από τον διεθνή οργανισμό ITU-R. Η εξίσωση που το περιγράφει είναι:

$$L_1 = 20 \log(f_c) + 10 \log(r) + L_f(n_F) - 28 \text{ σε dB.}$$

Όπου  $f_c$  είναι η συχνότητα σε MHz, ο  $n$  ονομάζεται εκθέτης απώλειας σήματος, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 2.8 και 3 και εξαρτάται από το περιβάλλον (αγροτικό, αστικό κτλ) αλλά και από τη συχνότητα του φέροντος  $f_c$ . Η απόσταση μετρείται σε μέτρα (m)

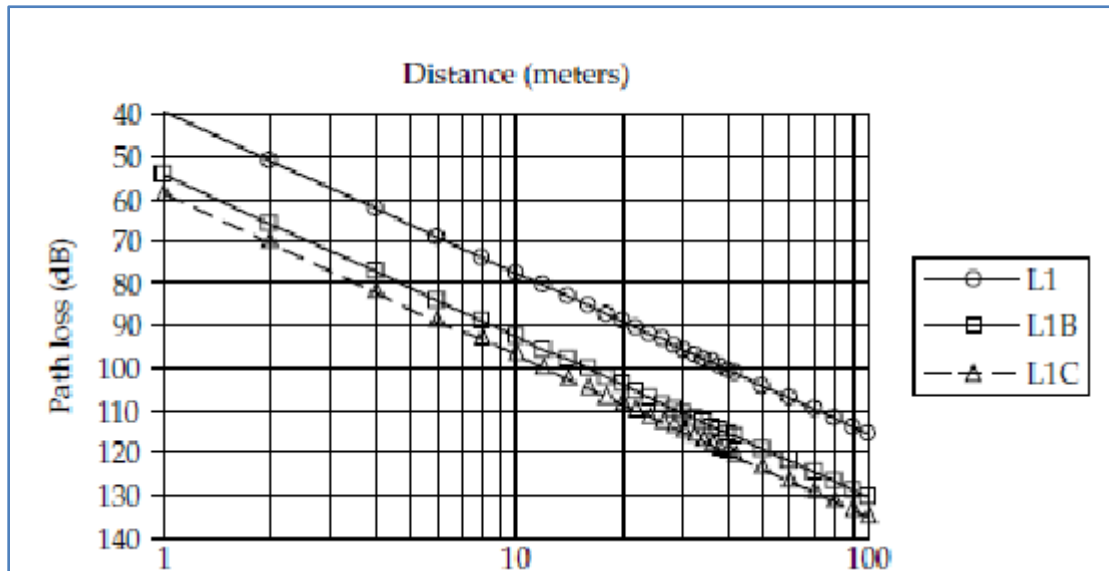
και  $L_f$  είναι η απώλεια διαπέρασης του πατώματος, η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των πατωμάτων που διαπερνώνται,  $n_f$ .

Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν πατώματα, ο όρος  $L_f(n_f)=0$  και η εξίσωση μετατρέπεται σε  $L_1 = 39.6 + 10 n \cdot \log(r)$  σε dB για τη συχνότητα των 2400 MHz.

Για παράδειγμα έστω ότι υπάρχουν 2 πατώματα και η συχνότητα  $f_c$  θα είναι  $f_c=2.4$  GHz, δηλαδή 2400 MHz. Θα έχουμε:

$$L_{1c} = 20 \log(f_c) + 10 n \log(r) + L_f(n_f) - 28 = 39.6 + 10 n \log(r) + 12 - 28, \text{ όπου } L_f(n_f)=12.$$

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι απώλειες που προκύπτουν στην περίπτωση που δεν υπάρχουν πατώματα (L1), και στην περίπτωση που υπάρχει ένας όροφος (L1B) και δύο όροφοι (L1C). Να σημειωθεί ότι η συχνότητα του σήματος είναι  $f_c=2.4$  GHz, δηλαδή 2400 MHz για όλες τις περιπτώσεις.



Εικόνα 23: Απώλεια σήματος διαδρομής κατά το πρότυπο #1

Είναι φανερό, ότι η προσθήκη του πρώτου πατώματος αυξάνει σημαντικά την απώλεια του σήματος και από 40 dB που είναι αρχικά, γίνεται 55 dB. Με άλλα λόγια παρατηρούμε μια αύξηση της απώλειας κατά 15 dB. Στην περίπτωση που εισάγουμε και το δεύτερο πάτωμα, η απώλεια αυξάνεται κατά 4 dB επιπλέον και από 55dB γίνεται 59 dB. Με άλλα λόγια παρατηρούμε μια αύξηση 19 dB σε σχέση με την πρώτη περίπτωση όπου δεν υπάρχει πάτωμα.

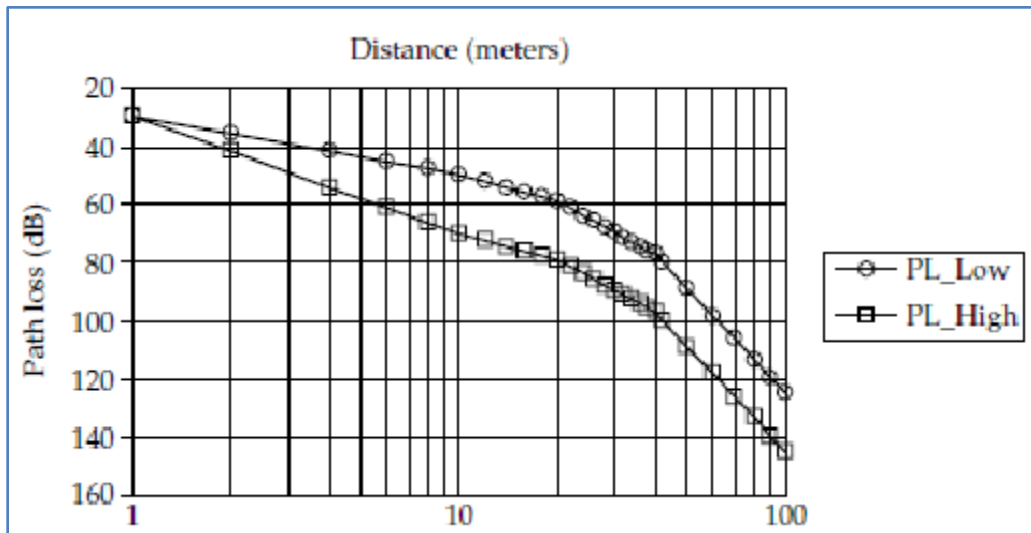
## Πρότυπο #2 (Ericsson)

Το συγκεκριμένο πρότυπο δίνει την απώλεια διαδρομής για  $f_c = 900$  MHz. Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει το άνω και κάτω όριο της απώλειας, λαμβάνοντας υπόψη την τυχαιότητα του ασύρματου περιβάλλοντος. Η μεταβλητή  $r$  δηλώνει και σε αυτή την περίπτωση την απόσταση.

Distance (Meters)	Lower Path Loss	Upper Path Loss
$1 < r < 10$	$30 + 20\log(r)$	$30 + 40\log(r)$
$10 \leq r < 20$	$20 + 30\log(r)$	$40 + 30\log(r)$
$20 \leq r < 40$	$-19 + 60\log(r)$	$1 + 60\log(r)$
$40 \leq r$	$-115 + 120\log(r)$	$-95 + 120\log(r)$

Πίνακας 3 : Απώλεια διαδρομής σύμφωνα με το πρότυπο Ericsson

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια γραφική παράσταση της απώλειας του σήματος σύμφωνα με το πρότυπο Ericsson. Είναι φανερό, ότι η γραφική παράσταση δεν είναι γραμμική (σε αντίθεση με το πρότυπο #1) και η απώλεια του σήματος αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό σε μεγάλες αποστάσεις.



Εικόνα 24: Γραφική παράσταση απώλειας σήματος κατά το πρότυπο Ericsson

### Πρότυπο #3 (Cost Action 231)

Στο πρότυπο αυτό έχουν ορισθεί διακριτά τοιχώματα διαφορετικών ειδών (λεπτά, φαρδιά). Να σημειωθεί ότι η απώλεια λόγω των επιπλέον ορόφων, ορίζεται διαφορετικά σε σχέση με το πρότυπο #1. Ο υπολογισμός της απώλειας δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$L_3 = 37 + 20 \log(r) + \sum_{j=1}^{N_w} L_{w_j} a_{w_j} + L_F N_F \left[ \frac{N_F + 2}{N_F + 1} - 0.46 \right]$$

Όπου  $N_w$  είναι ο αριθμός τύπων των τοιχωμάτων,  $L_{w_j}$  είναι η απώλεια στο τοίχωμα τύπου  $j$ ,  $a_{w_j}$  είναι ο αριθμός των τοιχωμάτων τύπου  $j$  που συναντά η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τον πομπό στον δέκτη,  $L_F$  είναι η απώλεια από το πάτωμα και  $N_F$  είναι ο αριθμός των πατωμάτων που συναντά η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι τιμές των  $L_w$  και  $L_F$  παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Parameter	900 MHz	1800 MHz
$L_w$	1.9 dB	3.4 dB
$L_F$	14.8 dB	18.3 dB

Πίνακας 4 : Παράμετροι απωλειών τοιχωμάτων ( $L_w$ ) και δαπέδου ( $L_f$ ) του προτύπου #3

Όπως είναι φανερό, παρουσιάζεται μεγαλύτερη απώλεια όταν η ακτινοβολία διαπερνά πατώματα, απ' ότι τοίχους. Παράδειγμα αν λάβουμε υπόψη ότι το σήμα πρέπει να ξεπεράσει ένα μόνο εσωτερικό τοίχο και ένα μόνο πάτωμα, τότε για  $f_c=1800$  MHz και 900 MHz, έχουμε αντιστοίχως:

$$\text{Για } 1800 \text{ MHz} \rightarrow L_{3B} = 37 + 20\log(r) + 3.4 + 18.3 \text{ dB}$$

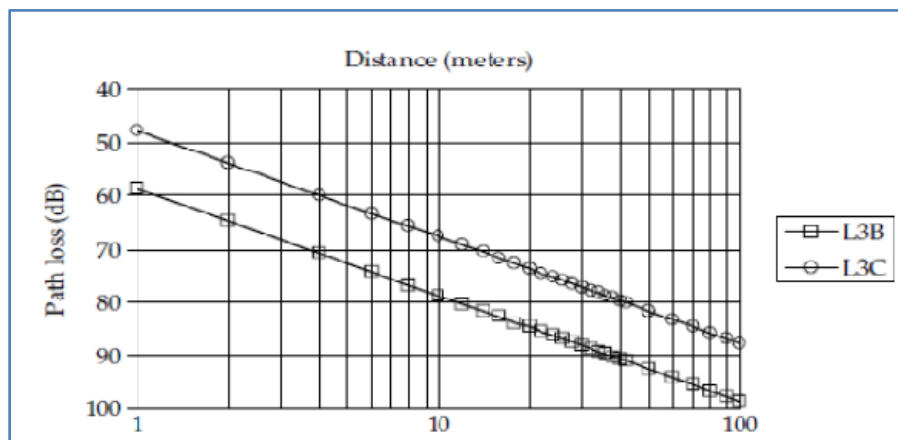
$$\text{Για } 900 \text{ MHz} \rightarrow L_{3C} = 31 + 20\log(r) + 1.9 + 14.8 \text{ dB}$$

Στην περίπτωση που έχουμε δύο εσωτερικούς τοίχους και δύο πατώματα, τότε στις ίδιες συχνότητες θα είναι:

$$\text{Για } 1800 \text{ MHz} \rightarrow L_{3B} = 37 + 20\log(r) + 2*3.4 + 2*18.3 \text{ dB}$$

$$\text{Για } 900 \text{ MHz} \rightarrow L_{3C} = 31 + 20\log(r) + 2*1.9 + 2*14.8 \text{ dB}$$

Η εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζει την απώλεια σήματος σύμφωνα με το πρότυπο Cost Action 231 για ένα πάτωμα και ένα εσωτερικό τοίχωμα για τις συχνότητες 1800 και 900 MHz. Σε υψηλότερη συχνότητα αντιστοιχεί και μεγαλύτερη απώλεια σήματος. Να σημειωθεί ότι η γραφική παράσταση είναι και πάλι γραμμική.



Εικόνα 25: Απώλεια σήματος σύμφωνα με το πρότυπο Cost Action 231

#### Πρότυπο #4

Το συγκεκριμένο πρότυπο βασίζεται σε μετρήσεις στα 5 GHz. Λαμβάνει υπόψη διάφορες παραμέτρους, όπως το γεγονός αν η περιοχή είναι αστική ή αγροτική, καθώς επίσης και αν υπάρχουν εμπόδια στην διαδρομή του σήματος. Για αστικές περιοχές όπου υπάρχει απευθείας οπτική επαφή (LOS), οι μετρήσεις περιγράφονται από την παρακάτω σχέση:

$$L_{4A} = 45.9 + 20.1\log(r) + 3.2 \text{ dB}$$

Ενώ αντίστοιχα για περιοχές όπου δεν υπάρχει απευθείας οπτική επαφή (NLOS) οι μετρήσεις δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$L_{4B} = 50,3 + 20.1\log(r) + 3.8\text{dB}$$

Παράδειγμα, αν η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι 20 μέτρα, τότε οι απώλειες και στις δύο περιπτώσεις θα είναι:

$$\text{LOS} \rightarrow L_{4A} = 45.9 + 20.1\log(20) + 3.2 \text{ dB}$$

Και αντίστοιχα

$$\text{NLOS} \rightarrow L_{4B} = 50.3 + 20.1\log(20) + 3.8\text{dB}$$

Στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ της φεμτοκυψέλης και του κινητού τερματικού είναι 34 μέτρα, τότε οι απώλειες σύμφωνα με το πρότυπο #4 θα είναι:

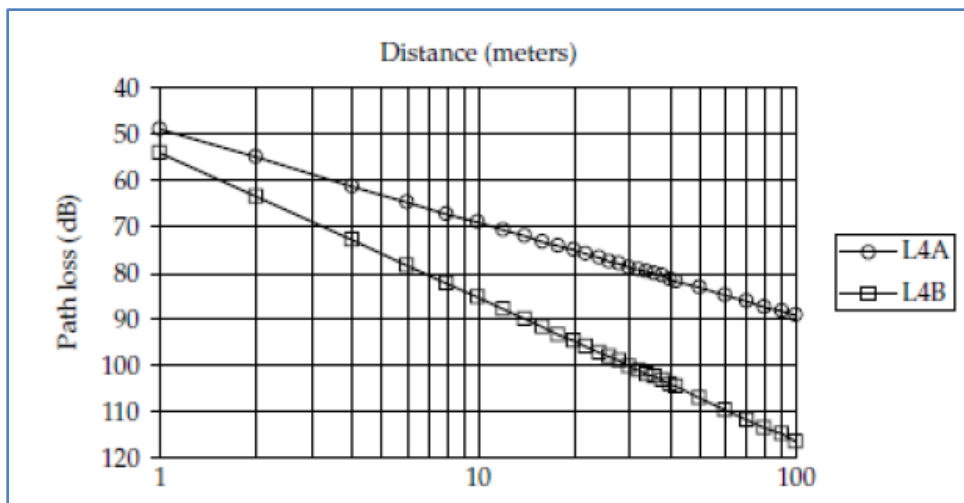
$$\text{LOS} \rightarrow L_{4A} = 45.9 + 20.1\log(34) + 3.2 \text{ dB}$$

Και αντίστοιχα

$$\text{NLOS} \rightarrow L_{4B} = 50.3 + 20.1\log(34) + 3.8\text{dB}$$

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της απώλειας σήματος κατά το πρότυπο #4 για τις παραπάνω περιπτώσεις. Η διαφορά απώλειας σήματος είναι περίπου 15 dB για απόσταση  $r = 10 \text{ m}$ .

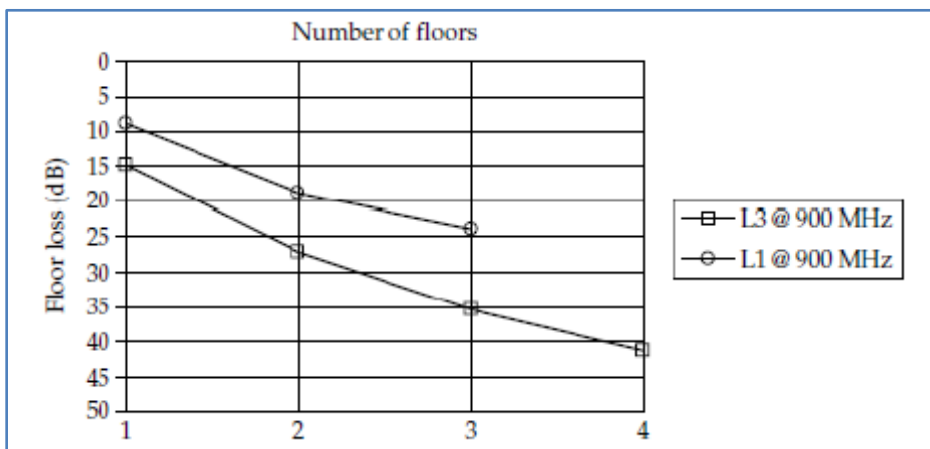




Εικόνα 26: Γραφική παράσταση απωλειών διαδρομής κατά το πρότυπο #4

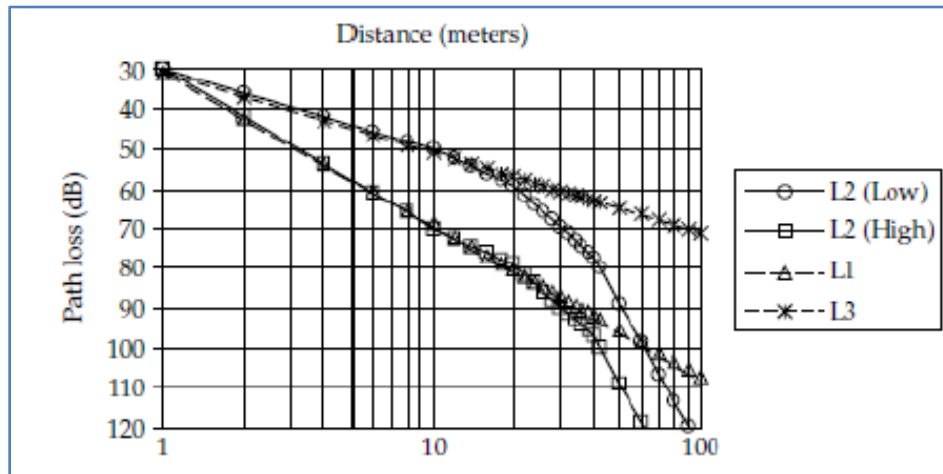
### 3.5.1 Σύγκριση προτύπων

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα συγκρίνουμε τα χαρακτηριστικά των προτύπων που προαναφέρθηκαν, βάση και των γραφικών παραστάσεων που προέκυψαν. Αρχικά, η πρώτη σύγκριση η οποία αποτυπώνεται και στην εικόνα 27, δείχνει την επίδραση της προσθήκης πατωμάτων στην απώλεια σήματος για συχνότητα 900 MHz. Τα δύο συγκρινόμενα πρότυπα (#1 και #3), διαφέρουν κατά 5 dB για ένα πάτωμα. Είναι φανερό ότι καθώς λαμβάνονται υπόψη περισσότερα πατώματα, η διαφορά των δύο προτύπων αυξάνεται.



Εικόνα 27: Απώλεια σήματος με βάση τον αριθμό πατωμάτων, ανάμεσα στο πρότυπο #1 και #3

Στην εικόνα 28 παρουσιάζεται η απώλεια σήματος με βάση τα πρότυπα #1, #2 και #3 για συχνότητα 900 MHz. Παρατηρούμε ότι τα πρότυπα συγκλίνουν ικανοποιητικά μέχρι  $r = 20$  m, ενώ αποκλίνουν για μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ του femtocell και του κινητού τερματικού.



Εικόνα 28: Γραφική παράσταση απώλειας σήματος μεταξύ των προτύπων #1, #2 και #3



Κεφάλαιο 4

Κατάσταση αγοράς

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα femtocell

## **4.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφορα θέματα σχετικά με την κοστολόγηση των φεμτοκυψελών. Ακόμη παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των οικιακών σταθμών βάσης, τόσο για τους χρήστες όσο και για τους παρόχους, καθώς επίσης και οι περιοριστικοί παράγοντες χρησιμοποίησής τους.

## **4.2 Κατάσταση της τηλεπικοινωνιακής αγοράς**

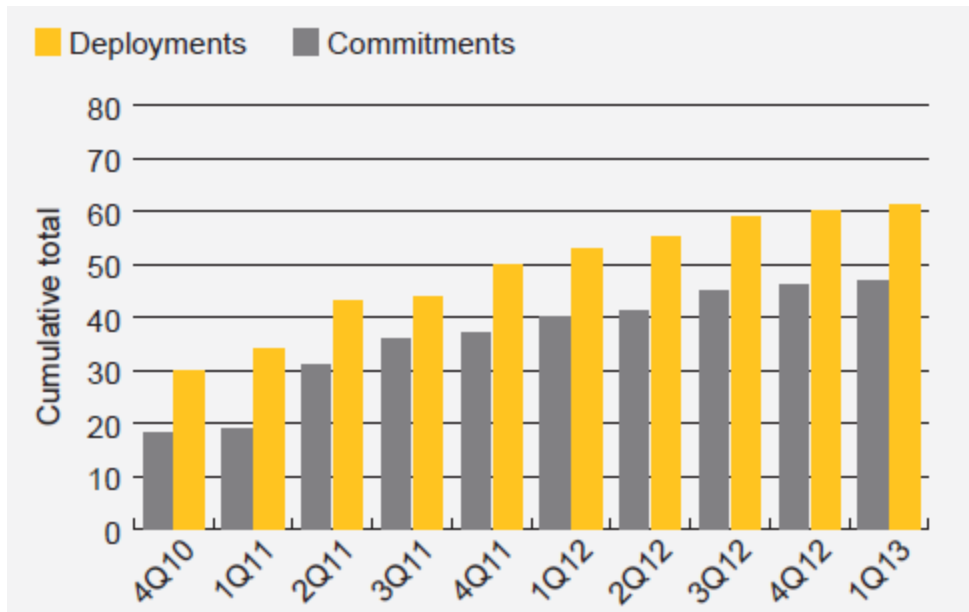
Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιασθούν θέματα τα οποία αφορούν την κατάσταση της τηλεπικοινωνιακής αγοράς σήμερα, καθώς επίσης και χρήσιμα παραδείγματα για την κοστολόγηση των φεμτοκυψελών, για κάθε εταιρία ξεχωριστά, η οποία δραστηριοποιείται στο χώρο αυτό.

Η έκθεση που παρουσιάζεται παρακάτω για την κατάσταση της αγοράς στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, παρέχει τις διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται κατά καιρούς, και αναφέρεται στους φορείς παροχής υπηρεσιών femtocell καθώς επίσης και στους κατασκευαστές αυτών. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται είναι αποτέλεσμα έρευνας και αναζήτησης σε διάφορα blogs και ιστοσελίδες, για το μέσο του έτους 2013, από οργανισμούς και ομάδες που ασχολούνται με το συγκεκριμένο θέμα.

### **4.2.1 Πρόσφατες εξελίξεις στην αγορά**

Σύμφωνα με έρευνες, είναι πλέον γνωστό ότι η αγορά των φεμτοκυψελών γνωρίζει μεγάλη αποδοχή και άνθιση, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχουν περισσότερες από 100 χιλιάδες χρησιμοποιούμενες συσκευές femtocell σε όλο τον κόσμο. Η μεγάλη εξάπλωση των ιδιωτικών σταθμών βάσης, έγκειται στο γεγονός ότι οι χρήστες τηλεπικοινωνιακών δικτύων παγκοσμίως, έχουν εκφράσει μεγάλο ενδιαφέρον για τις κυψέλες μικρού μεγέθους. Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του 2011, το 60% των χρηστών θεωρούν ότι τα μικρά κύτταρα θα είναι σημαντικότερα από τα macrocells για μια αποτελεσματική στρατηγική επέκτασης LTE. Ταυτόχρονα, 8 από τις 10 κορυφαίες εταιρίες παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, προσφέρουν και υπηρεσίες femtocell, συμπεριλαμβανομένων τις Vodafone, Cosmote, Telefonica, Deutsche Telecom κα. Έτσι πλέον, υπηρεσίες ιδιωτικών σταθμών βάσης

παρέχονται σε 37 χώρες παγκοσμίως, αριθμός που αναμένεται να αυξηθεί με την πάροδο του χρόνου. Το διάγραμμα που ακολουθεί αποτυπώνει την ραγδαία αύξηση των παρόχων που προσφέρουν υπηρεσίες femτοκυψελών. Είναι φανερό, ότι το ενδιαφέρον των παρόχων έχει αυξηθεί κατά 200% μέσα σε ένα έτος, ενώ έχουν υπάρξει επιπλέον δεσμεύσεις και ανακοινώσεις παρόχων, που θέλουν να εμπλακούν στην τεχνολογία των femτοκυψελών.



Εικόνα 29: Αριθμός παρόχων που ασχολούνται με την παροχή υπηρεσιών femτοcells

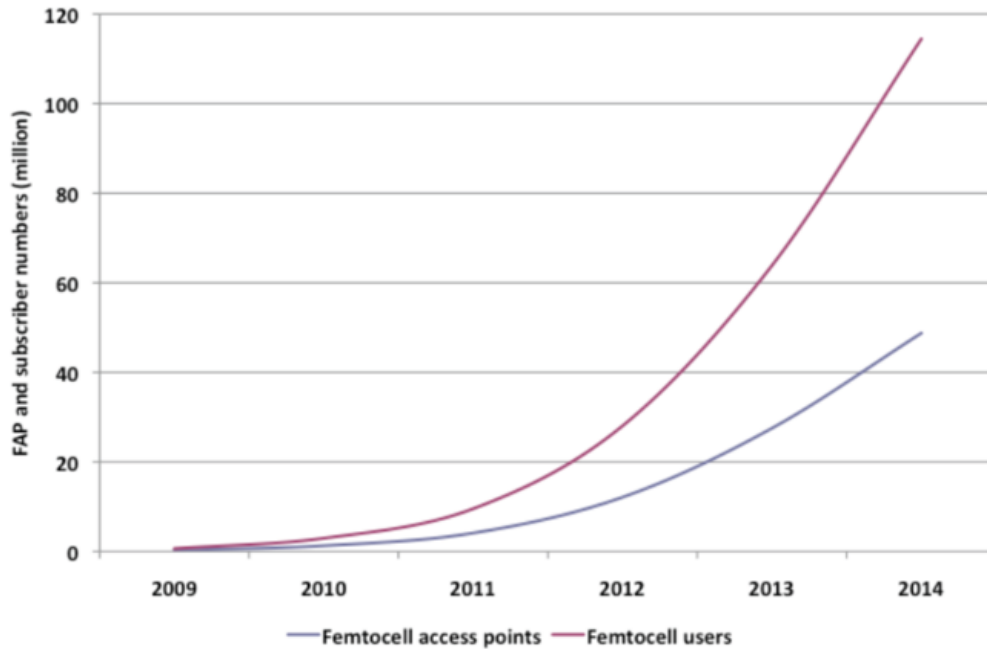
Στην εικόνα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι περιοχές στις οποίες παρέχονται υπηρεσίες femτοκυψελών, καθώς επίσης και ο ανταγωνισμός που υπάρχει.



Εικόνα 30: Ανταγωνισμός αγορών femtocell

Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνονται οι περιοχές στις οποίες υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός. Με πορτοκαλί χρώμα απεικονίζονται οι χώρες στις οποίες υπάρχει μικρότερος και τέλος με κίτρινο και πράσινο χρώμα φαίνονται οι περιοχές όπου ο ανταγωνισμός είναι μικρότερος σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες που προαναφέρθηκαν.











Οι διάφοροι αναλυτές αναμένουν να υπάρξει ακόμη μεγαλύτερη απήχηση και αποδοχή των οικιακών σταθμών βάσης στο μέλλον, σε τέτοιο βαθμό, όπου τα σημεία πρόσβασης femtocell (FAP) θα φτάσουν τα 48 εκατομμύρια, ενώ οι χρήστες αυτών, τα 120 εκατομμύρια περίπου, μέχρι το έτος 2014. Το διάγραμμα που ακολουθεί επεξηγεί αναλυτικότερα τις παραπάνω προβλέψεις.



Εικόνα 31: Πρόβλεψη αγοράς για τον αριθμό των femtocell και των χρηστών στα επόμενα έτη

#### 4.2.2 Κοστολόγηση υπηρεσιών femtocell

Δεδομένου ότι ο αριθμός των φεμτοκυψελών συνεχίζει να αυξάνεται, αρκετοί πάροχοι σπεύδουν αυτή την περίοδο να προωθήσουν τις υπηρεσίες τους, ενώ αντίθετα ορισμένοι τοποθετούν femtocells και σε δημόσιους χώρους έτσι ώστε να αυξήσουν την ραδιοκάλυψη και την χωρητικότητα των δικτύων τους. Να σημειωθεί ότι υπάρχουν αρκετές αγορές οι οποίες υπόκεινται σε ανταγωνισμό και αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι αρκετοί πάροχοι παρουσιάζουν τους ιδιωτικούς σταθμούς βάσης σαν κάποιο επιπλέον πλεονέκτημα, ενώ κάποιοι άλλοι προωθούν τις φεμτοκυψέλες για να εξετάσουν τη καταναλωτική ζήτηση. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται η κοστολόγηση, οι υπηρεσίες, καθώς επίσης και η ημέρα κυκλοφορίας της φεμτοκυψέλης από την κάθε εταιρία. Ο πίνακας παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς παρατηρούμε ότι κάθε εταιρία εφαρμόζει διαφορετική πολιτική κοστολόγησης για το ίδιο προϊόν. Ενδεικτικά παρουσιάζονται 10 από τις συνολικά 47 εταιρίες που υπάρχουν σε διάφορες χώρες του κόσμου.

No	Company	Offering	Example Pricing	Capabilities	Launch date
1	 USA	Consumer and Enterprise: Airave	\$4.99 per month (\$10 for unlimited calling, \$20 for family plans)	Up to 6 3G users	September 2007
2	 singapore	Consumer: Home Zone (UMTS)	\$32.1 per month	Up to 4 3G (postpaid) users	November 2008
3	 USA	Consumer and Enterprise: Network Extender	\$249.99	Up to 3 2G 1xRTT users	January 2009
4	 UK	Consumer: Sure Signal (UMTS/HSPA)	Various options £50 upfront Free for >£45 contracts	Up to 4 3G users	July 2009 (Access Gateway) Rebranded January 2010
5	 USA	Consumer: 3G MicroCell	\$159	Up to 4 3G users	September 2009
6	 Japan	Consumer: au Femtocell (CDMA2000 EV-DO)	Free of charge (in coverage deadspots)	Up to 4 3G users	July 2010
7	 Japan	Consumer: My Area (UMTS/HSPA)	\$10 per month	Up to 4 3G users	November 2009
8	 Russia	Consumer: Minicells	Free	Up to 4 users	May 2011
9	 Greece	Consumer: Vodafone Access Gateway	Free of charge (> 40 E monthly contract) 75 E (<40 E monthly). 150 E retail price	Up to four 3G users	July 2010
10		Consumer: Perfect Signal	Upfront cost: €90 Discounts for postpaid subscribers	Up to four users	October 2011

Πίνακας 5: Κοστολόγηση και υπηρεσίες διάφορων εταιριών

Στο κόκκινο πλαίσιο απεικονίζονται οι εταιρίες που παρέχουν αυτή τη στιγμή υπηρεσίες φεμτοκυβελών στην Ελλάδα. Παρατηρούμε ότι υπάρχει διαφορά περίπου



ενός έτους στην ημερομηνία κυκλοφορίας των φεμτοκυψελών από τους δύο παρόχους. Να σημειωθεί ότι οι πληροφορίες που αποτυπώνονται στον παραπάνω πίνακα, αφορούν το πρώτο τετράμηνο του έτους 2013. Οι τιμές και οι υπηρεσίες συνεχώς μεταβάλλονται.

### **4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα**

Η εισαγωγή της φεμτοκυψέλης στο δίκτυο, γεννά αρκετά ερωτήματα σχετικά με τις επιδόσεις, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, καθώς επίσης και τους περιορισμούς που προκύπτουν, σε σχέση πάντα με τις κυψέλες μεγαλύτερου μεγέθους του δικτύου. Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται διάφορα πλεονεκτήματα για τον χρήστη, καθώς επίσης και για τον πάροχο του δικτύου.

#### **4.3.1 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί για τον χρήστη του femtocell**

Η τοποθέτηση μιας φεμτοκυψέλης στο εσωτερικό μιας οικίας ή ενός κτηρίου, δημιουργεί αρκετά οφέλη για τους χρήστες που πρόκειται να χρησιμοποιήσουν τις υπηρεσίες που τους παρέχονται. Κάποια από τα σημαντικότερα οφέλη είναι:

- **Απλή εγκατάσταση.** Πρέπει η εγκατάσταση της φεμτοκυψέλης να είναι όσο το δυνατόν απλούστερη έτσι ώστε να μειώνονται οι πιθανότητες λαθών από τον χρήστη.
- **Αυξημένοι ρυθμοί μετάδοσης για τον χρήστη.** Οι χρήστες που βρίσκονται πιο κοντά στον σταθμό βάσης θα έχουν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από αυτούς που βρίσκονται πλησιέστερα στα όρια της μακροκυψέλης.

- **Καλύτερη ενδοοικιακή κάλυψη.** Η τοποθέτηση της φεμτοκυψέλης στο εσωτερικό της οικίας μειώνει την απώλεια σύνδεσης κατά 10-15 dB.
- **Μείωση της κατανάλωσης ισχύος.** Ο χρήστης δεν χρειάζεται να πια να μεταδίδει δεδομένα με υψηλή ισχύ, αφού η φεμτοκυψέλη βρίσκεται κοντά στο χρήστη. Αυτό σημαίνει μικρότερο ρεύμα από την μπαταρία γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερους χρόνους αναμονής και ομιλίας, αλλά ταυτόχρονα χαμηλότερη ηλεκτρομαγνητική επιβάρυνση για το χρήστη.
- **Νέες εφαρμογές και ενισχυμένες εφαρμογές πολυμέσων και υπηρεσιών IP.** Παράδειγμα εφαρμογές βίντεο, μουσική κλπ.
- **Βελτιωμένη ποιότητα φωνής.** Επιτρέπεται η χρήση κωδικοποιητών φωνής με μεγαλύτερες δυνατότητες μεταφοράς δεδομένων.
- **Μεγαλύτερη ασφάλεια.** Πιστοποίηση αυθεντικότητας από την πλευρά του χρήστη.
- **Βελτίωση της ικανοποίησης πελατών,** λόγω της βελτιωμένης κάλυψης και των αυξημένων ρυθμών μεταφοράς δεδομένων.

Υπάρχουν όμως και περιορισμοί ή και πιθανά μειονεκτήματα για την χρήση των μικροκυψελών. Μερικά από αυτά είναι:

- **Λογαριασμός.** Ξεχωριστός λογαριασμός για την φεμτοκυψέλη. Η συσσώρευση διαφορετικών λογαριασμών θα αποθαρρύνει την υιοθέτηση της τεχνολογίας φεμτοκυψελών από τους χρήστες.

- **Μετρήσεις.** Όταν εγκαθίστανται πολλές φεμτοκυψέλες το κινητό τερματικό που συνδέεται με τη μακροκυψέλη δεν θα είναι μόνο σε θέση να κάνει μετρήσεις στις μακροκυψέλες αλλά και στις φεμτοκυψέλες που συναντά. Το μειονέκτημα που προκύπτει είναι ότι πιθανόν το δίκτυο γεμίζει με αναφορές από τις επιπλέον μετρήσεις επιβαρύνοντας επιπλέον το δίκτυο.
- **Οικιακοί πόροι.** Κάλυψη κενών χώρων της οικίας και επιπλέον κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας επιβαρύνοντας τον προϋπολογισμό της οικίας.

#### **4.3.2 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί για τον πάροχο του δικτύου**

Κάποια από τα αρκετά πλεονεκτήματα, που προσφέρει η χρήση των φεμτοκυψελών στους παρόχους του δικτύου παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Αύξηση εσόδων.** Η δυνατότητα χρήσης φεμτοκυψελών θα προσθέσει πιθανώς πελάτες και προφανώς η νέα υπηρεσία θα χρεώνεται.
- **Μειωμένο κόστος.** Καθώς οι πάροχοι προσπαθούν να αυξήσουν την κάλυψη και την χωρητικότητα του δικτύου, μεγαλώνει η πολυπλοκότητα και το κόστος. Έτσι αντί να μικραίνουμε συνεχώς τις κυψέλες και να περνάμε από την μάκρο στην μικρο κυψέλη κτλ, περνάμε τα δεδομένα από το διαδίκτυο το οποίο υφίσταται εδώ και δεκαετίες. Έτσι δεν χρειάζεται να δημιουργήσουμε νέα δίκτυα χρησιμοποιώντας νέο εξοπλισμό διατηρώντας το κόστος σε χαμηλά επίπεδα.
- **Αυξημένη χωρητικότητα.** Η μετακίνηση των χρηστών στην μικροκυψέλη απελευθερώνει πόρους του δημόσιου δικτύου. Έτσι αυξάνεται και ο αριθμός των χρηστών που συνδέονται στην μακροκυψέλη.
- **Βελτιωμένη εσωτερική κάλυψη.** Η τοποθέτηση της φεμτοκυψέλης εντός της οικίας η του γραφείου θα επεκτείνει την περιοχή κάλυψης.

- **Ενισχυμένες υπηρεσίες.** Χρησιμοποιώντας το διαδίκτυο για την μεταφορά της φωνής και των δεδομένων, μπορούν να δημιουργηθούν και νέες υπηρεσίες προς τους χρήστες με βάση το πρότυπο IP.
- **Ανταγωνισμός με άλλες τεχνολογίες.** Χρησιμοποίηση του κυψελοειδούς δικτύου για πρόσβαση στο διαδίκτυο και όχι του WLAN, επειδή οι ταχύτητες μεταφοράς των δεδομένων θα είναι παρόμοιες λόγω του femtocell.
- **Βελτιωμένη ικανοποίηση χρήστη,** λόγω της βελτιωμένης κάλυψης και των αυξημένων ρυθμών μεταφοράς δεδομένων.

Να σημειωθεί ότι προκύπτουν διάφορα εμπόδια, θέματα και ερωτήματα που σχετίζονται με την επίδραση της χρήσης των φεμτοκυψελών στην πολυπλοκότητα της ήδη πολυπλόκου τηλεφωνικής συσκευής. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το κινητό τερματικό, θα πρέπει να υποστεί διάφορες τροποποιήσεις έτσι ώστε να είναι σε θέση να προειδοποιεί τον χρήστη όταν αυτός βρίσκεται εντός της φεμτοκυψέλης, να παρέχει την κατάλληλη σήμανση για την ποιότητα του σήματος της φεμτοκυψέλης κτλ. Οι παραπάνω τροποποιήσεις συνεπάγονται αυξημένο κόστος αλλά και πολυπλοκότητα για το κινητό τερματικό. Το σημαντικότερο ίσως μειονέκτημα της χρήσης των προσωπικών σταθμών βάσης, είναι η ύπαρξη παρεμβολών οι οποίες θα μελετηθούν διεξοδικά στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Οι φεμτοκυψέλες χρειάζονται ειδικό υλικό (hardware). Έτσι οι δρομολογητές WiFi ή DSL δεν μπορούν να συνδεθούν με μια φεμτοκυψέλη. Οι οικιακοί σταθμοί βάσης, έχουν μηχανισμό που ειδοποιούν τον πάροχο όταν αλλάξει η τοποθεσία τους. Οι εταιρίες μπορεί να επιτρέπουν ή όχι την μετακίνηση της φεμτοκυψέλης σε άλλη τοποθεσία. Η αλλαγή χώρας δεν επιτρέπεται, καθώς κάθε femtocell μεταδίδει σε συγκεκριμένες συχνότητες, οι οποίες χρησιμοποιούνται από διαφορετικές εταιρίες σε διαφορετικές χώρες.

#### **4.4 Θέματα υγείας και ασφάλειας**

Οι φεμτοκυψέλες εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τα επίπεδα ισχύος όμως, είναι χαμηλότερα από διατάξεις όπως τα σημεία πρόσβασης Wi-Fi ή τα ασύρματα τηλέφωνα. Οι ιδιωτικοί σταθμοί βάσης, εκπέμπουν ραδιοκύματα χαμηλής ισχύος και σχετικά χαμηλής συχνότητας. Στις συχνότητες που εκπέμπουν τα femtocells, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται μη ιονίζουσα σε αντίθεση πχ με αυτή των ραδιενεργών πηγών. Οπότε η κύρια επίδραση των ραδιοκυμάτων αφορά την θέρμανση των ιστών. Στην περίπτωση των φεμτοκυψελών αυτή η θέρμανση είναι εξαιρετικά μικρή. Η πιθανή επίδραση στην υγεία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχει μελετηθεί αρκετά. Πολλές ανεξάρτητες αρχές έχουν διεξάγει έρευνα για το θέμα αυτό και η παγκόσμια οργάνωση υγείας έχει εκδώσει οδηγίες για να διασφαλίσει ότι αυτή η έρευνα διεξάγεται με τα κατάλληλα πρότυπα. Οι παραπάνω οργανισμοί έχουν καταλήξει στην γενική διαπίστωση ότι δεν υπάρχουν αποδεδειγμένες επιπτώσεις στην υγεία λόγω έκθεσης σε ραδιοκύματα κάτω από ορισμένα όρια. Πολλές κυβερνήσεις υποχρεώνουν τους κατασκευαστές να τηρούν αυτά τα όρια, αν και αυτό δεν συμβαίνει πάντοτε. Τα όρια αυτά αφορούν κυρίως την απορρόφηση ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα. Η απορρόφηση μετριέται με όρους Ειδικού Ρυθμού Απορρόφησης Ενέργειας (SAR) που μετρά τον ρυθμό με τον οποίο απορροφάται η ενέργεια από το σώμα όταν αυτό εκτίθεται σε ραδιοκύματα. Είναι γνωστό ότι ο SAR ο οποίος έχει σχέση με τις φεμτοκυψέλες, δεν είναι τόσο μεγάλος έτσι ώστε να χαρακτηρίζεται ως επικίνδυνος και αυτό οφείλεται τόσο στην συχνότητα όσο και στην ισχύ που χρησιμοποιούν οι φεμτοκυψέλες.

Συνοψίζοντας, οι πωλητές οικιακών σταθμών βάσης, πρέπει να φροντίζουν να βρίσκονται εντός των ορίων των ανεξάρτητων αρχών. Η χαμηλή ισχύς των φεμτοκυψελών σήμερα αποτελεί ένδειξη ότι δεν δημιουργούν πρόβλημα στην υγεία. Περισσότερες ανησυχίες χρειάζονται για τα ασύρματα τηλέφωνα και τα σημεία πρόσβασης Wi-Fi.



## Κεφάλαιο 5

### Παρεμβολές

## 5.1 Εισαγωγή

Η εμφάνιση παρεμβολών είναι το μεγαλύτερο ζήτημα που έχει να αντιμετωπίσει η τεχνολογία φεμτοκυψελών. Οι παρεμβολές μπορεί να αφορούν την αλληλεπίδραση με τις μακροκυψέλες (διαφορετικού επιπέδου), είτε τις φεμτοκυψέλες μεταξύ τους (ίδιου επιπέδου). Σημαντικό ρόλο στις παρεμβολές παίζει και η προσέγγιση που ακολουθείται στην εφαρμογή τους. Συγκεκριμένα, οι φεμτοκυψέλες μπορεί να είναι:

1. Ανοιχτής ή κλειστής πρόσβασης. Αυτό σημαίνει ότι είτε μπορεί να συνδεθεί οποιοσδήποτε βρίσκεται εντός εμβέλειας είτε μόνο τα μέλη ενός προκαθορισμένου συνόλου (CSG ή Closed Subscriber Group), όπως τα μέλη μιας οικογένειας. Η πρώτη περίπτωση είναι αρκετά ανθεκτική σε ζητήματα παρεμβολών, αφού ο χρήστης απλά συνδέεται στον σταθμό που προσφέρει το ισχυρότερο σήμα. Πρόβλημα προκύπτει μόνο όταν κινείται με μεγάλη ταχύτητα και δεν προλαβαίνει τις μεταβάσεις στα δίκτυα (τα φέμτο υποστηρίζουν ταχύτητες έως 30km/h). Αντίθετα στην περίπτωση της κλειστής πρόσβασης, που είναι και η συνηθέστερη, ο συνδρομητής μπορεί να αντιμετωπίσει σημαντικότερα προβλήματα αν βρίσκεται σε κοντινή απόσταση στο σταθμό βάσης της φεμτοκυψέλης και δεν έχει πρόσβαση σε αυτό.

2. Αφιερωμένου ή κοινού καναλιού. Αν θα μοιράζονται ή όχι δηλαδή, κανάλι με κάποιο υπάρχον δίκτυο. Προφανώς η δεύτερη παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία, αλλά και την μεγαλύτερη αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων. Η πρώτη περίπτωση είναι αρκετά ανθεκτική, αν και συνεχίζουν να υπάρχουν μικρές παρεμβολές, ειδικά όταν πρόκειται για παρεμφερή κανάλια. Παρούσες είναι βέβαια και οι παρεμβολές κοινού καναλιού μεταξύ γειτονικών φεμτοκυψελών.

3. Σταθερής μέγιστης ισχύος εκπομπής ή προσαρμοζόμενης βάσει της κατάστασης των δικτύων. Την σταθερή μέγιστη ισχύ είναι σημαντικό να την ορίσουμε ώστε να «σέβεται» τα άλλα δίκτυα ακόμα και εκεί που το σήμα τους είναι ασθενές (π.χ. στα όρια της εμβέλειας της μακροκυψέλης). Αυτό μειώνει τις παρεμβολές αλλά και τις επιδόσεις του συστήματος αφού οι περιορισμοί εφαρμόζονται χωρίς διακρίσεις. Η δεύτερη μέθοδος αποφασίζει δυναμικά άρα και πιο σωστά, αλλά είναι και περισσότερο περίπλοκη.

## 5.2 Σενάρια παρεμβολών

Οι παρεμβολές που εμφανίζονται με την παρουσία των φεμτοκυψελών χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία αφορά τις παρεμβολές που προκαλεί η παρουσία φεμτοκυψελών ή η σύνδεση συσκευής σε αυτές, στο σήμα της μακροκυψέλης, ειδικά σε περιοχές που βρίσκονται στα όρια της εμβέλειας της τελευταίας και το σήμα είναι ιδιαίτερα ασθενές.

Η χειρότερη περίπτωση είναι η περίπτωση κοινού καναλιού και κλειστής πρόσβασης, δημιουργώντας έντονα προβλήματα σε όσους εξυπηρετούνται από τη μακροκυψέλη ενώ βρίσκονται κοντά σε σταθμό βάσης HNB.

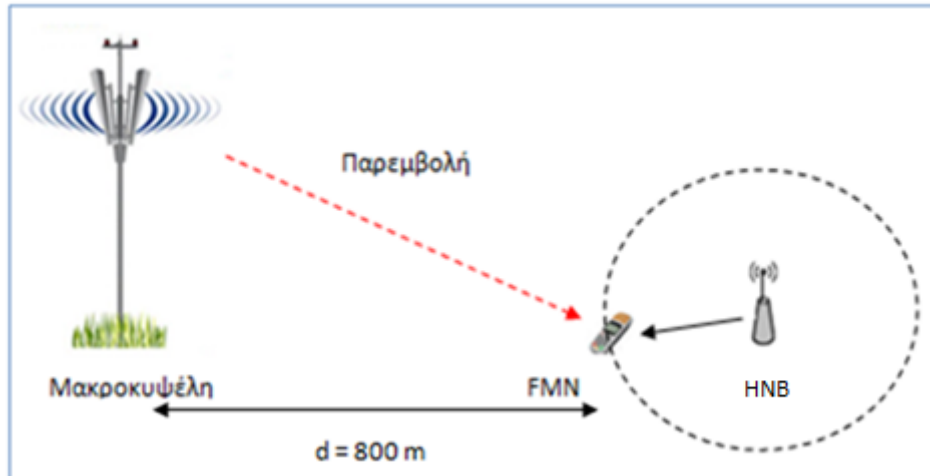
Η δεύτερη κατηγορία παρεμβολών αφορά την επίδραση του MBS στην κάλυψη των φεμτοκυψελών. Λόγω της τοπικής φύσης των τελευταίων είναι αναμενόμενο το πρόβλημα να εμφανίζεται κυρίως σε σημεία πολύ κοντά στο MBS.

Η τρίτη κατηγορία παρεμβολών αφορούν τις παρεμβολές μεταξύ γειτονικών φεμτοκυψελών. Εκτός από κάποιες περιπτώσεις (όπως η περίπτωση διαμοιρασμού συχνότητας που αναφέρθηκε), οι HNB λειτουργούν στην ίδια συχνότητα, γεγονός που εγκυμονεί προβλήματα. Ο τοπικός χαρακτήρας όμως των φεμτοκυψελών, και ο μονωτικός ρόλος των εξωτερικών τοίχων, λειτουργούν υπέρ της απομόνωσης μεταξύ γειτονικών HNB.

### **5.2.1 Παρεμβολές μακροκυψέλης προς χρήστη ο οποίος λαμβάνει υπηρεσίες από προσωπικό σταθμό βάσης**

Στο σενάριο που ακολουθεί μελετάμε την περίπτωση όπου ένα κινητό τερματικό βρίσκεται κοντά στο παράθυρο ενός διαμερίσματος και σε απόσταση 800 μέτρων από το σταθμό βάσης μακροκυψέλης. Το κινητό τερματικό (FMN) είναι συνδεδεμένο με τη φεμτοκυψέλη στο όριο της περιοχής κάλυψης του. Στόχος του σεναρίου είναι η μελέτη των παρεμβολών που δέχεται ο χρήστης από την επίδραση της μακροκυψέλης. Ο παρεμβολέας, δηλαδή αυτός ο οποίος προκαλεί τις παρεμβολές είναι η μακροκυψέλη και ο δέκτης παρεμβολών είναι το κινητό τερματικό FMN. Στο σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνεται η τοπολογία του δικτύου που μελετάμε. Με κόκκινο χρώμα παριστάνεται η ύπαρξη της παρεμβολής.





Εικόνα 32: Τοπολογία σεναρίου 1

Σχεδιάζουμε το δίκτυο έτσι ώστε το κινητό τερματικό που εξυπηρετείται από τη φεμτοκυψέλη να είναι εντός των ορίων της περιοχής κάλυψης της μακροκυψέλης. Θεωρούμε ακτίνα 1500 μέτρα για τη μακροκυψέλη, οπότε τοποθετούμε το κινητό τερματικό σε απόσταση 800 μέτρων από αυτή, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Οι υποθέσεις που κάνουμε είναι οι εξής: Αρχικά θεωρούμε επίπεδο χρήσης μακροκυψέλης 50 %. Η ισχύς εκπομπής της μακροκυψέλης ορίζεται σε  $PT\_macroBS = 40$  dBm και το κέρδος της κεραίας  $Gain\_macroBS = 15$  dBi. Θα υπολογίσουμε το EIRP (Equivalent isotropically radiated power) το οποίο είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό της ισχύος.

$$EIRP = PT\_macroBS + Gain\_macroBS + 10\log(0.5) = 40 + 15 + 3 = 58 \text{ dBm}$$

Θεωρούμε ότι το ύψος του σταθμού βάσης της μακροκυψέλης ανέρχεται σε 47 μέτρα και αυτό του κινητού τερματικού σε 1.5 μέτρα. Οι απώλειες λόγω των τοιχωμάτων ανέρχονται σε  $w = 5$  dB και η συχνότητα λειτουργίας ορίζονται τα 2100 MHz. Θα εφαρμόσουμε το μοντέλο Okumura Hata για την απόσταση των 800 μέτρων έτσι ώστε να βρούμε την ισχύ που δέχεται το κινητό τερματικό στην απόσταση αυτή.

$$L = 69.55 + 26.16\log_{10}(f) - 13.82\log_{10}(hb) + (44.9 - 6.55\log_{10}(hb))\log_{10}(d) - a(hmu)$$

$$\text{Όπου } a(hmu) = 3.2(\log_{10}(11.75hmu))^2 - 4.97 \text{ για συχνότητα } (f \geq 400 \text{ MHz})$$

Ορίζουμε σαν  $d$ , την απόσταση σε χιλιόμετρα, μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού τερματικού. Για  $d = 800$  μέτρα και κάνοντας τις πράξεις προκύπτει ότι  $L = 120$  dBm.

Η ισχύς που λαμβάνει το κινητό τερματικό από τη μακροκυψέλη για την παραπάνω απόσταση είναι

$$P_M = \text{EIRP} - L = 58 - 120 = -62 \text{ dBm}$$

Απόσταση (d)	Απώλειες (L)	Ισχύς (P = EIRP <sub>F</sub> - L)
50 (1000)	123	-65
100 (950)	122	-64
150 (900)	121	-63
200 (850)	121	-63
250 (800)	120	-62

Η απόσταση των 50 μέτρων που γράφουμε στο παραπάνω πίνακα στην ουσία αποτυπώνει την απόσταση των 1000 μέτρων μεταξύ του σταθμού βάσης μακροκυψέλης και του κινητού τερματικού. Ο λόγος που γράφουμε 50 μέτρα είναι για να μπορέσουμε να εξάγουμε κοινό γράφημα, μεταξύ της φεμτοκυψέλης και της μακροκυψέλης, έτσι ώστε να αποτυπωθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι όποιες ομοιότητες, αλλά και διαφορές, ανάμεσα στην ισχύ που λαμβάνει το κινητό τερματικό από τους δύο σταθμούς βάσης.

Κατόπιν θα υπολογίσουμε την ισχύ που μπορεί να λάβει το κινητό τερματικό από τον προσωπικό σταθμό βάσης. Θεωρούμε και πάλι ότι η φεμτοκυψέλη λειτουργεί στο 50 % της μέγιστης ισχύος οπότε προκύπτει και πάλι ότι το κέρδος από τη λειτουργία είναι  $10\log(0.5) = 3 \text{ dB}$ . Η ισχύς με την οποία μεταδίδει ο οικιακός σταθμός βάσης είναι  $P_{T\_femtoBS} = 20 \text{ dB}$ . Το κέρδος της κεραίας του σταθμού βάσης είναι  $\text{Gain\_femtoBS} = 2 \text{ dBi}$  και το κέρδος της κεραίας του κινητού τερματικού είναι μηδενικό.

Οπότε  $\text{EIRP}_F = P_{T\_femtoBS} + \text{Gain\_femtoBS} + 10\log(0.5) + \text{Gain\_femtoMS} = 20 + 2 + 3 + 0 = 25 \text{ dBm}$ .

Το μοντέλο απώλειας διαδρομής Okumura Hata δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιβάλλοντα φεμτοκυψελών. Έτσι έχουμε εισαγάγει ένα νέο μοντέλο για τον υπολογισμό της απώλειας. Αυτό είναι:

$$L = \max(15.3 + 37.6 \log_{10}(d), 37 + 20 \log_{10}(d)) + q_w + L_{ow}$$

Όπου  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ του χρήστη και του οικιακού σταθμού βάσης,  $q$  είναι ο αριθμός των τοιχωμάτων μεταξύ του χρήστη και της φεμτοκυψέλης,  $w$  είναι η απώλεια λόγω των τοιχωμάτων, όπου στο συγκεκριμένο σενάριο ορίζεται σαν  $w = 5$  dB και τέλος  $L_{ow}$  είναι οι απώλειες λόγω παραθύρων όπου στο συγκεκριμένο σενάριο είναι μηδενικές.

Στο σημείο αυτό, θα μελετήσουμε την απώλεια του σήματος σε σχέση με την απόσταση για να δούμε τη συμπεριφορά των παρεμβολών, για διάφορες αποστάσεις μεταξύ του κινητού τερματικού και του εκάστοτε σταθμού βάσης. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι απώλειες που προκύπτουν, καθώς επίσης και η ισχύς που δέχεται το κινητό τερματικό για τις αποστάσεις που αναγράφονται.

Απόσταση (d)	Απώλειες (L)	Ισχύς ( $P = EIRP_F - L$ )
150	26	-1
200	28	-3
250	30	-5

Εφόσον βρήκαμε την ισχύ που λαμβάνει το κινητό τερματικό από τους δύο σταθμούς βάσης, μένει πλέον να βρούμε τον SINR (Signal-to-interference-noise ratio) και τη ρυθμαπόδοση (Throughput). Οι τύποι υπολογισμού που θα χρησιμοποιηθούν και στα υπόλοιπα σενάρια περιγράφονται παρακάτω.

$$SINR = P / L + N \text{ dB}$$

Όπου  $P$  είναι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος,  $L$  είναι οι απώλειες που υπολογίζουμε είτε με το μοντέλο απώλειας Okumura Hata είτε με κάποιο άλλο μοντέλο, αναλόγως βέβαια και την περίπτωση και  $N$  είναι η ισχύς του θορύβου.

Για τον υπολογισμό της ισχύος του θορύβου στο συγκεκριμένο σενάριο αλλά και σε αυτά που ακολουθούν, χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

$$N = PT\_thema1\_noise = -174 + 10 \log_{10}(\text{Bandwidth})$$

Όπου το εύρος ζώνης ορίζεται να είναι Bandwidth = 10 MHz.

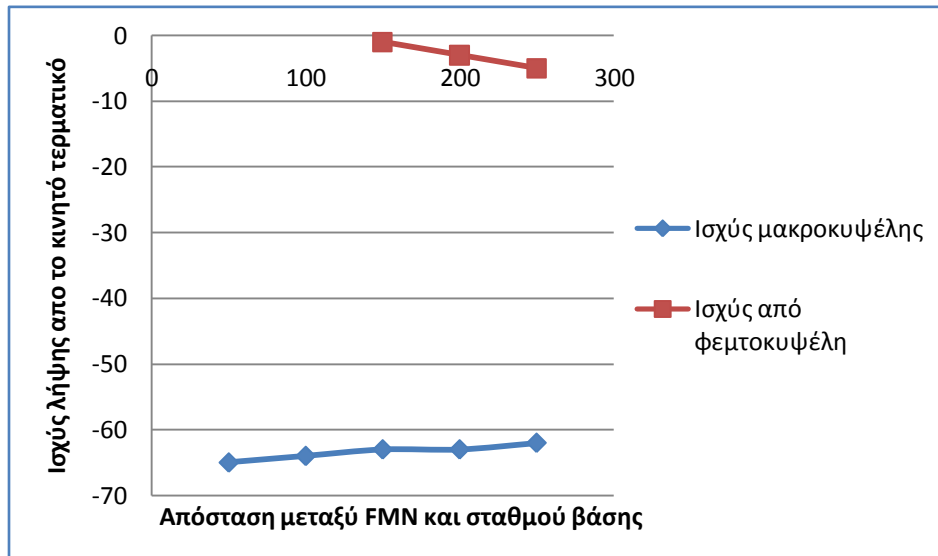
Η ρυθμαπόδοση υπολογίζεται από τον τύπο που ακολουθεί:

$$R = 3.84 \log_2(1 + \text{SINR}/2) \text{ Mbps}$$

Εφαρμόζοντας τους παραπάνω τύπους προκύπτει ο πίνακας που ακολουθεί

Απόσταση (d)	SINR	Ρυθμαπόδοση (R)
50	56.32	1.37
100	13.64	0.36
150	0.3	0.1

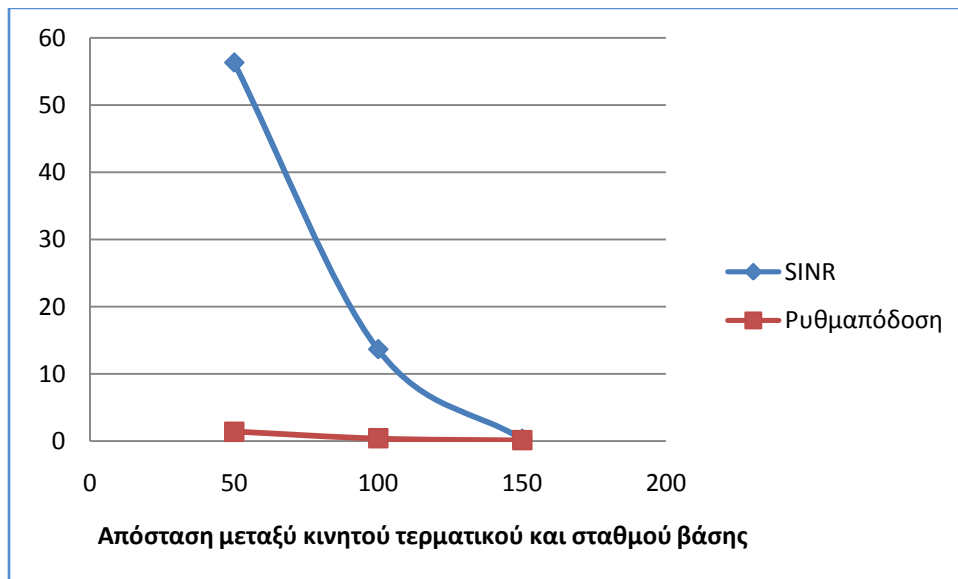
Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η ισχύς λήψης του κινητού τερματικού από τη μακροκυψέλη καθώς επίσης και από τον οικιακό σταθμό βάσης.



Εικόνα 33: Ισχύς λήψης κινητού τερματικού σε σχέση με την απόσταση

Παρατηρούμε ότι καθώς ο χρήστης απομακρύνεται από τη φεμτοκυψέλη, μειώνεται και η λαμβανόμενη ισχύς από το κινητό τερματικό (κόκκινη καμπύλη). Το παραπάνω συμπέρασμα είναι απολύτως λογικό, καθώς όταν ο χρήστης απομακρύνεται από το σταθμό βάσης, πλησιάζει τα όρια της περιοχής κάλυψης αυτού, όπου η ισχύς είναι χαμηλότερη λόγω της μεγαλύτερης απόστασης που μεσολαβεί. Όταν ο χρήστης απομακρύνεται από τη φεμτοκυψέλη, ταυτόχρονα πλησιάζει ακόμη περισσότερο το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται η λαμβανόμενη ισχύς από το χρήστη και κατ' επέκταση και η παρεμβολή που αυτός δέχεται. Στο γράφημα η αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος από τη μακροκυψέλη, αποτυπώνεται από την ανοδική πορεία που έχει η γαλάζια καμπύλη σε σχέση με την απόσταση.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του SINR καθώς επίσης και της ρυθμαπόδοσης για το κινητό τερματικό σε σχέση με την απόσταση.



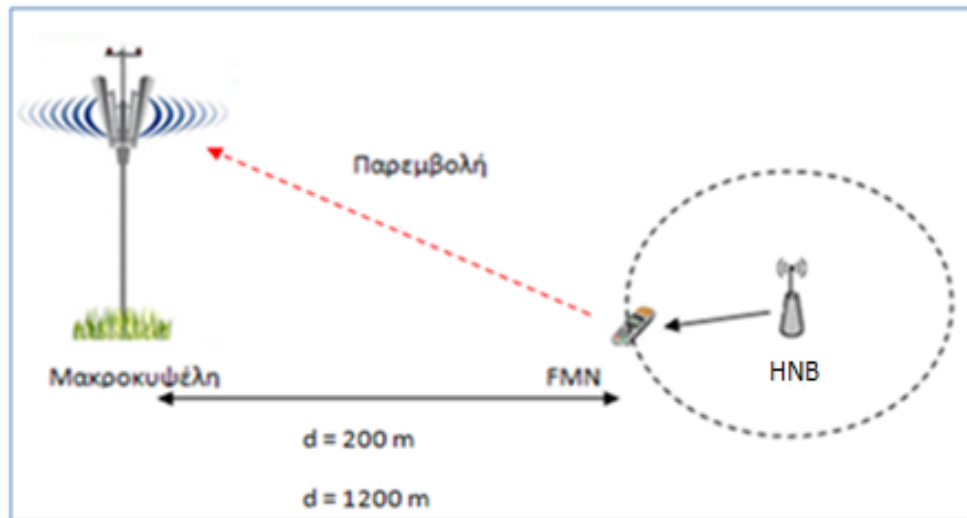
Εικόνα 34: SINR και ρυθμαπόδοση κινητού τερματικού σε σχέση με την απόσταση

Είναι φανερό ότι καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ του κινητού τερματικού και του οικιακού σταθμού βάσης, μειώνεται ο SINR και η ρυθμαπόδοση. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς όσο απομακρύνεται το κινητό τερματικό από τη φεμτοκυψέλη, τόσο αυξάνονται και οι παρεμβολές που δέχεται από τη μακροκυψέλη, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας επικοινωνίας. Παρατηρούμε μεγάλη πτώση στον SINR καθώς αυξάνεται η απόσταση. Ο σηματοθρομβικός λόγος

τείνει να γίνει μηδενικός για την απόσταση των 150 μέτρων. Αυτό συμβαίνει γιατί σε εκείνη την απόσταση, το κινητό τερματικό βρίσκεται στα όρια της περιοχής κάλυψης του προσωπικού σταθμού βάσης και έτσι η ισχύς του σήματος που λαμβάνει από αυτόν τείνει να είναι μηδενική. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και για τη ρυθμαπόδοση. Με άλλα λόγια, όσο αυξάνει η απόσταση, τόσο αυξάνονται και οι παρεμβολές που δέχεται ο χρήστης από τη μακροκυψέλη. Ταυτόχρονα μειώνεται και η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος από τον προσωπικό σταθμό βάσης, γεγονός που οδηγεί στην υποβάθμιση της ρυθμαπόδοσης και της ποιότητας επικοινωνίας γενικότερα.

### 5.2.2 Παρεμβολές οικιακού χρήστη προς το σταθμό βάσης μακροκυψέλης

Στο σενάριο που ακολουθεί, ο χρήστης ο οποίος λαμβάνει υπηρεσίες από τον οικιακό σταθμό βάσης, παρεμβάλλει το σταθμό βάσης μακροκυψέλης. Θα εξετάσουμε δύο περιπτώσεις. Αρχικά θα θεωρήσουμε μια μικρή απόσταση (200 μέτρα) μεταξύ κινητού τερματικού και μακροκυψέλης και κατόπιν μια μεγάλη απόσταση (1200 μέτρα), έτσι ώστε να αποτυπώσουμε τις ομοιότητες αλλά κυρίως τις διαφορές που υπάρχουν στις παρεμβολές που δέχεται η μακροκυψέλη. Υποθέτουμε ότι ο χρήστης και στις δύο περιπτώσεις πλησιάζει το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης.



Εικόνα 35: Τοπολογία σεναρίου 2

Θεωρούμε σαν ισχύ μετάδοσης του κινητού τερματικού τα 27 dBm, δηλαδή  $PT_{\text{femtoMS}} = 27 \text{ dBm}$  και το κέρδος της κεραίας αυτού μηδενικό. Δεν λαμβάνουμε υπόψη της απώλειες λόγω σύνδεσης καθώς τις θεωρούμε μηδενικές. Οι απώλειες λόγω των τοιχωμάτων είναι  $w = 5 \text{ dB}$  και η κεραία της μακροκυψέλης τοποθετείται σε ύψος 47 μέτρων. Η συχνότητα λειτουργίας όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα ορίζεται η  $f = 2100 \text{ MHz}$ . Θα υπολογίσουμε τις απώλειες σύμφωνα με το μοντέλο Okumura Hata για τις δύο αποστάσεις, δηλαδή για 200 και 1200 μέτρα.

Έχουμε:

Απόσταση (d)	Απώλειες (L)
200	99.68
1200	126

Το EIRP που προκύπτει είναι:

$$EIRP = PT_{\text{femtoMS}} + \text{Gain}_{\text{femtoMS}} = 27 + 0 = 27 \text{ dBm}$$

Οπότε η ισχύς που λαμβάνει η μακροκυψέλη για τις δύο περιπτώσεις είναι:

Απόσταση (d)	Απώλειες (L)	Ισχύς ( $P = EIRP - L$ )
200	99.68	-72.68
1200	126	-99

Στη συνέχεια θα βρούμε την ισχύ που δέχεται η μακροκυψέλη από το κινητό τερματικό για διάφορες αποστάσεις, έτσι ώστε να ελέγξουμε τη συμπεριφορά των παρεμβολών. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της συνάρτησης Matlab παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

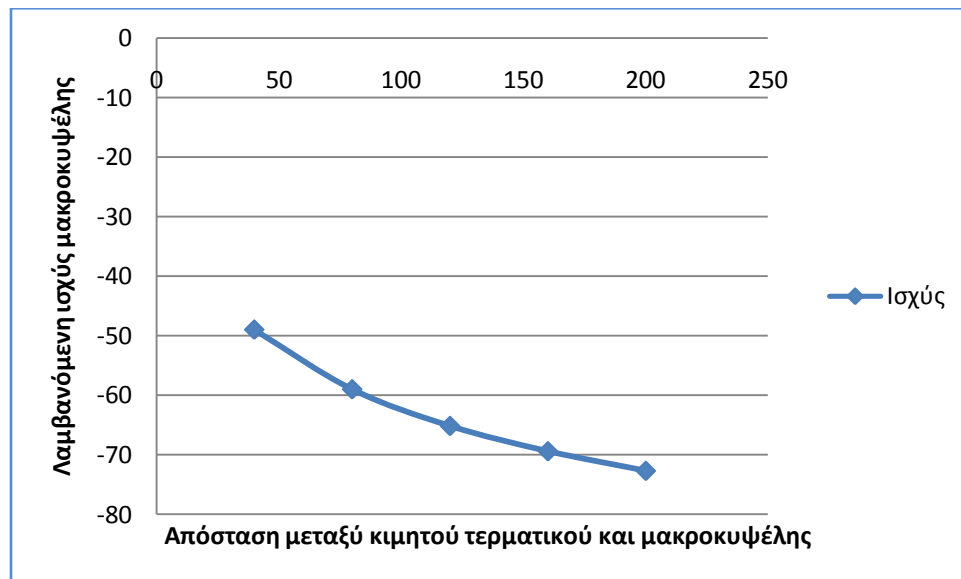
Περίπτωση 200 m

Απόσταση (d)	Απώλειες (L)	Ισχύς ( $P = EIRP - L$ )
200	99.68	-72.68
160	96.39	-69.39
120	92.15	-65.15
80	86	-59
40	76	-49

### Περίπτωση 1200 m

Απόσταση (d)	Απώλειες (L)	Ισχύς (P = EIRP – L)
1200	126	-99
1000	123	-96
800	120	-93
600	115	-88
400	109	-82
200	99.68	-72.68

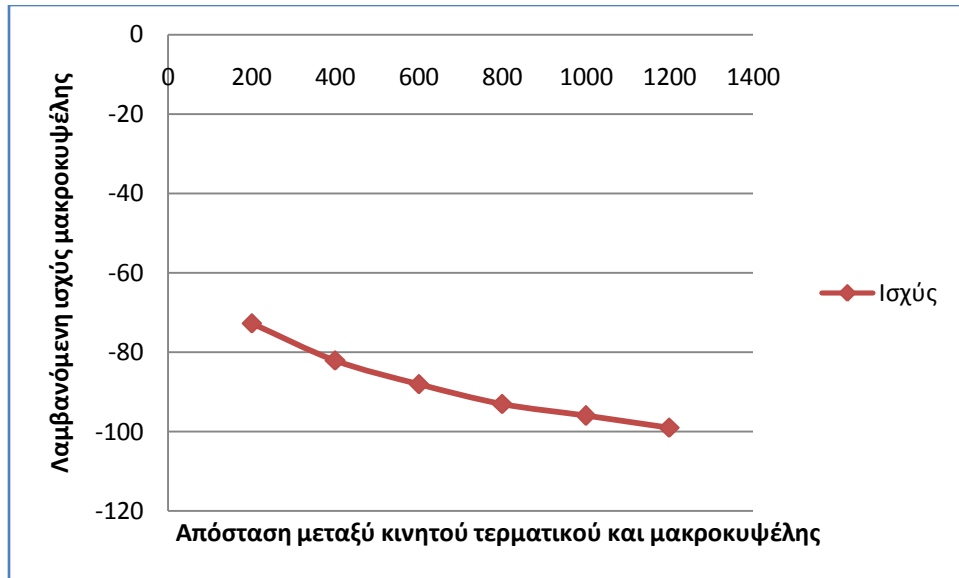
Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα της λαμβανόμενης ισχύς μακροκυψέλης από το κινητό τερματικό και για τις δύο περιπτώσεις. Όπως αναφέραμε στην αρχή του σεναρίου, θεωρούμε ότι ο χρήστης, πλησιάζει τη μακροκυψέλη.



Εικόνα 36: Λαμβανόμενη ισχύς μακροκυψέλης από το FMN για απόσταση 200 m

Είναι φανερό, ότι καθώς ο χρήστης πλησιάζει τη μακροκυψέλη, αυξάνεται η ισχύς του σήματος που αυτή λαμβάνει, γεγονός που έχει σαν άμεση συνέπεια την αύξηση των παρεμβολών. Παρατηρούμε για την πρώτη περίπτωση, δηλαδή για την απόσταση των 200 μέτρων, ότι η λαμβανόμενη ισχύς κυμαίνεται από -49 έως -72.68 dBm.



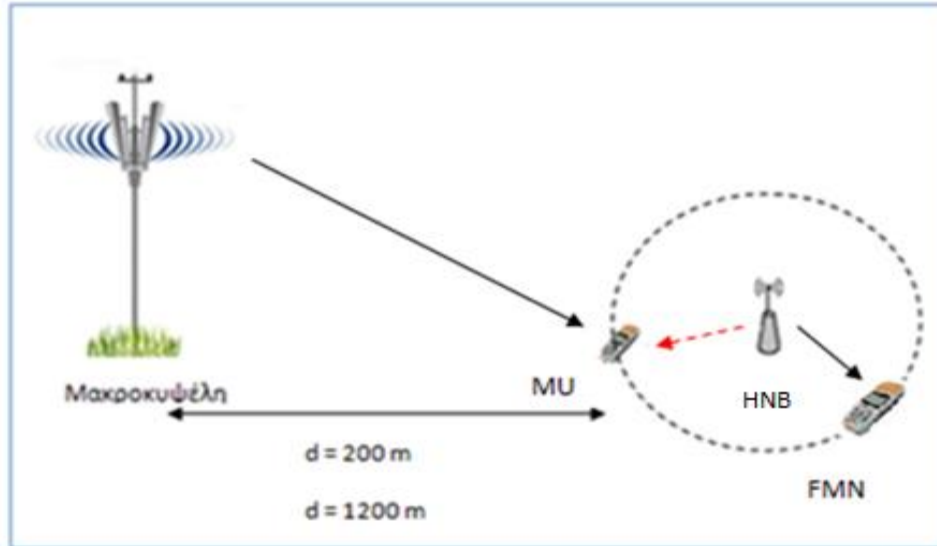


Εικόνα 37: Λαμβανόμενη ισχύς μακροκυψέλης από το FMN για απόσταση 1200 m

Ακριβώς ίδια είναι και η περίπτωση των 1200 μέτρων, δηλαδή όσο απομακρύνεται ο χρήστης από τη μακροκυψέλη, τόσο μικρότερη είναι η ισχύς που αυτή λαμβάνει, άρα τόσο μειώνεται και η παρεμβολή. Παρατηρούμε ότι η λαμβανόμενη ισχύς της μακροκυψέλης κυμαίνεται μεταξύ των -72.68 και -99 dBm. Όπως είναι φανερό, μεγαλύτερη παρεμβολή δέχεται η μακροκυψέλη στην πρώτη περίπτωση, λόγω της μικρότερης απόστασης μεταξύ κινητού τερματικού και σταθμού βάσης.

### 5.2.3 Παρεμβολές οικιακού σταθμού βάσης προς χρήστη μακροκυψέλης

Στο σενάριο αυτό ο χρήστης MU είναι συνδεδεμένος και λαμβάνει υπηρεσίες από το σταθμό βάσης μακροκυψέλης. Ο MU βρίσκεται στον ίδιο χώρο με τον προσωπικό σταθμό βάσης, ο οποίος είναι κλειστής πρόσβασης, επομένως δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από αυτόν. Ταυτόχρονα η φεμτοκυψέλη εξυπηρετεί ένα χρήστη ο οποίος βρίσκεται στην περιοχή κάλυψης αυτής, οπότε ο σταθμός εκπέμπει στη μέγιστη ισχύ του, έτσι ώστε να μπορέσει να εξυπηρετήσει το FMN. Για τη μελέτη της περίπτωσης των παρεμβολών, θα θεωρήσουμε δύο αποστάσεις μεταξύ της μακροκυψέλης και του κινητού τερματικού. Πρώτον μια μικρή απόσταση η οποία ανέρχεται σε 200 μέτρα και μια μεγάλη η οποία ανέρχεται σε 1200 μέτρα.



Εικόνα 38: Τοπολογία σεναρίου 3

Αρχικά θα υπολογίσουμε την ισχύ που δέχεται το κινητό τερματικό από τη μακροκυψέλη για τις δύο αποστάσεις που αναφέραμε πιο πάνω. Επειδή η αποστάσεις είναι οι ίδιες (200 και 1200 μέτρα), θα έχουμε και τα ίδια αποτελέσματα αν εφαρμόσουμε το μοντέλο Okumura Hata. Οπότε είναι:

Απόσταση (d)	Απώλειες (L)
200	99.68
1200	126

Για να εξάγουμε τα συγκεκριμένα αποτελέσματα, υποθέσαμε και πάλι ύψος κεραίας μακροκυψέλης 47 μέτρα, ύψος κινητού τερματικού 1.5 m, και συχνότητα λειτουργίας 2100 MHz. Οι απώλειες λόγω τοιχωμάτων ανέρχονται σε  $w = 5$  dB. Επιπλέον θεωρούμε επίπεδο χρήσης μακροκυψέλης 50 %, οπότε το κέρδος που προκύπτει από την υπόθεση αυτή είναι 3 dB. Ταυτόχρονα, αν λάβουμε υπόψη ότι η ισχύς μετάδοσης της μακροκυψέλης είναι  $PT\_macroBS = 40$  dBm και το κέρδος αυτής,  $Gain\_macroBS = 15$  dBi, τότε προκύπτει:

$$EIRP = PT\_macroBS + Gain\_macroBS + 10\log(0.5) = 58 \text{ dBm}$$

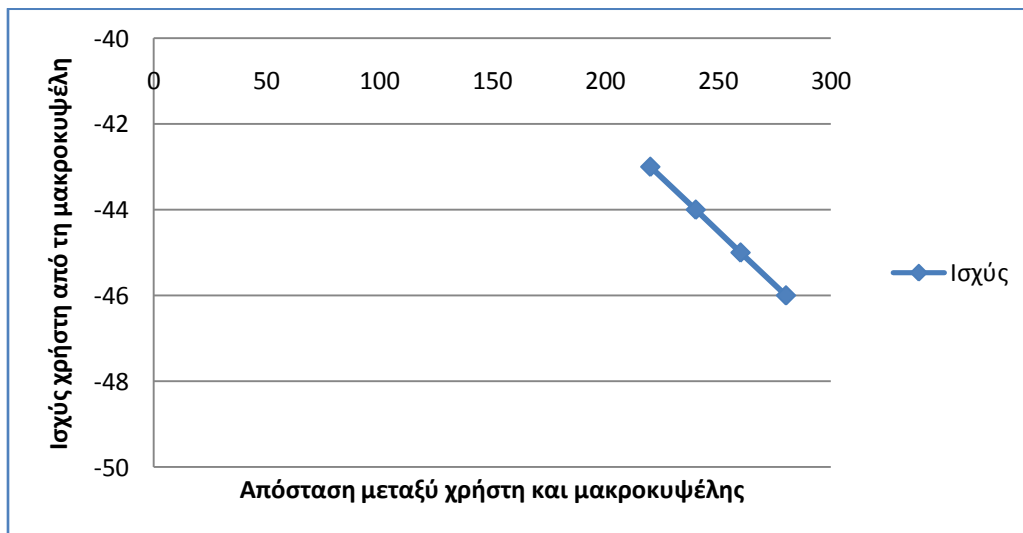
Η ισχύς που λαμβάνει το κινητό τερματικό από τη μακροκυψέλη για τις αποστάσεις που αναφέραμε παραπάνω είναι:

- 200 m -->  $PM1 = EIRP - L1 = 58 - 99.68 = -41.68$  dBm
- 1200 m -->  $PM2 = EIRP - L2 = 58 - 126 = -68$  dBm

Θεωρώντας ότι η ακτίνα της φεμτοκυψέλης είναι 100 μέτρα, θα βρω την ισχύ που δέχεται το κινητό τερματικό από τη μακροκυψέλη για διάφορες αποστάσεις. Θέτουμε σε εφαρμογή τη συνάρτηση που δημιουργήσαμε στο Matlab και λαμβάνουμε τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Απόσταση (d)	Απώλειες (L1)	Ισχύς (PM1)
200	99.68	-41.68
220	101	-43
240	102	-44
260	103	-45
280	104	-46

Το γράφημα της λαμβανόμενης ισχύος του κινητού τερματικού από τη μακροκυψέλη, που προκύπτει είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 39: Ισχύς τερματικού από τη μακροκυψέλη σε σχέση με την απόσταση για την περίπτωση των 200 m

Καθώς το κινητό τερματικό απομακρύνεται από τη μακροκυψέλη, μειώνεται και η ισχύς του σήματος που αυτό λαμβάνει. Παρατηρούμε ότι η ισχύς κυμαίνεται από -41.68 έως -46 dBm. Να επισημάνουμε ότι παρόλο που η ισχύς μειώνεται, το κινητό τερματικό είναι σε θέση να λάβει υπηρεσίες καθώς η ισχύς παραμένει σε υψηλά επίπεδα, λόγω της απόστασης που μεσολαβεί μεταξύ των δύο συσκευών. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι λογικό, γιατί θεωρούμε σαν ακτίνα κάλυψης της μακροκυψέλης τα 1500 μέτρα. Οπότε είναι λογικό σε μια μικρή απόσταση όπως αυτή των 200 μέτρων να παρέχεται καλή κάλυψη και ισχύς από τη μακροκυψέλη. Όπως θα δούμε παρακάτω το ίδιο ισχύει και για την απόσταση των 1200 μέτρων, με τη μόνη διαφορά να εντοπίζεται στην λαμβανόμενη ισχύς η οποία μειώνεται, γεγονός που είναι αποτέλεσμα της μεγάλης απόστασης.

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τη λαμβανόμενη ισχύ για την απόσταση των 1200 μέτρων. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Απόσταση (d)	Απώλειες (L2)	Ισχύς (PM2)
1200	126	-68
1220	126,34	-68,34
1240	126,58	-68,58
1260	126,81	-68,81

Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα της λαμβανόμενης ισχύος για το κινητό τερματικό από τη μακροκυψέλη, για την απόσταση των 1200 μέτρων.



Εικόνα 40: Ισχύς τερματικού από τη μακροκυψέλη σε σχέση με την απόσταση για την περίπτωση των 1200 m

Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, έτσι και εδώ, παρατηρούμε την ισχύ να μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ μακροκυψέλης και χρήστη. Είναι φανερό ότι η ισχύς κυμαίνεται από -68 έως -69 dBm. Η απώλεια στην περίπτωση αυτή δεν είναι μεγάλη καθώς για μια απόσταση περίπου 100 μέτρων, η ισχύς μειώνεται κατά 1 dBm. Όπως περιμέναμε η λαμβανόμενη ισχύς είναι χαμηλότερη από αυτή που λαμβάνει το κινητό τερματικό για την απόσταση των 200 μέτρων, παρ' όλα αυτά είναι ικανοποιητική έτσι ώστε να παρέχονται στο κινητό τερματικό υπηρεσίες φωνής και δεδομένων.

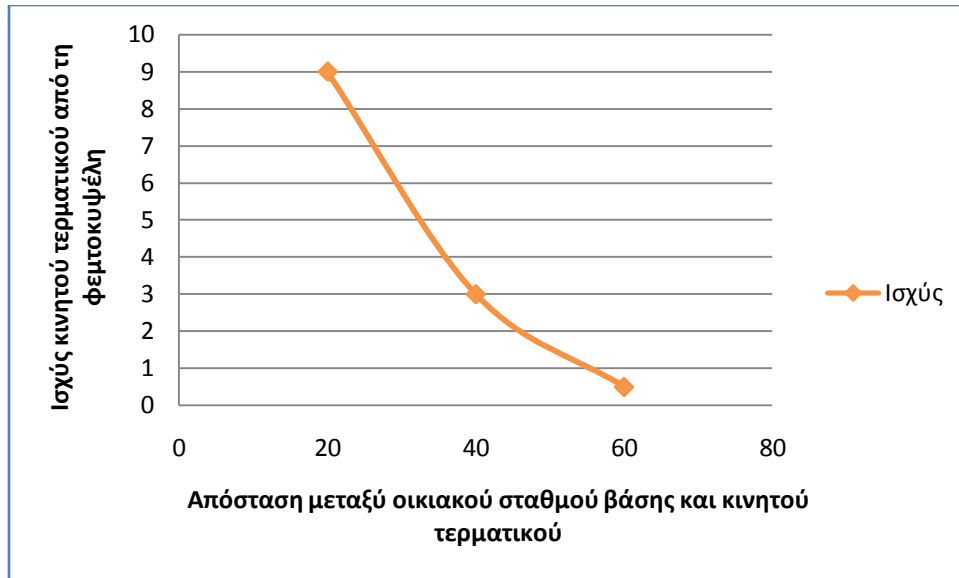
Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την παρεμβολή που δέχεται το κινητό τερματικό το οποίο βρίσκεται εντός του ορίου κάλυψης της φεμτοκυψέλης. Υποθέτουμε ισχύ μετάδοσης από τον οικιακό σταθμό βάσης 20 dBm, δηλαδή  $P_{T\_femtoBS} = 20$  dBm. Επιπλέον το κέρδος της κεραίας φεμτοκυψέλης είναι 2 dBi, οπότε  $Gain\_femtoBS = 2$  dBi. Θεωρούμε ότι ο σταθμός βάσης εκπέμπει με τη μέγιστη ισχύ του, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα:  $10\log(1) = 0$ . Τέλος οι απώλειες λόγω των τοιχωμάτων είναι 10 dB.

Είναι  $EIRP = P_{T\_femtoBS} + Gain\_femtoBS + 10\log(1) = 20 + 2 + 0 = 22$  dBm.

Εφαρμόζουμε τη συνάρτηση της Matlab που δημιουργήσαμε και λαμβάνουμε τα αποτελέσματα που ακολουθούν:

Απόσταση (d)	LF	PF = EIRP - LF
20	13	9
40	19	3
60	21,5	0,5

Μετατρέπω τα αριθμητικά αποτελέσματα σε διάγραμμα και το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι το εξής:



Εικόνα 41: Λαμβανόμενη ισχύς του χρήστη από τη φεμτοκυψέλη σε σχέση με την απόσταση

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ του χρήστη και του προσωπικού σταθμού βάσης, τόσο μειώνεται η λαμβανόμενη ισχύς. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να μειώνεται και η παρεμβολή που δέχεται το κινητό τερματικό από τον οικιακό σταθμό βάσης, γεγονός που έχει θετικό αντίκτυπο στην καλύτερη και ομαλότερη επικοινωνία. Οι παραπάνω μετρήσεις ισχύουν αν διατηρούμε σταθερούς τους σταθμούς βάσης και αλλάζουμε θέση στο κινητό τερματικό, το οποίο και μετακινούμε μακριά από τη μακροκυψέλη και τη φεμτοκυψέλη αντίστοιχα. Στη συνέχεια θα προσθέσουμε την απώλεια που λαμβάνουμε από τη φεμτοκυψέλη, στην ισχύ που λαμβάνουμε από τη μακροκυψέλη, για να λάβουμε την τελική λαμβανόμενη ισχύ από τη μακροκυψέλη. Για την απόσταση των 200 μέτρων η λαμβανόμενη ισχύς παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Απόσταση (d)	Απώλειες (L1)	Ισχύς (PM1)
200	99.68	-41,68
220	101	-42,5
240	102	-47
260	103	-54

Το γράφημα της τελικής λαμβανόμενης ισχύος που λαμβάνει το κινητό τερματικό για την απόσταση των 200 μέτρων είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 42: Τελική λαμβανόμενη ισχύς από τη μακροκυψέλη για απόσταση 200 m

Για την απόσταση των 1200 μέτρων η λαμβανόμενη ισχύς παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Απόσταση (d)	Απώλειες (L2)	Ισχύς (PM2)
1200	126	-68
1220	126,34	-77,34
1240	126,58	-77,58
1260	126,81	-77,81

Το διάγραμμα της τελικής λαμβανόμενης ισχύος που λαμβάνει το κινητό τερματικό για την απόσταση των 1200 μέτρων παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 43: Τελική λαμβανόμενη ισχύς από τη μακροκυψέλη για απόσταση 1200 m

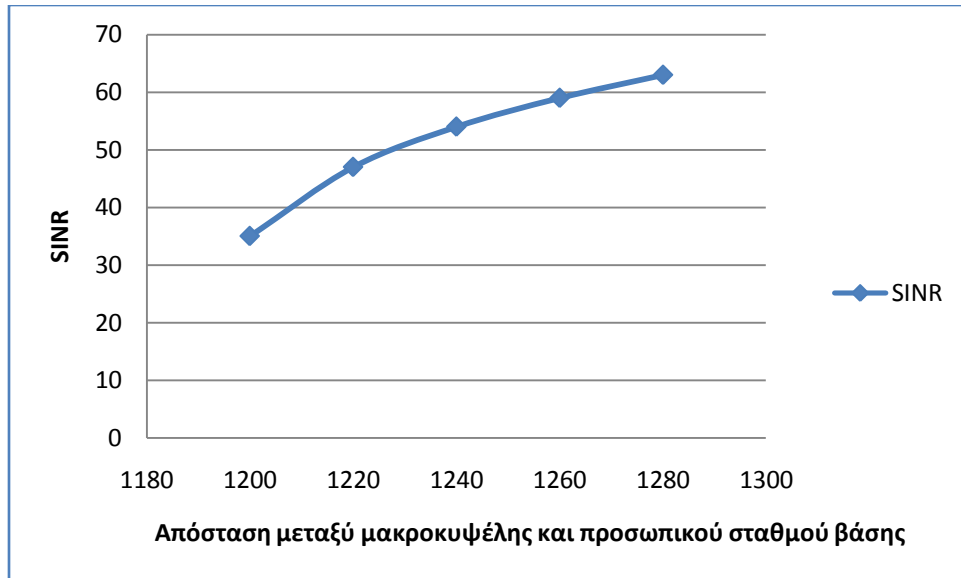
Κατόπιν, θα εξετάσουμε τον SINR αλλά και τη ρυθμαπόδοση, για την περίπτωση όπου διατηρούμε σταθερό τον χρήστη και απομακρύνουμε τον προσωπικό σταθμό βάσης από αυτό. Εφαρμόζοντας την κατάλληλη συνάρτηση που δημιουργήσαμε στη Matlab, λαμβάνουμε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Απόσταση (d)	SINR	Ρυθμαπόδοση
1200	35	1,07
1220	47	1,50
1240	54	1,77
1260	59	1,96
1280	63	2,12

Εξετάζουμε την περίπτωση όπου ο χρήστης παραμένει σταθερός στην απόσταση των 1200 μέτρων. Η απόσταση αυξάνεται γιατί διατηρούμε σταθερό το κινητό τερματικό και αυξάνουμε την απόσταση της φεμτοκυψέλης από αυτό. Η παραπάνω απόσταση στην ουσία, αποτυπώνει την απόσταση μεταξύ μακροκυψέλης και φεμτοκυψέλης και για το λόγο αυτό παρατηρούμε την αύξηση αυτή.

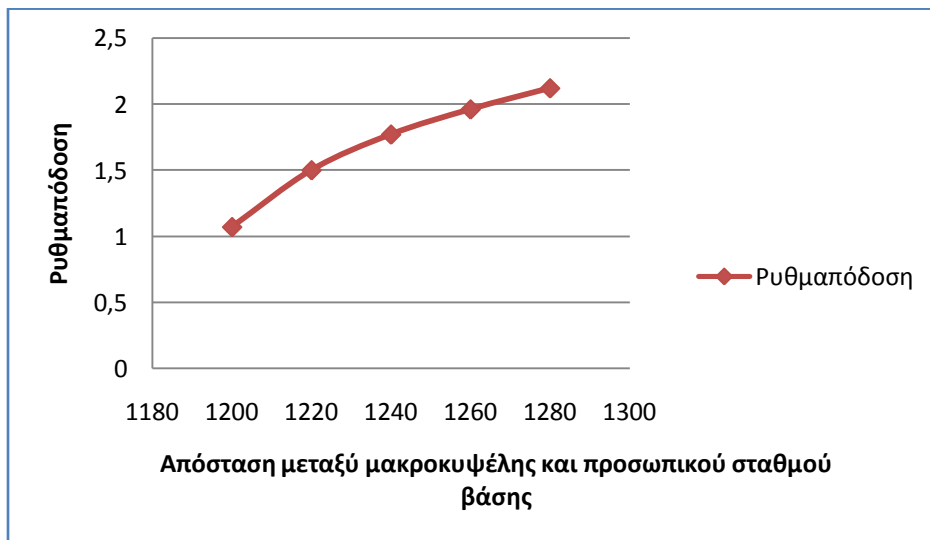
Τα διαγράμματα που προκύπτουν για τον SINR και τη ρυθμαπόδοση είναι τα ακόλουθα:





Εικόνα 44: SINR μεταξύ χρήστη και μακροκυψέλης για σταθερό κινητό τερματικό και μεταβλητή φεμτοκυψέλη

Είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ φεμτοκυψέλης και κινητού τερματικού, διατηρώντας σταθερή την απόσταση μεταξύ χρήστη και μακροκυψέλης, ο SINR καθώς επίσης και η ρυθμαπόδοση που παρουσιάζεται παρακάτω, αυξάνονται.

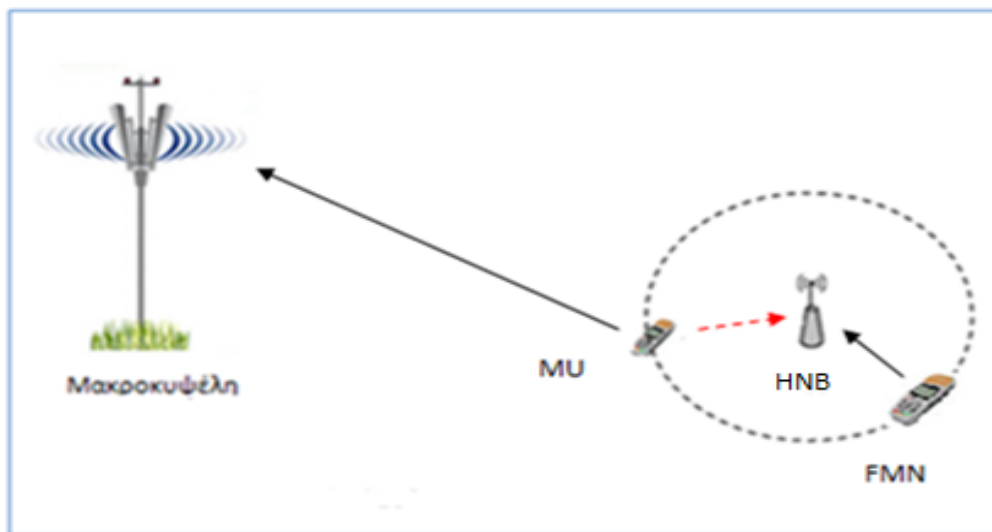


Εικόνα 45: Ρυθμαπόδοση μεταξύ χρήστη και μακροκυψέλης για σταθερό κινητό τερματικό και μεταβλητή φεμτοκυψέλη

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι λογικό, καθώς όσο αυξάνεται η απόσταση, η παρεμβολή από τον οικιακό σταθμό βάσης μειώνεται, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την ομαλότερη και καλύτερη λειτουργία του δικτύου γενικότερα.

#### 5.2.4 Παρεμβολές συσκευής MU προς τον προσωπικό σταθμό βάσης

Στο σενάριο αυτό, θα μελετήσουμε την παρεμβολή που προκαλεί ένας χρήστης ο οποίος λαμβάνει υπηρεσίες από τη μακροκυψέλη, προς τον οικιακό σταθμό βάσης. Θεωρούμε ότι ο χρήστης της μακροκυψέλης βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με τη φεμτοκυψέλη, η οποία είναι κλειστή πρόσβασης, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορεί να λάβει υπηρεσίες φωνής και δεδομένων από αυτή. Ένας άλλος χρήστης FMN, ο οποίος βρίσκεται στα όρια της περιοχής κάλυψης της φεμτοκυψέλης είναι συνδεδεμένος με τον προσωπικό σταθμό βάσης και έχει κλήση σε εξέλιξη. Η τοπολογία του δικτύου παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 46: Τοπολογία σεναρίου 4

Στο σενάριο θα υπολογίσουμε την ισχύ που δέχεται ο προσωπικός σταθμός βάσης από το χρήστη της μακροκυψέλης αλλά και από το χρήστη που ο ίδιος εξυπηρετεί. Θα μελετηθούν τρεις αποστάσεις ανάμεσα στο MU και τη φεμτοκυψέλη. Αυτές είναι τα 10, 15 και 20 μέτρα. Θεωρούμε ότι ο χρήστης FMN είναι σταθερός και σε απόσταση 20 μέτρων από το σταθμό βάσης.

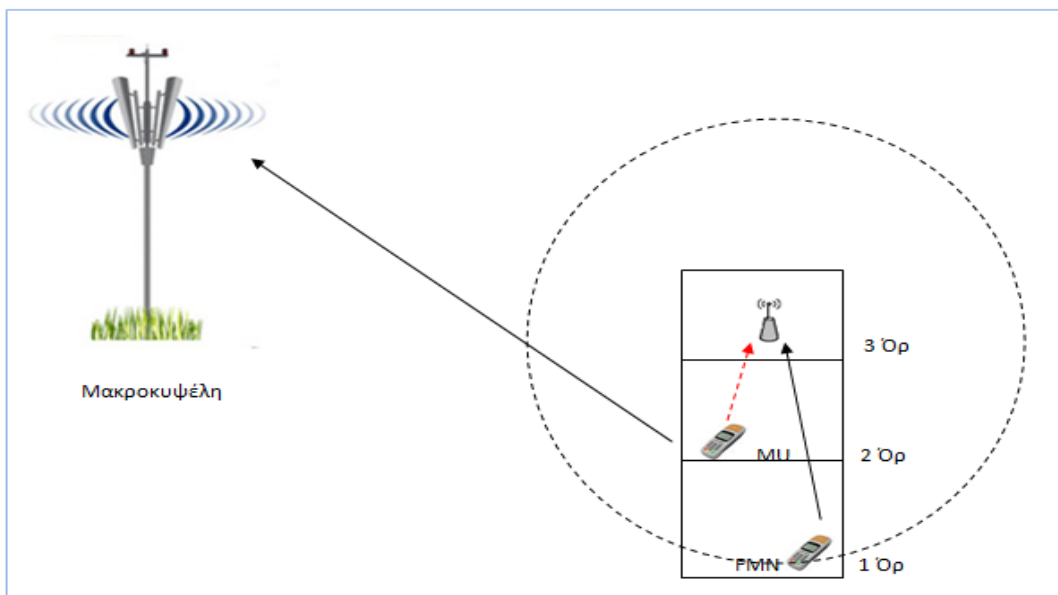
Αρχικά θα υπολογίσουμε την ισχύ του σήματος που δέχεται η φεμτοκυψέλη από το χρήστη της μακροκυψέλης. Υποθέτουμε ισχύ μετάδοσης κινητού τερματικού τα 27 dBm, δηλαδή  $PT\_macroMS = 27 \text{ dBm}$  και μηδενικό κέρδος για την κεραία αυτού. Οι απώλειες της σύνδεσης επίσης θεωρούνται μηδενικές. Προκύπτει ότι:

$$EIRP_M = PT\_macroMS = 27 \text{ dBm}.$$

Με βάση το μοντέλο ITU-R P1238, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απώλειας σε εσωτερικό χώρο, θα υπολογίσουμε την ισχύ του σήματος που δέχεται η φεμτοκυψέλη από τα δύο κινητά τερματικά.

$$\text{Είναι } PL = 20\log_{10}(f) + N\log_{10}(d) + L_f(n) - 28 \text{ dB}$$

Υποθέτουμε συχνότητα λειτουργίας τα 2100 MHz. Ο όρος  $d$  αποτυπώνει την απόσταση μεταξύ κινητού τερματικού και σταθμού βάσης σε μέτρα. Σύμφωνα με το μοντέλο ο όρος  $N$  ισούται με 28 για διαμερίσματα και κατοικίες. Θεωρούμε ότι το κινητό τερματικό το οποίο εξυπηρετείται από τη μακροκυψέλη (MU), βρίσκεται ένα επίπεδο (δάπεδο) κάτω από τον οικιακό σταθμό βάσης, οπότε σύμφωνα με το μοντέλο ισχύει  $L_f(n) = 9$ . Υποθέτουμε ότι ο χρήστης FMN βρίσκεται 2 επίπεδα κάτω σε σχέση με τη φεμτοκυψέλη, οπότε ισχύει  $L_f(n) = 19$ .



Εικόνα 47: Τοπολογία σεναρίου 4

Για το χρήστη της μακροκυψέλης (MU), όπως αναφέραμε και στην αρχή του σεναρίου υποθέτουμε τρεις αποστάσεις. Αυτές είναι 10, 15 και 20 μέτρα αντίστοιχα μακριά από τη φεμτοκυψέλη. Οπότε θα βρούμε τρεις απώλειες, την PL1, PL2 και PL3.

Είναι:

$$PL1 = 20\log_{10}(2100) + 28\log_{10}(10) + 9 - 28 \quad \text{dB}$$

$$PL2 = 20\log_{10}(2100) + 28\log_{10}(15) + 9 - 28 \quad \text{dB}$$

$$PL3 = 20\log_{10}(2100) + 28\log_{10}(20) + 9 - 28 \quad \text{dB}$$

Υπό μορφή πίνακα τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

Απόσταση (d)	Απώλειες (PL) (ITU-R)	Ισχύς (P = EIRP - PL)
10	75	-48
15	80	-53
20	83	-56

Στη συνέχεια θα βρούμε την ισχύ που δέχεται ο προσωπικός σταθμός βάσης από το χρήστη FMN. Να επισημάνουμε ότι ο χρήστης απέχει 20 μέτρα από το σταθμό βάσης και η απόσταση αυτή παραμένει σταθερή. Επίσης όπως αναφέραμε και πριν, το κινητό τερματικό του οικιακού χρήστη βρίσκεται δύο επίπεδα κάτω από τη φεμτοκυψέλη, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Υπολογίζουμε τις απώλειες σύμφωνα με το μοντέλο ITU-R και προκύπτει:

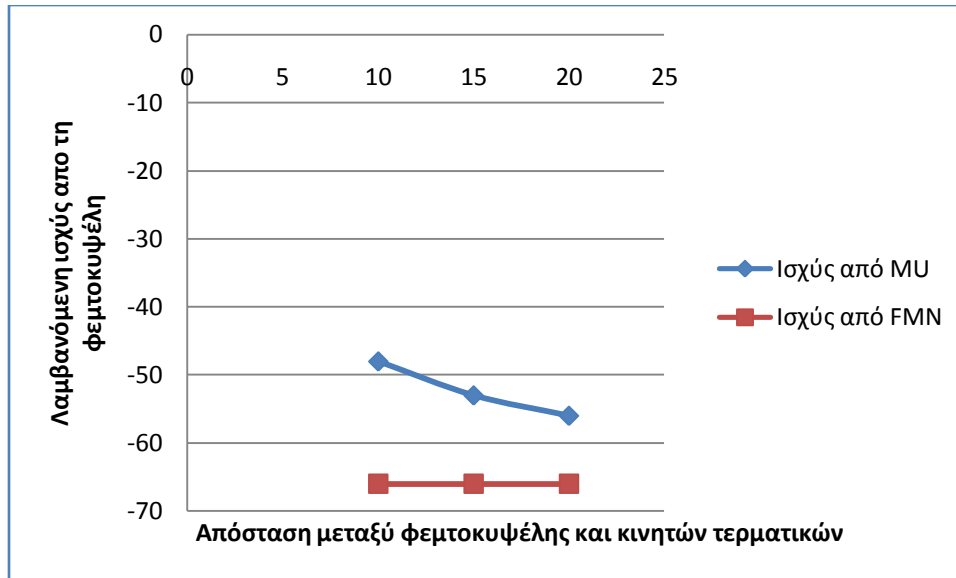
$$PL = 20\log_{10}(2100) + 28\log_{10}(20) + 19 - 28 = 93 \quad \text{dB}$$

Θεωρούμε ισχύ μετάδοσης από το κινητό τερματικό 27 dBm και το κέρδος της κεραίας αυτού μηδενικό. Οι απώλειες σύνδεσης είναι επίσης μηδενικές. Οπότε η ισχύς που λαμβάνει η φεμτοκυψέλη είναι

$$P = EIRP - PL = 27 - 93 = -66 \quad \text{dBm}$$

Η ισχύς που λαμβάνει ο προσωπικός σταθμός βάσης είναι σταθερή, γιατί το κινητό τερματικό παραμένει σε σταθερή θέση, δηλαδή ακίνητο.

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα για τη λαμβανόμενη ισχύς της φεμτοκυψέλης από τα κινητά τερματικά.



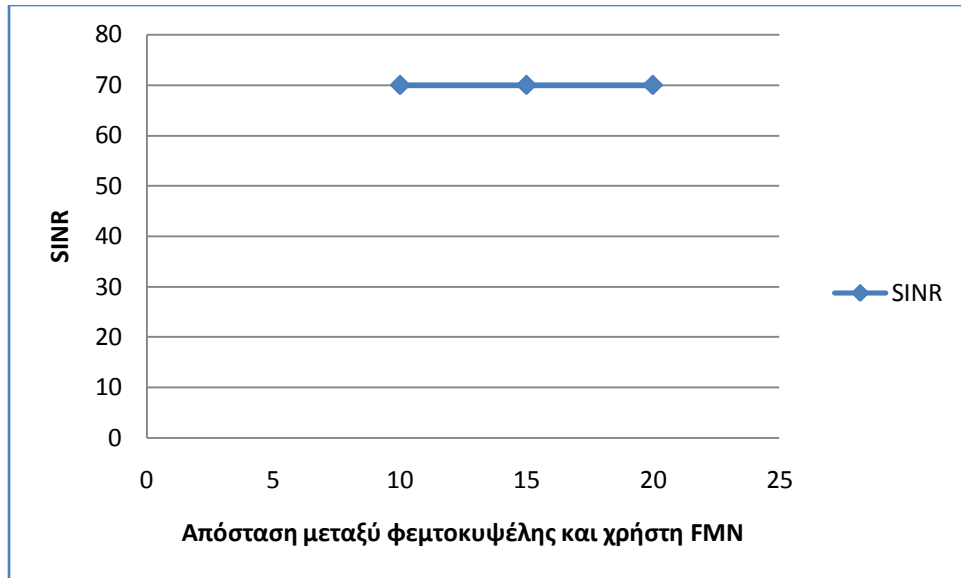
Εικόνα 48: Λαμβανόμενη ισχύς φεμοκυψέλης από τα κινητά τερματικά σε σχέση με την απόσταση

Καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ του MU και της φεμοκυψέλης, μειώνεται η λαμβανόμενη ισχύς, άρα και οι παρεμβολές που αυτό προκαλεί. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται και από τη γαλάζια καμπύλη του γραφήματος η οποία έχει πτωτική πορεία καθώς αυξάνεται η απόσταση. Η ισχύς που λαμβάνει ο οικιακός σταθμός βάσης από το χρήστη FMN παραμένει σταθερή (κόκκινη καμπύλη), καθώς όπως υποθέσαμε αρχικά, ο χρήστης αυτός παραμένει ακίνητος και σε απόσταση 20 μέτρων από το σταθμό βάσης.

Τέλος θα υπολογίσουμε τον SINR και τη ρυθμαπόδοση (throughput) ανάμεσα στον οικιακό χρήστη FMN και τη φεμοκυψέλη. Εφαρμόζοντας τη συνάρτηση της Matlab προκύπτουν τα αποτελέσματα που ακολουθούν:

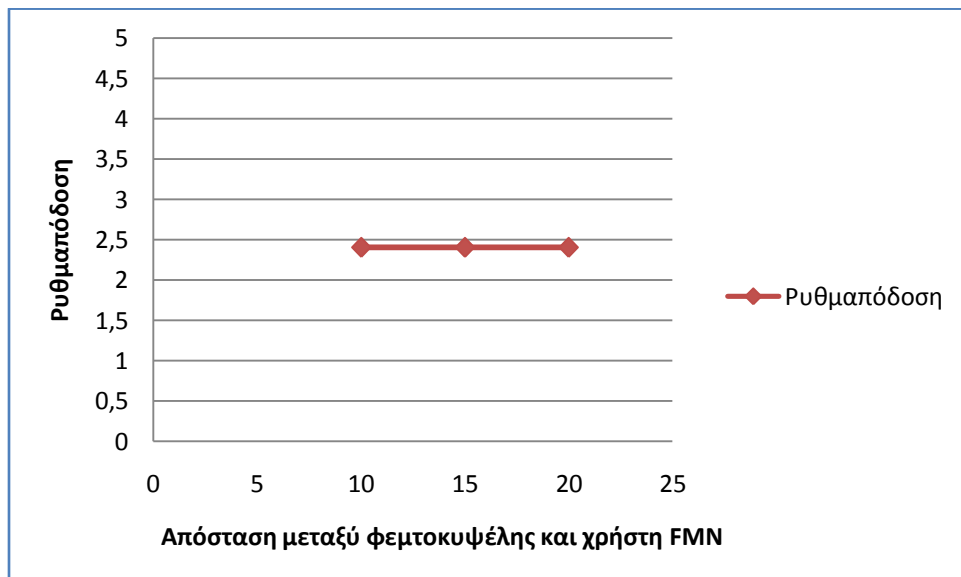
Απόσταση (d)	SINR	Ρυθμαπόδοση
20	70	2,4

Τα διαγράμματα που προκύπτουν για τους όρους του SINR και της ρυθμαπόδοσης είναι τα παρακάτω:



Εικόνα 49: SINR μεταξύ φεμτοκυψέλης και χρήστη FMN

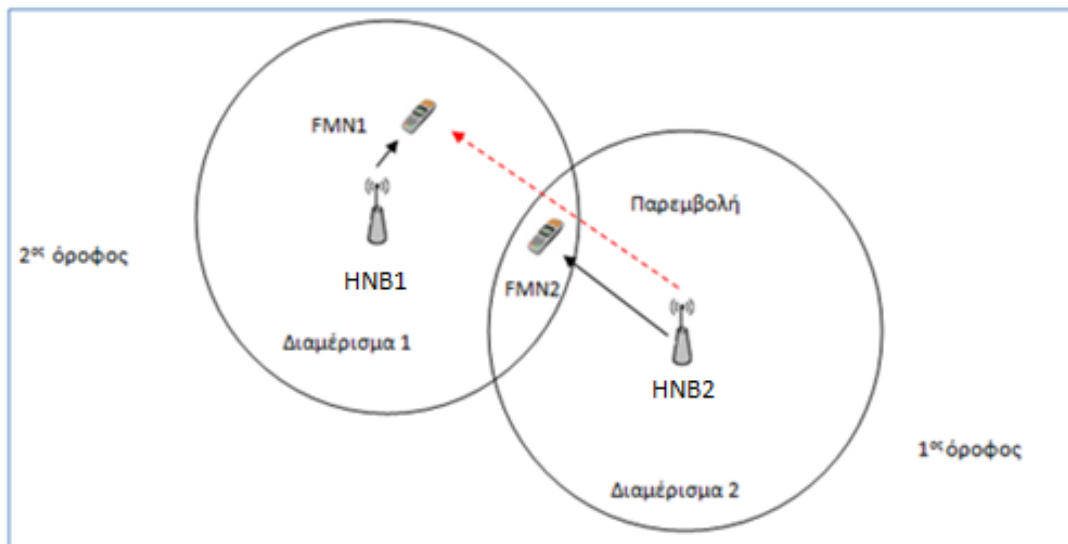
Ο SINR παραμένει σταθερός και ίσος με 70 dB, γιατί η απόσταση μεταξύ κινητού τερματικού και οικιακού σταθμού βάσης παραμένει σταθερή. Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει και για τη ρυθμαπόδοση η οποία επίσης παραμένει σταθερή.



Εικόνα 50: Ρυθμαπόδοση μεταξύ φεμτοκυψέλης και χρήστη FMN

### 5.2.5 Παρεμβολές φεμτοκυψέλης προς χρήστη ο οποίος λαμβάνει υπηρεσίες από γειτονικό οικιακό σταθμό βάσης

Στο σενάριο αυτό θεωρούμε δύο συσκευές, το σταθμό βάσης φεμτοκυψέλης 1 (FBS1) και τον οικιακό σταθμό βάσης 2 (FBS2) οι οποίοι βρίσκονται σε γειτονικά διαμερίσματα. Οι προσωπικοί σταθμοί βάσης παρέχουν υπηρεσίες στα κινητά τερματικά όπου είναι συνδεδεμένα με αυτούς. Πιο συγκεκριμένα, η φεμτοκυψέλη 1 εξυπηρετεί το κινητό τερματικό 1 (FMN1) και ο οικιακός σταθμός βάσης παρέχει υπηρεσίες στο κινητό τερματικό 2 (FMN2). Τα δύο κινητά τερματικά βρίσκονται στο διαμέρισμα 1. Σκοπός του σεναρίου που ακολουθεί, είναι η εξέταση της απόδοσης και των παρεμβολών της συσκευής FMN1, όταν αυτή βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με τη συσκευή FMN2. Να επισημάνουμε ότι τα κινητά τερματικά βρίσκονται στον ίδιο χώρο με τη φεμτοκυψέλη 1, ενώ ο οικιακός σταθμός βάσης 2 (FBS2) και το κινητό τερματικό που εξυπηρετεί δεν βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Η φεμτοκυψέλη FBS2 βρίσκεται ένα επίπεδο κάτω σε σχέση με τις υπόλοιπες συσκευές. Η τοπολογία του σεναρίου αποτυπώνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 51: Τοπολογία σεναρίου 5

Υποθέτουμε ότι τα δύο κινητά τερματικά απέχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους. Θα υπολογίσουμε την ισχύ που δέχεται ο χρήστης, ο οποίος λαμβάνει υπηρεσίες από τη

φεμτοκυψέλη 1 και κατ' επέκταση και την παρεμβολή που αυτός δέχεται. Αρχικά υπολογίζουμε το EIRP (Equivalent isotropically radiated power). Θεωρούμε ισχύς μετάδοσης φεμτοκυψέλης 1,  $PT\_femto1BS = 20$  dBm. Το κέρδος της κεραίας αυτής είναι 2 dB, δηλαδή  $Gain\_femto1BS = 2$  dBm. Υποθέτουμε ότι ο προσωπικός σταθμός βάσης 1 εκπέμπει στο 50 % της μέγιστης ισχύος και ότι το κέρδος για τη συσκευή του κινητού τερματικού είναι μηδενικό. Οπότε προκύπτει:

$$EIRP = PT\_femto1BS + Gain\_femto1BS + Gain\_femto1MS + 10\log(0.5) = 20 + 2 + 0 + 3 = 25 \text{ dBm.}$$

Με βάση το μοντέλο ITU-R θα υπολογίσουμε την ισχύ του σήματος που δέχεται το κινητό τερματικό FMN1 από τον οικιακό σταθμό βάσης 1 και 2. Θεωρούμε ότι το κινητό τερματικό FMN1 βρίσκεται στη ίδιο δωμάτιο με τη φεμτοκυψέλη 1 οπότε δεν υπάρχουν απώλειες λόγω τοιχωμάτων ( $w = 0$  dB).

Σύμφωνα με το μοντέλο ITU-R, επειδή η φεμτοκυψέλη 1 και το κινητό τερματικό που αυτή εξυπηρετεί, βρίσκονται στον ίδιο χώρο, θα έχουμε  $L_f(n) = 0$ . Η φεμτοκυψέλη 2 (FBS2) βρίσκεται ένα δάπεδο κάτω σε σχέση με το κινητό τερματικό οπότε ισχύει  $L_f(n) = 9$ . Θεωρούμε πως η συχνότητα λειτουργίας είναι 2100 MHz και  $N = 28$  για κατοικίες σύμφωνα με το πρότυπο. Αντικαθιστώντας τα δεδομένα στην εξίσωση προκύπτει:

- Για τον προσωπικό σταθμό βάσης FBS1

$$PL = 20\log_{10}(2100) + 28\log_{10}(d) - 28$$

Όπου  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ του κινητού τερματικού και του σταθμού βάσης. Στη συνέχεια θα βρούμε την απώλεια PL για διάφορες αποστάσεις  $d$ . Εφαρμόζουμε την κατάλληλη συνάρτηση που δημιουργήσαμε στη Matlab για διάφορες αποστάσεις και λαμβάνουμε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Απόσταση (d)	PL (ITU-R)	P = EIRP - PL
5	58	-33
10	66	-41
15	71	-46
20	74	-49
25	77	-52

- Για τον προσωπικό σταθμό βάσης FBS2



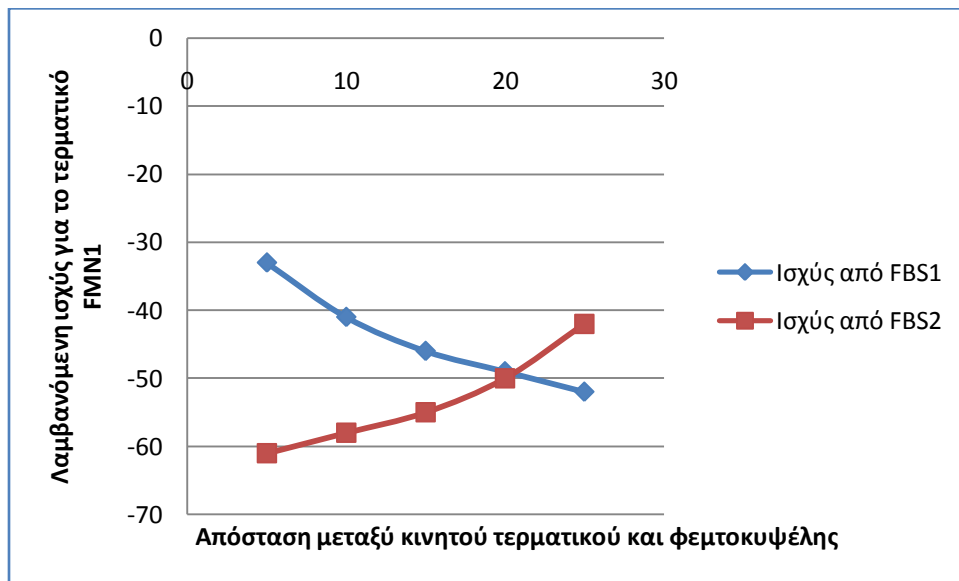
Έχουμε τα ίδια δεδομένα με πριν, αλλά όπως υποθέσαμε αρχικά, ο σταθμός βάσης βρίσκεται ένα όροφο (δάπεδο) κάτω σε σχέση με το κινητό τερματικό. Οπότε σύμφωνα με το πρότυπο υπολογισμού των απωλειών θα είναι  $L_F(n) = 9$ . Πλέον η εξίσωση μετατρέπεται στην ακόλουθη:

$$PL = 20\log_{10}(2100) + 28\log_{10}(d) + 9 - 28$$

Όπως και πριν θα βρούμε τις απώλειες για διάφορες αποστάσεις. Αντικαθιστούμε την εκάστοτε απόσταση  $d$  στην νέα πλέον εξίσωση και λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

Απόσταση (d)	PL (ITU-R)	P = EIRP - PL
5	86	-61
10	83	-58
15	80	-55
20	75	-50
25	67	-42

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα της λαμβανόμενης ισχύος του κινητού τερματικού FMN1 και για τις δύο φεμτοκυψέλες.



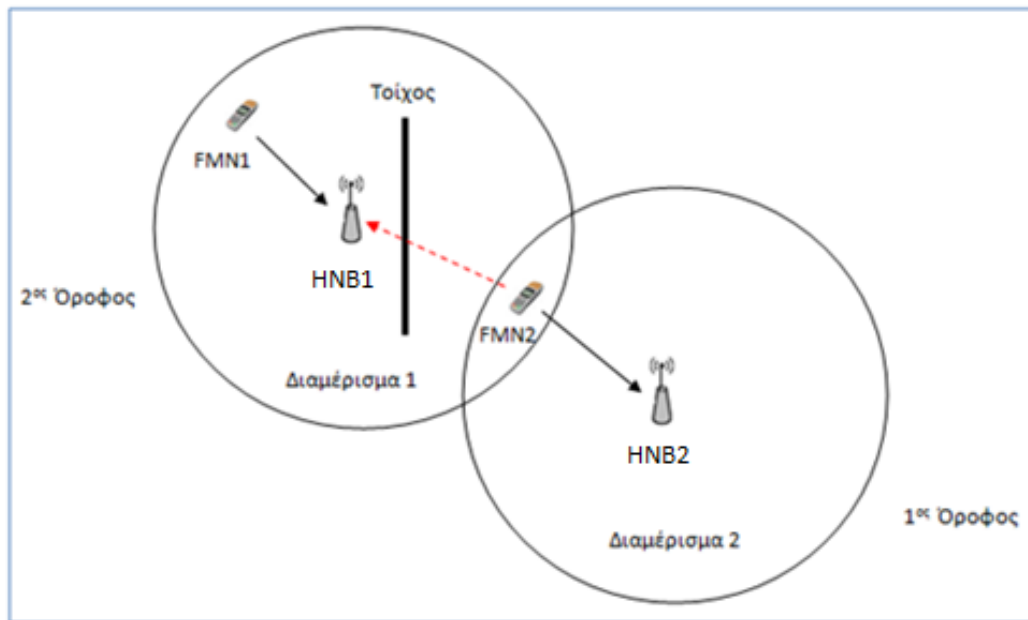
Εικόνα 52: λαμβανόμενης ισχύος του κινητού τερματικού FMN1 και για τις δύο φεμτοκυψέλες

Η ισχύς που λαμβάνει το κινητό τερματικό από τον προσωπικό σταθμό βάσης FBS1 αποτυπώνεται με γαλάζιο χρώμα. Είναι φανερό ότι καθώς αυξάνει η απόσταση μεταξύ κινητού τερματικού και σταθμού βάσης, μειώνεται η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, γιατί καθώς απομακρύνεται ο χρήστης, αυξάνονται και οι παρεμβολές που δέχεται από τη φεμτοκυψέλη FBS2, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ισχύος. Παρατηρούμε ότι το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος κυμαίνεται από -33 έως -52 dB. Η ισχύς αυτή είναι ικανοποιητική, έτσι ώστε το κινητό τερματικό να μπορεί να απολαμβάνει υπηρεσίες οι οποίες προέρχονται από το σταθμό βάσης FBS1. Στο γράφημα, με κόκκινο χρώμα παριστάνεται η καμπύλη της λαμβανόμενης ισχύος από τον οικιακό σταθμό βάσης FBS2. Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνει η απόσταση του κινητού τερματικού από το FBS1, ταυτόχρονα μειώνεται και η απόσταση από το FBS2, καθώς ο χρήστης πλησιάζει το σταθμό βάσης 2. Είναι φανερό, ότι η λαμβανόμενη ισχύς από τη φεμτοκυψέλη 2 αυξάνεται καθώς μειώνεται η απόσταση d, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παρεμβολής και την υποβάθμιση της απόδοσης του δικτύου γενικότερα. Στην απόσταση των 20 μέτρων παρατηρούμε ότι η ισχύς από τη φεμτοκυψέλη FBS1 και η παρεμβολή από το σταθμό βάσης FBS2 έχουν την ίδια περίπου τιμή. Στην απόσταση των 25 μέτρων η παρεμβολή που δέχεται το κινητό τερματικό είναι υψηλότερη από την ισχύ της FBS1. Παρ' όλα αυτά, η κλήση η οποία είναι σε εξέλιξη μεταξύ του τερματικού FMN1 και του σταθμού βάσης FBS1 δεν θα διακοπεί, γιατί το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος είναι αρκετά υψηλό όπως σχολιάσαμε και παραπάνω.

### **5.2.6 Παρεμβολές κινητού τερματικού προς γειτονικό οικιακό σταθμό βάσης**

Στο συγκεκριμένο σενάριο υποθέτουμε δύο κινητά τερματικά, το FMN1 και το FMN2, τα οποία βρίσκονται στο ίδιο διαμέρισμα με τον προσωπικό σταθμό βάσης FBS1. Ο χρήστης FMN1 βρίσκεται στον ίδιο χώρο με το σταθμό βάσης, ενώ αντιθέτως ο χρήστης FMN2 βρίσκεται σε διπλανό δωμάτιο, δηλαδή παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο συσκευών τοίχωμα. Το γεγονός αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα να εισάγουμε στη μελέτη που θα ακολουθήσει απώλειες λόγω τοιχωμάτων οι οποίες είναι  $w = 5$  dB. Το κινητό τερματικό FMN1 λαμβάνει υπηρεσίες από τον οικιακό σταθμό βάσης FBS1, ενώ ο χρήστης FMN2 λαμβάνει υπηρεσίες από τη φεμτοκυψέλη FBS2, η οποία βρίσκεται ένα δάπεδο κάτω σε σχέση με τις υπόλοιπες συσκευές. Για να γίνει περισσότερο κατανοητή

η δομή του δικτύου, παρουσιάζεται η παρακάτω εικόνα, η οποία αποτυπώνει την τοπολογία του συγκεκριμένου σεναρίου.



Εικόνα 53: Τοπολογία σεναρίου 6

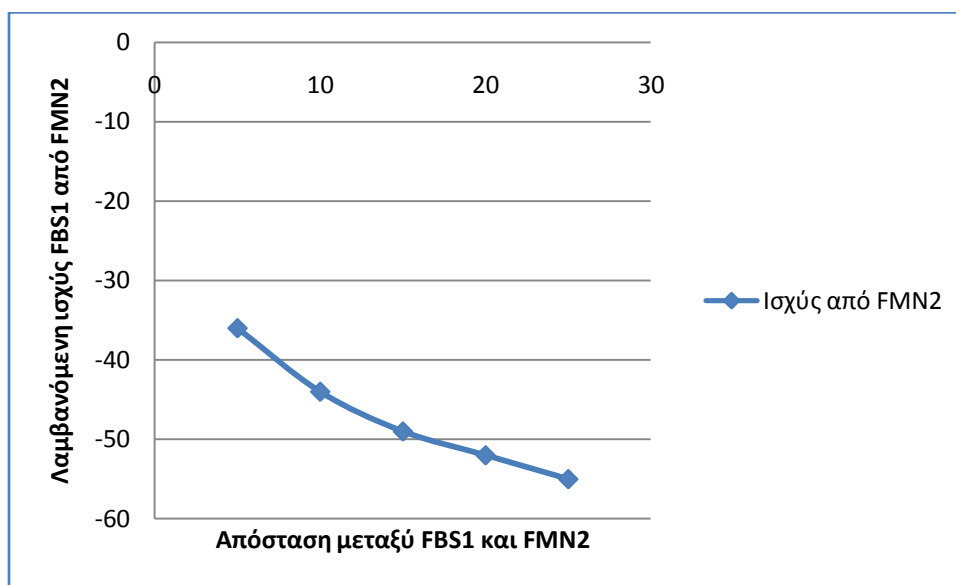
Στόχος του σεναρίου είναι η μελέτη των παρεμβολών που δέχεται ο προσωπικός σταθμός βάσης FBS1 από το κινητό τερματικό FMN2 για διάφορες αποστάσεις. Θεωρούμε ισχύ μετάδοσης για το κινητό τερματικό FMN2 27 dB και μηδενικό κέρδος για την κεραία αυτού. Οπότε είναι

$$\text{EIRP} = \text{PT\_femto2MS\_Gain\_femto2MS} = 27 + 0 = 27 \text{ dBm.}$$

Με βάση το μοντέλο ITU-R θα υπολογίσουμε την ισχύ που δέχεται ο σταθμός βάσης FBS1 από το κινητό τερματικό FMN2. Θεωρώ ότι η φεμτοκυψέλη 2 βρίσκεται ένα δάπεδο κάτω σε σχέση με τις υπόλοιπες συσκευές, οπότε σύμφωνα με το πρότυπο απώλειας είναι  $L_f(n) = 9$ , για τη σύνδεση μεταξύ FBS2 και FMN2. Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, η φεμτοκυψέλη FBS1 βρίσκεται στο ίδιο διαμέρισμα με το FMN2. Μεταξύ αυτών των δύο συσκευών παρεμβάλλεται τοίχωμα, οπότε οι απώλειες που εισάγουμε στο σύστημα είναι  $w = 5$  dB. Εφαρμόζοντας την συνάρτηση που δημιουργήσαμε στη Matlab λαμβάνουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Απόσταση (d)	PL (ITU-R)	P = EIRP – (PL + w)
5	58	-36
10	66	-44
15	71	-49
20	74	-52
25	77	-55

Το γράφημα της ισχύος που λαμβάνει ο οικιακός σταθμός βάσης FBS1 από το κινητό τερματικό FMN2 σε σχέση με την απόσταση παρουσιάζεται παρακάτω:

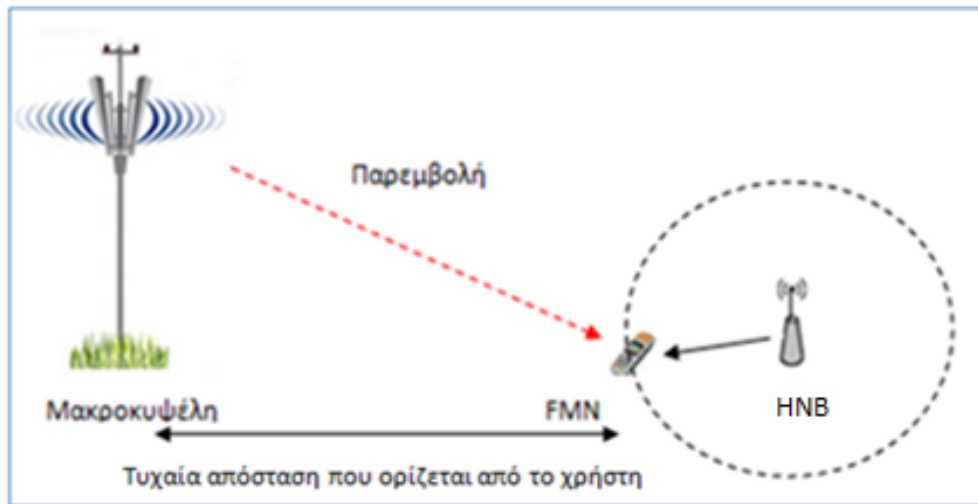


Εικόνα 54: Λαμβανόμενη ισχύς FBS1 από το κινητό τερματικό FMN2 σε σχέση με την απόσταση

Η γαλάζια καμπύλη, που αποτυπώνει τη λαμβανόμενη ισχύ της φεμτοκυψέλης FBS1 από το κινητό τερματικό FMN2, σε σχέση με την απόσταση, έχει πτωτική πορεία. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι, καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των δύο συσκευών, μειώνεται η λαμβανόμενη ισχύς και κατ' επέκταση και η παρεμβολή που δέχεται ο προσωπικός σταθμός βάσης.

### 5.2.7 Βελτίωση σεναρίου 3.1

Ο χρήστης της φεμτοκυψέλης αντιμετωπίζει παρεμβολές οι οποίες προέρχονται από γειτονικούς οικιακούς σταθμούς βάσης ή από τη μακροκυψέλη στην κατερχόμενη ζεύξη. Το σενάριο που ακολουθεί, στηρίζεται στο σενάριο 1 που μελετήσαμε προηγουμένως, όπου ο οικιακός χρήστης δέχεται παρεμβολές από τη μακροκυψέλη. Έχουμε κάνει την προσομοίωση περισσότερο πρακτική με την εισαγωγή μεταβλητών αντί για σταθερές τιμές. Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι πιο ακριβής, έτσι ώστε να μιμηθούν τις συνθήκες του πραγματικού κόσμου. Η τοπολογία του σεναρίου εξακολουθεί να είναι η ίδια με αυτή του σεναρίου 1.



Εικόνα 55: Τοπολογία σεναρίου 7

Στο σενάριο αυτό, εισάγουμε διάφορες μεταβλητές έτσι ώστε το σενάριο να μιμείται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τον πραγματικό κόσμο. Για το λόγο αυτό δημιουργούμε μια συνάρτηση στη Matlab, όπου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τοποθετήσει τους χρήστες (κινητά τερματικά) και τους σταθμούς βάσης σε τυχαίες και όχι σε καθορισμένες θέσεις. Καθώς ο χρήστης εισάγει την τυχαία θέση των συσκευών, η συνάρτηση υπολογίζει σύμφωνα με την κατάλληλη εξίσωση την απόσταση  $d$  μεταξύ των συσκευών και εξάγει την απώλεια, βάση του κατάλληλου προτύπου απωλειών. Για τον υπολογισμό των απωλειών, η συνάρτηση εισάγει και τυχαίο αριθμό τοιχωμάτων κάθε φορά, μεταξύ του κινητού τερματικού και των οικιακών σταθμών βάσης, διαφοροποιώντας κάθε φορά τις εκάστοτε απώλειες που προκύπτουν λόγω των

τοιχών. Τέλος, υπολογίζει τη λαμβανόμενη ισχύ που δέχεται το κινητό τερματικό, σε σχέση με την απόσταση που προκύπτει από την τυχαία εισαγωγή των συσκευών.

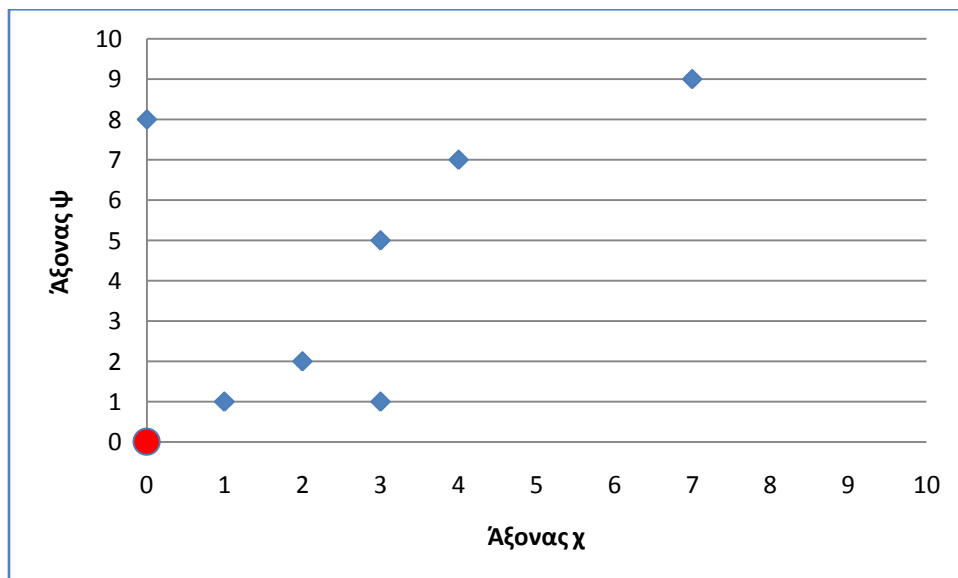
Στη μελέτη που θα πραγματοποιήσουμε θα λάβουμε υπόψη τα δεδομένα που είχαμε και στο σενάριο 1, δηλαδή θεωρούμε επίπεδο χρήσης μακροκυψέλης 50 % και ισχύ εκπομπής της μακροκυψέλης  $PT\_macroBS = 40$  dBm. Το κέρδος της κεραίας είναι  $Gain\_macroBS = 15$  dBi. Υπολογίζουμε το EIRP και προκύπτει:

$$EIRP = PT\_macroBS + Gain\_macroBS + 10\log(0.5) = 40 + 15 + 3 = 58 \text{ dBm}$$

Επίσης θεωρούμε ότι το ύψος του σταθμού βάσης μακροκυψέλης είναι 47 m και το ύψος του κινητού τερματικού 1.5 m. Οι απώλειες λόγω του τοίχου είναι  $w = 5$  dB. Η συνάρτηση εισάγει τυχαίο αριθμό τοιχωμάτων και όχι τυχαίο  $w$ . Τέλος η συχνότητα λειτουργίας είναι η  $f = 2100$  MHz.

- Μακροκυψέλη

Θα εφαρμόσουμε το νέο μοντέλο έτσι ώστε να εξάγουμε την λαμβανόμενη ισχύ και να προβούμε στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων. Για να γίνει περισσότερο ρεαλιστικό το σενάριο, θα θεωρήσουμε σταθερό το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης στο σημείο  $\chi, \psi = (0,0)$ , έτσι ώστε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν με βάση το σημείο αυτό. Ο χρήστης επιλέγει πλέον τυχαία το σημείο στο οποίο θα τοποθετηθεί το κινητό τερματικό.



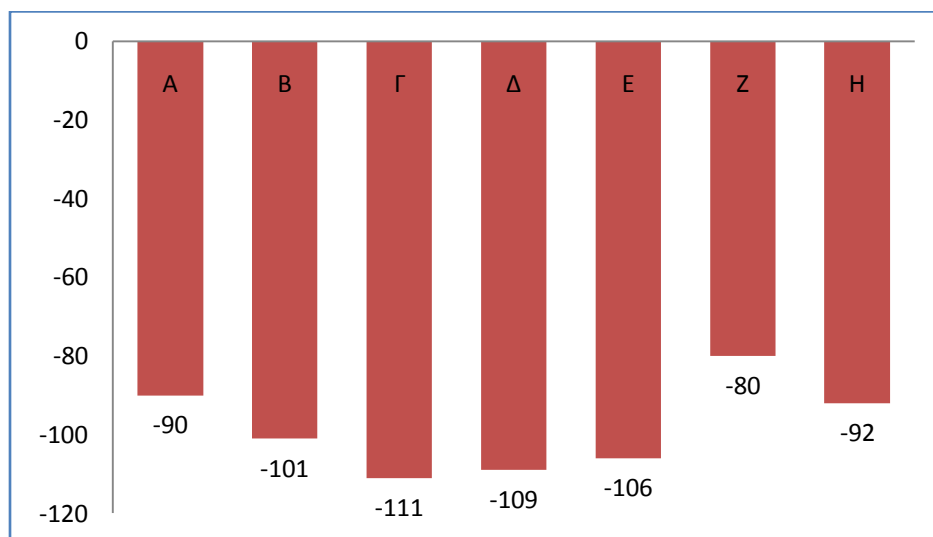
Εικόνα 56: Επιλογή τυχαίων σημείων στο χώρο για τη περίπτωση της μακροκυψέλης

Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται το σημείο (0,0), στο οποίο τοποθετούμε το σταθμό βάσης μακροκυψέλης. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως το σημείο αυτό παραμένει σταθερό. Με γαλάζιο χρώμα παριστάνονται οι τυχαίες θέσεις που επιλέξαμε για τα κινητά τερματικά. Θα μπορούσαμε να επιλέξουμε οποιεσδήποτε άλλες θέσεις. Η επιλογή των θέσεων αυτών έγινε με τυχαίο τρόπο.

Εφόσον επιλέξουμε τα σημεία, θα προκύψει ο πίνακας που ακολουθεί ο οποίος παρέχει τις απώλειες καθώς επίσης και την ισχύ που δέχεται κάθε φορά το κινητό τερματικό από τη μακροκυψέλη.

Σημείο ( $\chi_1, \psi_1$ ) ( $\chi_2, \psi_2$ )	Απώλειες (L)	P = EIRP - L
Σημείο Α (0,0) (2,2)	148	-90
Σημείο Β (0,0) (3,5)	159	-101
Σημείο Γ (0,0) (7,9)	169	-111
Σημείο Δ (0,0) (0,8)	167	-109
Σημείο Ε (0,0) (4,7)	164	-106
Σημείο Ζ (0,0) (1,1)	138	-80
Σημείο Η (0,0) (3,1)	150	-92

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα της λαμβανόμενης ισχύος του κινητού τερματικού από τη μακροκυψέλη για κάθε ένα από τα παραπάνω τυχαία σημεία που επιλέξαμε.

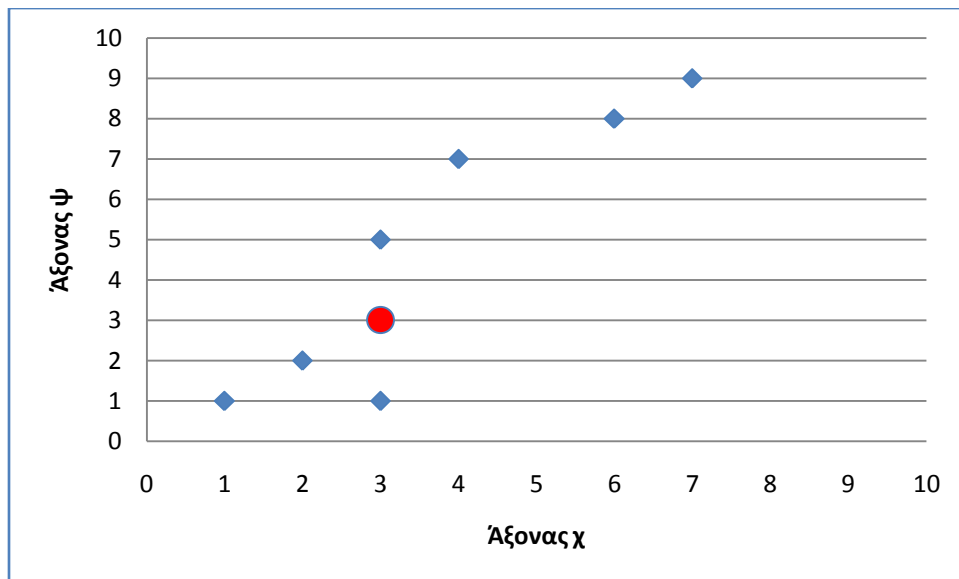


Εικόνα 57: Λαμβανόμενη ισχύς κινητού τερματικού από τη μακροκυψέλη για τα τυχαία σημεία

Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του κινητού τερματικού από την αρχή των αξόνων, δηλαδή από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης, τόσο μικρότερη είναι και η λαμβανόμενη ισχύς από αυτή, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της παρεμβολής. Παρατηρώ ότι η λαμβανόμενη ισχύς στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετά μικρή (μικρότερη από -100 dB) για τα σημεία που επιλέξαμε. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ της φεμτοκυψέλης και του χρήστη είναι αρκετά μεγάλη. Έτσι η παρεμβολή που δημιουργεί η μακροκυψέλη, δεν είναι τέτοια ώστε να αποτρέψει και εν τέλει να διακόψει την επικοινωνία μεταξύ του κινητού τερματικού και της φεμτοκυψέλης. Σε όλες τις περιπτώσεις ο χρήστης θα μπορεί να απολαμβάνει τις υπηρεσίες που του παρέχει ο προσωπικός σταθμός βάσης.

- Οικιακός σταθμός βάσης

Για να γίνει περισσότερο ρεαλιστικό το σενάριο, θα θεωρήσουμε σταθερό το σταθμό βάσης της φεμτοκυψέλης στο σημείο  $\chi, \psi = (3,3)$ , έτσι ώστε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν με βάση το σημείο αυτό. Επιλέγουμε και πάλι τα ίδια σημεία που επιλέξαμε για την περίπτωση της μακροκυψέλης. Η τοπολογία του δικτύου θα έχει την ακόλουθη διάταξη:



Εικόνα 58: Επιλογή τυχαίων σημείων στο χώρο για τη περίπτωση της φεμτοκυψέλης

Όπως αναφέραμε και πριν, θεωρούμε σταθερό τον οικιακό σταθμό βάσης στο σημείο (3,3) το οποίο αποτυπώνεται με κόκκινο χρώμα στην παραπάνω τοπολογία. Να



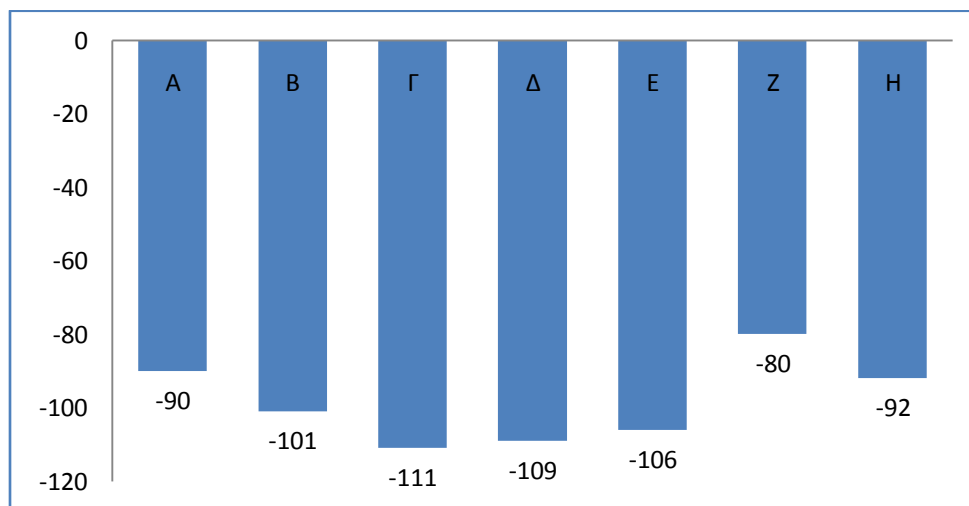
επισημάνουμε ότι θεωρούμε απώλειες λόγω παραθύρων 10 dB και απώλεια λόγω του τοίχου  $w = 5$  dB. Όπως και πριν αφήνουμε στη συνάρτηση να επιλέξει τυχαίο αριθμό τοιχωμάτων ανάμεσα στις δύο συσκευές. Για να μπορέσουμε να βρούμε τη λαμβανόμενη ισχύ, θα πρέπει να γνωρίζουμε το EIRP.

$$EIRP_f = PT\_femtoBS + Gain\_femtoBS + 10\log(0.5) + Gain\_femtoMS = 20 + 2 + 3 + 0 = 25 \text{ dBm.}$$

Εφόσον επιλέξουμε τα σημεία, θα προκύψει ο πίνακας που ακολουθεί ο οποίος παρέχει τις απώλειες καθώς επίσης και την ισχύ που δέχεται κάθε φορά το κινητό τερματικό από τη φεμτοκυψέλη.

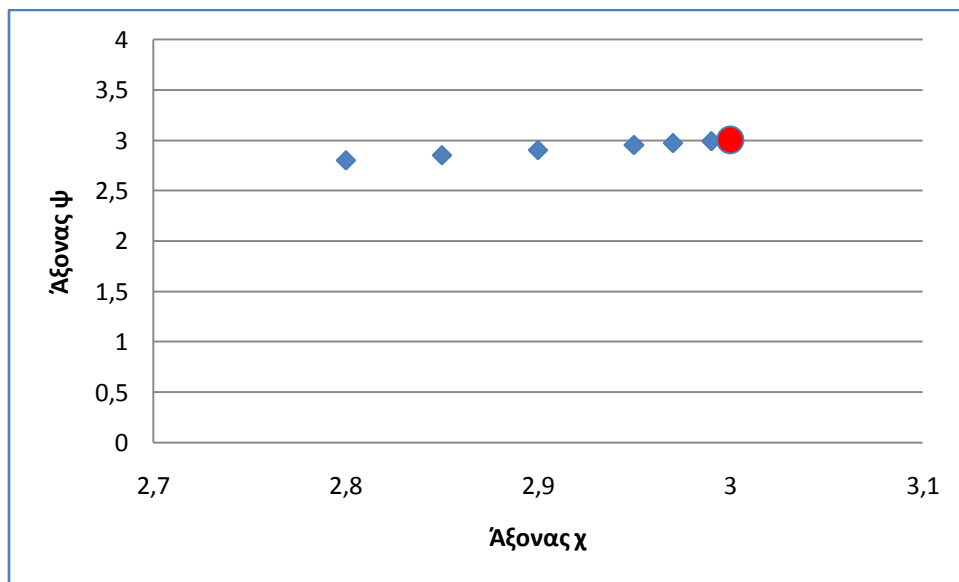
Σημείο ( $\chi_1, \psi_1$ ) ( $\chi_2, \psi_2$ )	Απώλειες (L)	P = EIRP - L
Σημείο A (0,0) (2,2)	168	-133
Σημείο B (0,0) (3,5)	166	-141
Σημείο Γ (0,0) (7,9)	187	-162
Σημείο Δ (0,0) (0,8)	176	-151
Σημείο E (0,0) (4,7)	178	-153
Σημείο Z (0,0) (1,1)	172	-147
Σημείο H (0,0) (3,1)	163	-138

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα της λαμβανόμενης ισχύος του κινητού τερματικού από τη φεμτοκυψέλη για κάθε ένα από τα παραπάνω τυχαία σημεία που επιλέξαμε.



Εικόνα 59: Λαμβανόμενη ισχύς κινητού τερματικού από τη φεμτοκυψέλη για τα τυχαία σημεία

Είναι φανερό ότι καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ του προσωπικού σταθμού βάσης και του κινητού τερματικού, η λαμβανόμενη ισχύς μειώνεται λόγω και των επιπλέον παρεμβολών που δέχεται ο χρήστης από τη μακροκυψέλη. Παρατηρούμε ότι για τα τυχαία σημεία που επιλέξαμε, δεν είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ του οικιακού σταθμού βάσης και του χρήστη, καθώς η ισχύς που λαμβάνει το κινητό τερματικό είναι αρκετά ασθενής και κάτω από -100 dB στις περισσότερες περιπτώσεις. Στα σημεία όπου η ισχύς είναι μέχρι και -100 dB μπορεί να καταστεί δυνατή η επικοινωνία και να λάβει υπηρεσίες ο οικιακός χρήστης. Στη συνέχεια θα δοκιμάσουμε να τοποθετήσουμε το κινητό τερματικό σε τυχαίες θέσεις αρκετά κοντά στο σταθμό βάσης της φεμτοκυψέλης, έτσι ώστε να μελετήσουμε την λαμβανόμενη ισχύ και να την συγκρίνουμε με τα μέχρι τώρα αποτελέσματα.

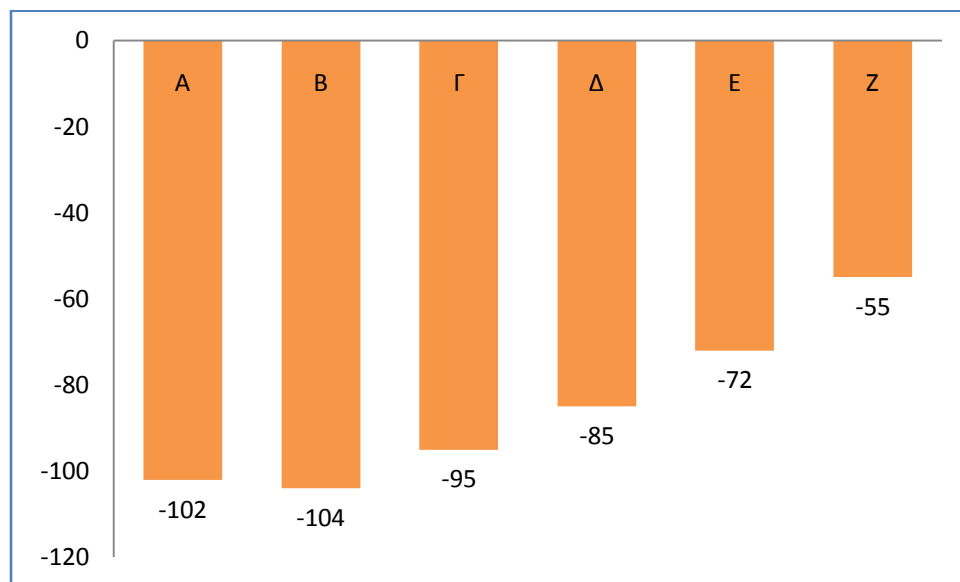


Εικόνα 60: Επιλογή τυχαίων σημείων στο χώρο για τη περίπτωση της φεμτοκυψέλης

Πλέον όπως φαίνεται και από τη παραπάνω τοπολογία, τοποθετήσαμε τους χρήστες σε τυχαίες θέσεις αρκετά κοντά στον οικιακό σταθμό βάσης. Στον πίνακα που ακολουθεί παραθέτουμε τα αποτελέσματα για την απώλεια καθώς επίσης και για την ισχύ που δέχεται το κινητό τερματικό.

Σημεία ( $\chi_1, \psi_1$ ) ( $\chi_2, \psi_2$ )	Απώλειες (PL)	P = EIRP - PL
Σημείο Α (3,3) (2,8 , 2,8)	127	-102
Σημείο Β (3,3) (2,85 , 2,85)	129	-104
Σημείο Γ (3,3) (2,9 , 2,9)	120	-95
Σημείο Δ (3,3) (2,95 , 2,95)	110	-85
Σημείο Ε (3,3) (2,97 , 2,97)	97	-72
Σημείο Ζ (3,3) (2,99 , 2,99)	80	-55

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα της λαμβανόμενης ισχύος του κινητού τερματικού από τη φεμτοκυψέλη για κάθε ένα από τα παραπάνω τυχαία σημεία που επιλέξαμε.

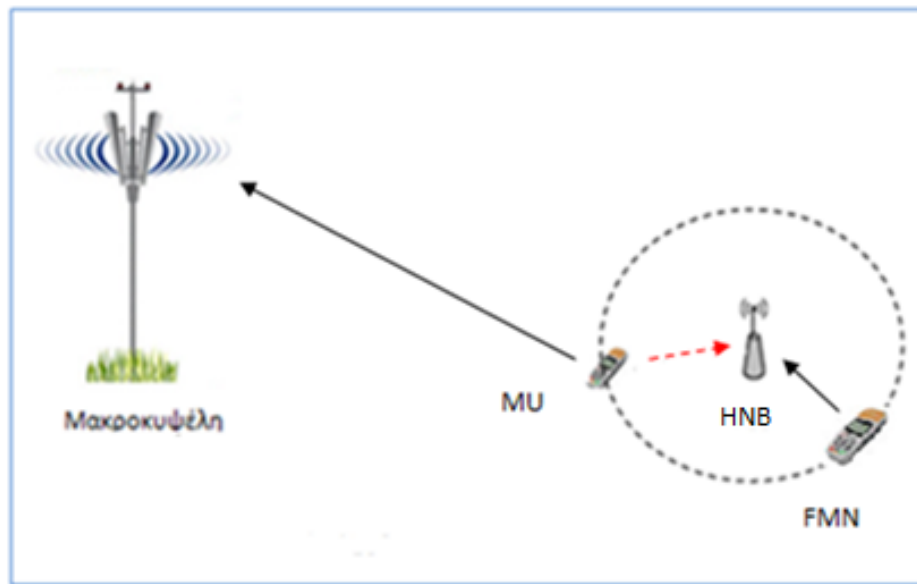


Εικόνα 61: Επιλογή τυχαίων σημείων στο χώρο για τη περίπτωση της φεμτοκυψέλης

Να επισημάνουμε ότι υποθέσαμε τυχαίο αριθμό τοιχωμάτων ανάμεσα στο κινητό τερματικό και τον προσωπικό σταθμό βάσης, γεγονός που έχει αντίκτυπο στον υπολογισμό της απώλειας. Παρά τον τυχαίο αριθμό τοιχωμάτων, παρατηρούμε ότι όσο περισσότερο μειώνεται η απόσταση μεταξύ του κινητού τερματικού και της φεμτοκυψέλης, τόσο αυξάνεται και η ισχύς που αυτό λαμβάνει. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παροχή υπηρεσιών φωνής και δεδομένων για τους οικιακούς χρήστες.

### 5.2.8 Βελτίωση σεναρίου 3.4

Ο χρήστης της φεμτοκυψέλης, δέχεται παρεμβολές από άλλους χρήστες οικιακών σταθμών βάσης και χρήστες μακροκυψέλης στην ανερχόμενη ζεύξη. Το σενάριο που ακολουθεί βασίζεται στο σενάριο 3.4 που μελετήθηκε πιο πάνω, όπου ένας σταθμός βάσης φεμτοκυψέλης δέχεται παρεμβολές από τον χρήστη της μακροκυψέλης.

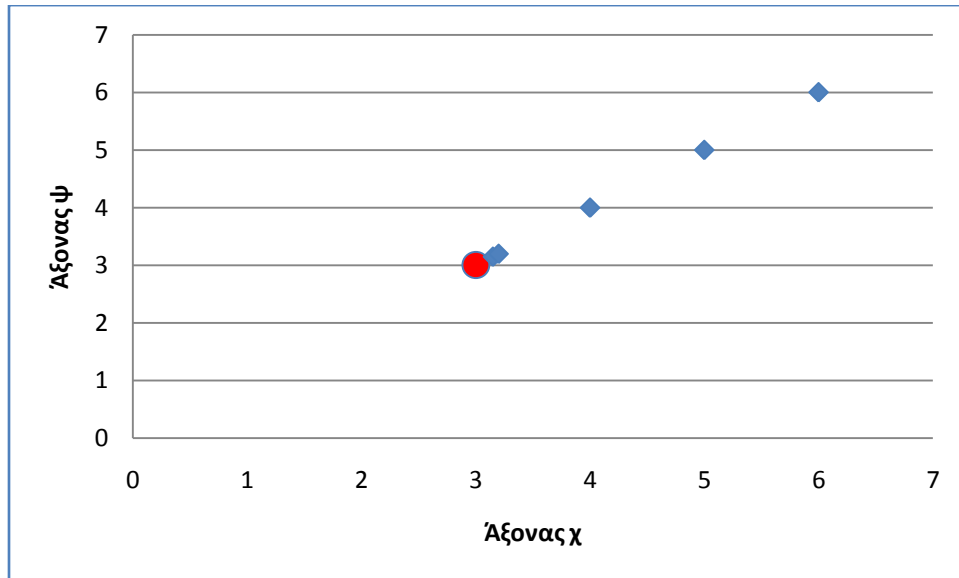


Εικόνα 62: Τοπολογία σεναρίου 4

Για να είναι σε θέση ο χρήστης της φεμτοκυψέλης να απολαμβάνει υπηρεσίες, εισάγουμε τον έλεγχο ισχύος για την ανερχόμενη ζεύξη στους χρήστες της μακροκυψέλης προκειμένου να μειωθούν οι παρεμβολές και να παρέχονται υπηρεσίες στον χρήστη του οικιακού σταθμού βάσης. Η συνάρτηση που δημιουργήσαμε στη Matlab θα λαμβάνει υπόψη την απόσταση του χρήστη μακροκυψέλης από το σταθμό βάσης και θα χορηγεί τη κατάλληλη ισχύ για την ανερχόμενη ζεύξη. Με άλλα λόγια, προσαρμόζουμε την ισχύ μετάδοσης και όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ κινητού τερματικού και μακροκυψέλης, ανάλογα θα αυξάνεται και η ισχύς αυτού και το αντίστροφο.

Να επισημάνουμε ότι θεωρούμε τα ίδια δεδομένα με αυτά του σεναρίου 3.4. Υποθέτουμε ότι ο σταθμός βάσης της φεμτοκυψέλης βρίσκεται στο σημείο (3,3). Επιλέγουμε τυχαία την απόσταση μεταξύ του κινητού τερματικού και του οικιακού σταθμού βάσης. Η συνάρτηση που δημιουργήσαμε επιλέγει την κατάλληλη ισχύ μετάδοσης του χρήστη της μακροκυψέλης σύμφωνα με την απόσταση, έτσι ώστε να μειωθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι παρεμβολές. Τα σημεία που τυχαία

επιλέγουμε παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί αλλά και στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 63: Επιλογή τυχαίων σημείων στο χώρο για τη φεμτοκυψέλη και τους χρήστες της μακροκυψέλης

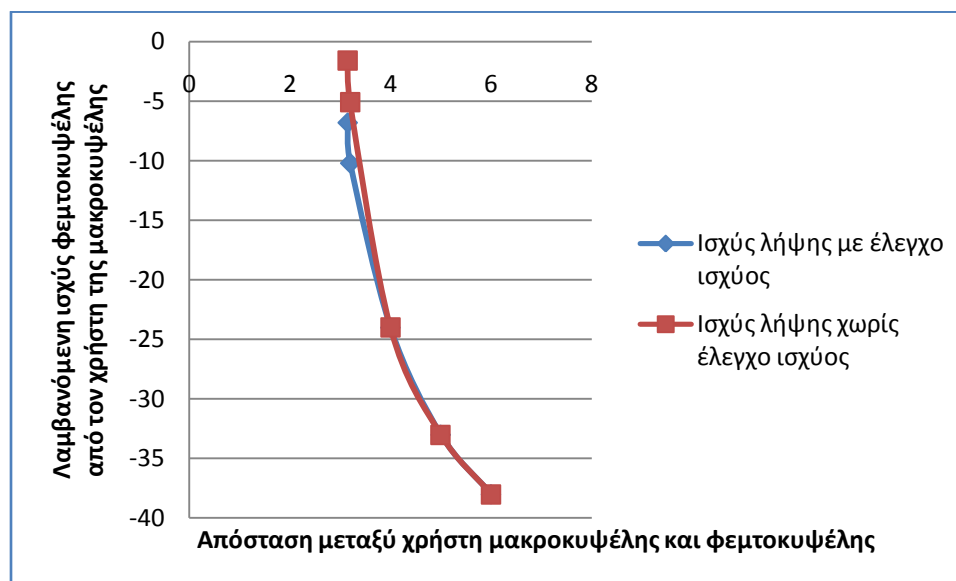
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τυχαία σημεία που επιλέξαμε, η ισχύς του χρήστη της μακροκυψέλης που επιλέγει η συνάρτηση που δημιουργήσαμε με βάση την απόσταση, οι απώλειες για τα σημεία αυτά, καθώς επίσης και η λαμβανόμενη ισχύς του οικιακού χρήστη.

Σημεία ( $\chi_1, \psi_1$ ) ( $\chi_2, \psi_2$ )	Ισχύς χρήστη μακροκυψέλης (dBm)	Απώλειες (PL)	$P = \text{EIRP} - \text{PL}$
Σημείο Α (3,3) (3,15 ,3,15)	21,8	28,6	-6,8
Σημείο Β (3,3) (3,2 , 3,2)	21,8	32,08	-10,2
Σημείο Γ (3,3) (4 , 4)	27	51,65	-24
Σημείο Δ (3,3) (5 , 5)	27	60	-33
Σημείο Ε (3,3) (6 , 6)	27	65	-38

Στην περίπτωση που δεν εφαρμόσουμε τον έλεγχο ισχύος και θέσουμε την ισχύ του χρήστη της μακροκυψέλης ίση με 27 dBm σε όλες τις θέσεις, τότε θα έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα για τα ίδια τυχαία σημεία που επιλέξαμε.

Σημεία ( $\chi_1, \psi_1$ ) ( $\chi_2, \psi_2$ )	Ισχύς χρήστη μακροκυψέλης (dBm)	Απώλειες (PL)	$P = \text{EIRP} - \text{PL}$
Σημείο Α (3,3) (3,15 ,3,15)	27	28,6	-1,58
Σημείο Β (3,3) (3,2 , 3,2)	27	32,08	-5,08
Σημείο Γ (3,3) (4 , 4)	27	51,65	-24
Σημείο Δ (3,3) (5 , 5)	27	60	-33
Σημείο Ε (3,3) (6 , 6)	27	65	-38

Παρακάτω παρουσιάζονται σε γράφημα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή ή μη του ελέγχου ισχύος, προκειμένου να αποτυπωθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι ομοιότητες και οι διαφορές.



Εικόνα 64: Λαμβανόμενη ισχύς φεμτοκυψέλης από τον χρήστη της μακροκυψέλης για την εφαρμογή ή μη του ελέγχου ισχύος για τους χρήστες της μακροκυψέλης

Παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή του ελέγχου ισχύος, έχουμε χαμηλότερες παρεμβολές για μικρές αποστάσεις μεταξύ του κινητού τερματικού που εξυπηρετείται από τη μακροκυψέλη και του προσωπικού σταθμού βάσης. Όσο πιο κοντά είναι ο μακροκυψελικός χρήστης στη φεμτοκυψέλη, μειώνεται αναλόγως και η ισχύς

μετάδοσης του, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται και η ισχύς του σήματος που δέχεται η φεμτοκυψέλη από αυτό. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται και οι παρεμβολές που δέχεται ο προσωπικός σταθμός βάσης από τον χρήστη της μακροκυψέλης. Για μεγάλες αποστάσεις, ο έλεγχος ισχύος δεν έχει ιδιαίτερο αποτέλεσμα, καθώς η ισχύς του κινητού τερματικού θα είναι πάντοτε 27 dBm. Επίσης, η ισχύς του σήματος που λαμβάνει η φεμτοκυψέλη από τον μακροκυψελικό χρήστη μειώνεται καθώς αυξάνεται η μεταξύ τους απόσταση. Στην ουσία ο έλεγχος ισχύος έχει όφελος για μικρές αποστάσεις. Από τις καμπύλες του γραφήματος, είναι φανερή η διαφορά της χρήσης του ελέγχου ισχύος για τις μικρές αποστάσεις μεταξύ των δύο συσκευών. Χωρίς έλεγχο ισχύος, δηλαδή για ισχύ μετάδοσης κινητού τερματικού 27 dBm και για μικρές αποστάσεις, παρατηρούμε ότι η φεμτοκυψέλη λαμβάνει ισχυρότερο σήμα, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα και υψηλότερες παρεμβολές. Για μεγάλες αποστάσεις παρατηρώ ότι η ισχύς του σήματος είναι η ίδια. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς μετάδοσης του κινητού τερματικού παίρνει την τιμή των 27 dBm σύμφωνα με τη συνάρτηση που δημιουργήσαμε.



## Κεφάλαιο 6

### Συμπεράσματα

Στην εργασία ασχοληθήκαμε με την έννοια της φεμτοκυψέλης, η οποία αποτελεί και τη θεμελιώδη έννοια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά παρουσιάστηκε η αρχιτεκτονική του οικιακού σταθμού βάσης και το πώς αυτός λειτουργεί. Έπειτα παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα, καθώς επίσης και οι περιοριστικοί παράγοντες χρησιμοποίησής τους. Κατόπιν μελετήθηκε το θέμα των παρεμβολών, το οποίο αποτελεί και το μεγαλύτερο πρόβλημα προς επίλυση σε ένα δίκτυο δύο επιπέδων. Δημιουργήσαμε σενάρια παρεμβολών και εξάγαμε διάφορα αποτελέσματα μέσω πινάκων και γραφημάτων.

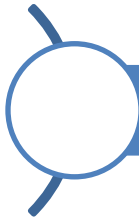
Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω αποτελούν ειδικές περιπτώσεις σεναρίων που μπορεί να οδηγήσουν σε ισχυρές παρεμβολές. Παρατηρούμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, ο εκάστοτε χρήστης είναι σε θέση να απολαμβάνει υπηρεσίες φωνής και δεδομένων χωρίς όμως αυτό να ισχύει πάντοτε. Η παρεμβολή που δέχεται η εκάστοτε συσκευή εξαρτάται, ως επί το πλείστον, από την απόσταση μεταξύ αυτού που παράγει τις παρεμβολές και αυτού που τις λαμβάνει. Στη μελέτη που πραγματοποιήσαμε, προσπαθήσαμε να κάνουμε περισσότερο παραστατικά και ρεαλιστικά τα σενάρια, εισάγοντας διάφορες μεταβλητές, όπως την τυχαία επιλογή θέσης ανάμεσα στο σταθμό βάσης και το χρήστη. Τέλος, εισάγαμε τον έλεγχο ισχύος στους μακροκυψελικούς χρήστες με σκοπό τη μελέτη των παρεμβολών από τη χρησιμοποίησή του. Το συμπέρασμα που προκύπτει από την εισαγωγή του ελέγχου ισχύος, είναι ότι η παρεμβολή μειώνεται για μικρές αποστάσεις μεταξύ των συσκευών, αλλά παραμένει και πάλι σε υψηλά επίπεδα καθώς η απόσταση αυξάνει.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι φεμτοκυψέλες αποτελούν τη νέα λύση για την αύξηση της κάλυψης και της ρυθμαπόδοσης στους εσωτερικούς χώρους. Η αρχιτεκτονική, καθώς επίσης και ο τρόπος λειτουργίας των οικιακών σταθμών βάσης, τους κάνει να παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα και για το λόγο αυτό γνωρίζουν μεγάλη εμπορική άνθιση και επιτυχία. Έτσι όλο και περισσότεροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι υιοθετούν και παρέχουν τέτοιου είδους υπηρεσίες, γεγονός που έχει και αντίκτυπο στην αύξηση των εσόδων τους. Παρ' όλα αυτά η τεχνολογία των φεμτοκυψελών παρουσιάζει και κάποιες αδυναμίες, με κύριο μειονέκτημα την εμφάνιση παρεμβολών μεταξύ των στοιχείων του δικτύου. Το πρόβλημα των



παρεμβολών είναι δυνατόν να μετριαστεί με την εισαγωγή διάφορων τεχνικών όπως ο έλεγχος ισχύος.

Ένα πεδίο το οποίο αξίζει να μελετηθεί στο μέλλον είναι η παροχή οικονομικού κινήτρου από τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας προς τους συνδρομητές που χρησιμοποιούν υπηρεσίες φεμτοκυψελών, ώστε να εφαρμόζουν πολιτική ανοικτής πρόσβασης. Μια τέτοια εφαρμογή θα πρέπει να είναι συνάρτηση της χωρητικότητας της DSL ενσύρματης σύνδεσης του συνδρομητή και του κόστους αυτής, του οικονομικού προγράμματος που διατηρεί με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και του οικονομικού οφέλους που προκύπτει για τον πάροχο. Ένα τέτοιο κίνητρο θα μπορούσε να καταστήσει την εγκατάσταση νέων προσωπικών σταθμών βάσης ακόμη πιο ελκυστική και να εδραιώσει τη θέση μιας εταιρίας κινητής τηλεφωνίας στην αγορά.



## Βιβλιογραφία

### Βιβλιογραφία

1. P Xia, HS Jo, J Andrews, Fundamentals of inter-cell overhead signaling in heterogeneous cellular networks. *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.* 6(3), 257–269 (2012)
2. V Chandrasekhar, JG Andrews, A Gatherer, Femtocell networks: a Survey. *IEEE Commun. Mag.* 46(9), 59–67 (2008)
3. A Damnjanovic, J Montojo, Y Wei, T Ji, T Luo, M Vajapeyam, T Yoo, O Song, D Malladi, A survey on 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Wirel. Commun.* 18(3), 10–21 (2011)
4. Y Li, A Maeder, L Fan, A Nigam, J Chou, Overview of femtocell support in advanced WiMAX systems. *IEEE Commun. Mag.* 49(7), 122–130 (2011)
5. P Mach, Z Becvar, QoS-guaranteed power control mechanism based on the frame utilization for femtocells. *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.* 2011(Article ID 802548), 16 (2011)
6. M Yavuz, F Meshkati, S Nanda, A Pokhariyal, N Johnson, B Raghothaman, A Richardson, Interference management and performance analysis of UMTS/HSPA+ femtocells. *IEEE Commun. Mag.* 47(9), 102–109 (2009)
7. HS Jo, C Mun, J Moon, JG Yook, Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 8(10), 4906–4910 (2009)
8. HS Jo, C Mun, J Moon, JG Yook, Self-optimized coverage coordination in femtocell networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 9(10), 2977–2982 (2010)
9. V Chandrasekhar, M Kountouris, JG Andrews, Coverage in multi-antenna two-tier networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 8(10), 5314–5327 (2009)
10. I Guvenc, MR Jeong, F Watanabe, H Inamura, A hybrid frequency assignment for femtocells and coverage area analysis for co-channel operation. *IEEE Commun. Lett.* 12(12), 880–882 (2008)

11. D Lopez-Perez, A Ladanyi, A Juttner, J Zhang, in IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009. OFDMA femtocells: a self-organizing approach for frequency assignment, (Tokyo, Japan, 2009), pp. 2202–2207
12. V Chandrasekhar, JG Andrews, Spectrum allocation in two-tier networks. IEEE Trans. Commun. 57(10), 3059–3068 (2009)
13. JPM Torregosa, R Enkhbat, WJ Hwang, Joint power control, base station assignment, and channel assignment in cognitive femtocell networks. EURASIP J. Wirel. Commun. Netw. 2010, 6:1–6:12 (2010)
14. S Al-Rubaye, A Al-Dulaimi, J Cosmas, Cognitive femtocell. IEEE Veh. Technol. Mag. 6, 44–51 (2011)
15. H Claussen, in IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007, PIMRC 2007. Performance of macro and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure (Athens, Greece, 2007), pp. 1–5
16. S Joshi, R Cheung, P Monajemi, J Villaseñor. Traffic-based study of femtocell access policy impacts on HSPA service quality (Honolulu, USA, 2009), pp. 1–6
17. P Xia, V Chandrasekhar, J Andrews, Open vs. closed access femtocells in the uplink. IEEE Trans. Wirel. Commun. 9(12), 3798–3809 (2010)
18. D Choi, P Monajemi, S Kang, J Villaseñor, in IEEE Global Telecommunications Conference, 2008. Dealing with loud neighbors: the benefits and tradeoffs of adaptive femtocell access (New Orleans, USA, 2008), pp. 1–5
19. M Simsek, H Wu, B Zhao, T Akbudak, A Czylik, in Wireless Advanced (WiAd), 2011. Performance of different cell selection modes in 3GPP-LTE macro-/femtocell scenarios (London, UK, 2011), pp. 126–131
20. G de la Roche, A Valcarce, D Lopez-Perez, J Zhang, Access control mechanisms for femtocells. IEEE Commun. Mag. 48, 33–39 (2010)
21. [FF08] Femto Forum, “Interference Management in UMTS Femtocells”, December 2008.
22. [FF09] Femto Forum Working Group 2, “Recommended Simulation Parameters 850 MHz”, April 2009. [COST231] Commission of the European Communities, “Digital Mobile Radio: COST 231 View on the Evolution Towards 3rd Generation Systems”, L-2920, Luxembourg, 1989.

23. [ITU1238] International Telecommunication Union, "ITU-R Recommendations P.1238: Propagation data and prediction models for the planning of indoor radiocommunications systems and radio local area networks in the frequency range 900MHz to 100GHz", Geneva, 1997.
24. [ITU1411] International Telecommunication Union, "ITU-R Recommendations P.1411-3: Propagation data and prediction methods for the planning of short range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz", Geneva, 2005.
25. [Hol06] H. Holma and A. Toskala, "HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications", J. Wiley & Sons, Ltd, 2006.
26. [Kob92] H. Kobayashi, G. Patrick, Preliminary Building Attenuation Model, NTIA Technical Memorandum 92-155, 1992.
27. [Stav03] Stavrou, S. Saunders, S.R., Factors influencing outdoor to indoor radio wave propagation, Intl Conference on Antennas and Propagation (ICAP), 2003.
28. [Dav97] Davidson, A. and Hill C., Measurement of Building Penetration into Medium Buildings at 900 and 1500 MHz, IEEE Transactions on Vehicular Technology, February 1997.
29. [Kee90] J. M. Keenan, A. J. Motley, "Radio coverage in buildings", British Telecom Technology Journal, vol. 8, no. 1, Jan. 1990, pp19-24.
30. [Lai02] J. Laiho, A. Wacker and T. Novosad, "Radio Network Planning and Optimization for UMTS", J. Wiley & Sons, Ltd, 2002.
31. [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org)
32. <http://www.femtoforum.org>
33. <http://en.wikipedia.org/wiki/2G>
34. <http://www.ieee.org/index.html>
35. Femtocell Network Architecture and Signaling Protocol Options, V. Srinivasa Rao & Ravi Raj Bhat, Apr 2008.
36. "Femtocell Market Status-Infoma" 2011Q4.
37. Huawei\_Gateway\_V2\_Greek\_100817.pdf
38. Διπλωματική εργασία Ζόμπολα Ιωάννη

39. Διπλωματική εργασία Μεσοδιακάκη Αγάπη
40. [www.vodafone.gr](http://www.vodafone.gr)
41. [www.cosmote.gr](http://www.cosmote.gr)
42. Διπλωματική εργασία Γκότσης Ηλίας
43. Femtocell primer, quickly get up to speed on this new mobile phone technology, David Chambers
44. <http://el.wikipedia.org/wiki/WiMAX>
45. <http://el.wikipedia.org/wiki/LTE>
46. <http://www.smallcellforum.org/>



## Παράρτημα 1 : Συντομογραφίες

BS	: Base Station
BSC	: Base Station Controller
BSS	: Base Station Subsystem
BTS	: Base Transceiver Station
CDMA	: Code Division Multiple Access
CN	: Core Network
EDGE	: Enhanced Data for GSM Evolution
ETSI	: European Telecommunications Standards Institute
FDD	: Frequency Division Duplex
FDMA	: Frequency Division Multiple Access
FMN	: Femtocell User
GPRS	: General Packet Radio Service
GSM	: Global System for Mobile Communications
HLR	: Home Location Register
HNB	: Home Node B
HSCSD	: High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	: High Speed Downlink Packet Access
HS-DSCH	: High Speed Downlink Shared CHannel
ITU	: International Telecommunication Union
LA	: Location Area
ME	: Mobile Equipment
MS	: Mobile Station
MT	: Mobile Terminal
MU	: Macrocell User
NMC	: Network Management Center
PCCCH	: Packet Common Control Channel
PSTN	: Public Switched telephone Network
QoS	: Quality of Service
RF	: Radio Frequency

RS	: Radio System
SGSN	: Serving GPRS Support Node
SIR	: Signal to Interference Ratio
SNR	: Signal to Noise Ratio
TDMA	: Time Division Multiple Access
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	: Universal Terrestrial Radio Access Network
VLR	: Visitor Location Register
WCDMA	: Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	: Wireless Local Area Network