

# Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

## *Το Περιβάλλον Ράδιο-Κάλυψης στο LTE - Βασικές Αρχές Κυτταρικής Κάλυψης*

### **5.1 Εισαγωγή**

Ο σχεδιασμός του ράδιο-δικτύου ενός κυτταρικού συστήματος κινητής τηλεφωνίας βασίζεται στη βασική θεμελιώδη έννοια της **κυτταρικής κάλυψης**.

**Κύτταρο ή Κυψέλη (sector or cell) ονομάζουμε τη γεωγραφική περιοχή η οποία καλύπτεται νοητά από Η/Μ ακτινοβολία εκπεμπόμενη από μία κεραία του σταθμού βάσης, και η οποία οριοθετείται από ένα κατώφλι στάθμης ισχύος.**

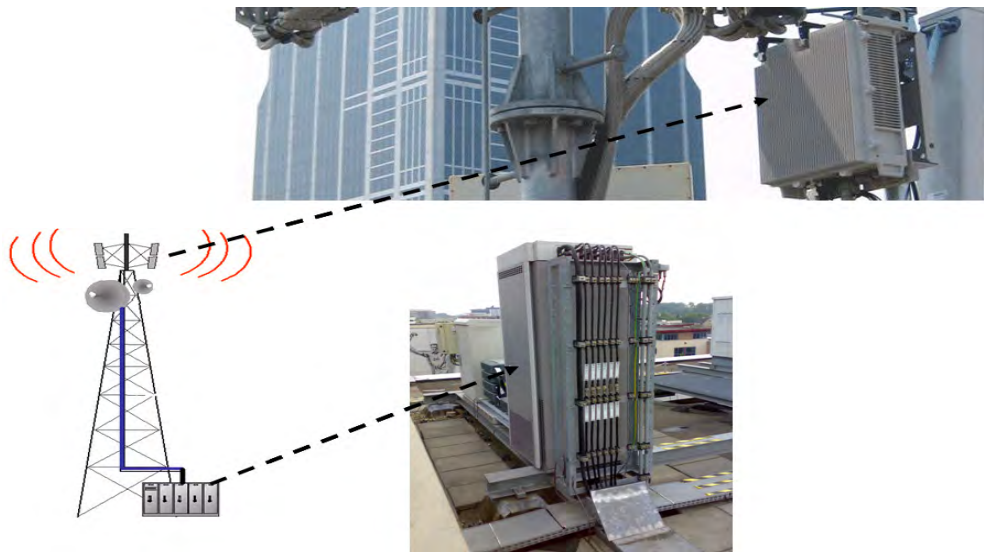
Αυτός ο ορισμός είναι πολύ βασικός και πρέπει να κατανοηθεί από τους αναγνώστες καθότι πολλές φορές γίνονται παρερμηνείες και η εντύπωση που μένει στον αναγνώστη είναι λανθασμένη. Πράγματι η κεραία ενός σταθμού βάσης εκπέμπει στον αέρα Η/Μ ακτινοβολία σε μία συχνότητα, εντός της επιτρεπόμενης μπάνας συχνοτήτων. Η ακτινοβολία αυτή διαδίδεται στο γεωγραφικό ανάγλυφο ακολουθώντας βασικές αρχές φυσικής και κυματικής μετάδοσης περιοριζόμενη από όλα τα φυσικά (λόφοι, δέντρα, δάση κτλπ) και τα τεχνητά εμπόδια (κτίρια).

Φαινόμενα όπως διάθλαση, ανάκλαση, περίθλαση, απόσβεση κτλπ. συνεισφέρουν στην διάδοση της ακτινοβολίας. Έτσι η μορφή ενός κυττάρου δεν έχει κάποιο συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα αλλά έχει μία τυχαία και άναρχη δομή στο χώρο εξαρτώμενη από την ίδια την τοπολογία του χώρου, σχήμα 5.1 μαύρο πλαίσιο.

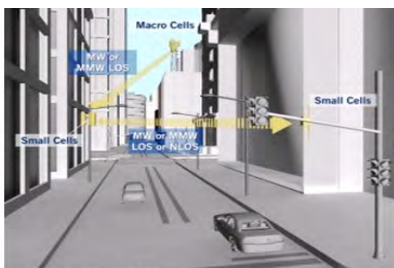


**Σχήμα 5.1:** Παρουσίαση πραγματικής γεωγραφικής κάλυψης κυττάρου

Παρόλα αυτά, όταν οι μηχανικοί του δικτύου σχεδιάζουν στο χαρτί την Η/Μ κάλυψη δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν τέτοια άμορφα σχήματα. Έτσι χρησιμοποιούνται δομές όπως κύκλοι, τετράγωνα ή εξάγωνα για να σχεδιάσουν την κάλυψη σε μία γεωγραφική περιοχή στο χάρτη, δομές οι οποίες όπως εξηγήσαμε ουδεμία σχέση έχουν με την πραγματικότητα, αλλά είναι εύχρηστες στον απλό σχεδιασμό. Αξίζει να αναφερθεί ότι η κεραία (το όλον κεραίο-σύστημα συμπεριλαμβανομένου και του πυλώνα πάκτωσης) και ο σταθμός βάσης είναι συνήθως διακριτά. Αυτό συμβαίνει συνήθως στα μακρο-κύτταρα (macro cells). Στα μικρο κύτταρα (micro cells) και εν γένει στα μικρότερης εμβέλειας και ισχύος εκπομπής κύτταρα (pico cells & fempto cells) πολλές φορές έχουμε την δυνατότητα να τα αποκρύψουμε στον περιβάλλοντα χώρο. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η ιδέα ενός macro cell και στο σχήμα 5.3 η ιδέα ενός micro cell.



**Σχήμα 5.2:** Παρουσίαση δομής κέρατο-συστήματος σταθμού βάσης macro cell



Micro cells in a city street



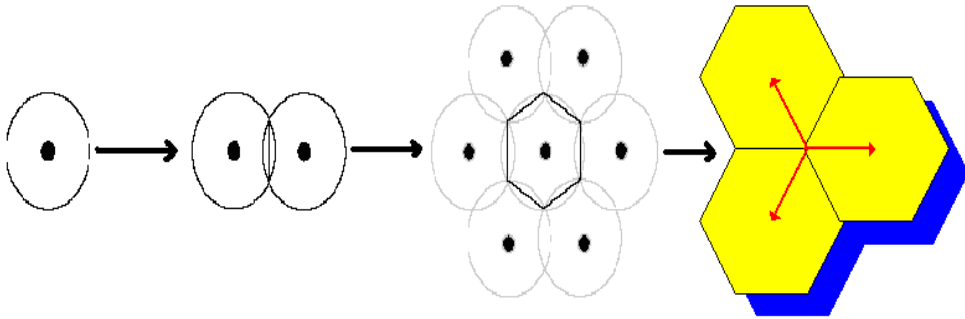
Micro cell on a lighting pole



Micro cell on building wall

**Σχήμα 5.3:** Παρουσίαση διακριτικού σχεδιασμού μηχανήματος micro cell

Στη θεωρία, για να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε και να μελετήσουμε την αρχιτεκτονική σχεδίαση κάλυψης μίας περιοχής, δεν μας ενδιαφέρουν τυχόν αποκλίσεις από ένα τέλειο σχήμα κυττάρου. Ποιό θα είναι λοιπόν το ιδανικότερο σχήμα ενός κυττάρου; Η απάντηση είναι το κανονικό εξάγωνο. Όσο και αν φαίνεται παράξενο στον αναγνώστη αυτή η επιλογή σχήματος, είναι δικαιολογημένη, διότι το κανονικό εξάγωνο είναι το γεωμετρικό σχήμα που καλύπτει πλήρως μία επιφάνεια χωρίς επικαλύψεις. Αντιθέτως ο κύκλος δεν είναι πρακτικό από σχεδιαστική άποψη, διότι υπάρχουν κενές περιοχές και περιοχές επικάλυψης, δηλαδή παρεμβολές. Οι σχεδιαστές λοιπόν του ράδιο-δικτύου επέλεξαν το κανονικό εξάγωνο ως το σχήμα ενός κυττάρου για το σχεδιασμό ενός κυτταρικού δικτύου. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η αδυναμία επίλυσης της πλήρους κάλυψης με κυκλικά κύτταρα και η λύση που δίδεται με τα εξάγωνα *omni* και *sectorized cells*.



**Σχήμα 5.4:** Χρήση εξαγώνου στον κυτταρικό σχεδιασμό

Το διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να καλύπτουν με πολύ καλή προσέγγιση όλο το εμβαδόν του κυττάρου. Οι κεραιές αυτές χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στις **κατευθυντικές** (*directional antennae*) και στις **παν-κατευθυντικές** (*omni-directional antennae*). Οι παν-κατευθυντικές κεραιές εξυπηρετούν κύτταρα μεγάλης εμβείας και χαμηλών απαιτήσεων χωρητικότητας συνδρομητών. Οι κατευθυντικές κεραιές εξυπηρετούν κύτταρα που χωρίζονται σε τομείς (*sectors*) για την εξυπηρέτηση συγκεκριμένων τομέων της γεωγραφικής περιοχής κάλυψης του κυττάρου το οποίο ονομάζεται *sectorised cell*. Ακολουθεί μία σύντομη ερμηνεία των δύο κατηγοριών κυτταρικής κάλυψης:

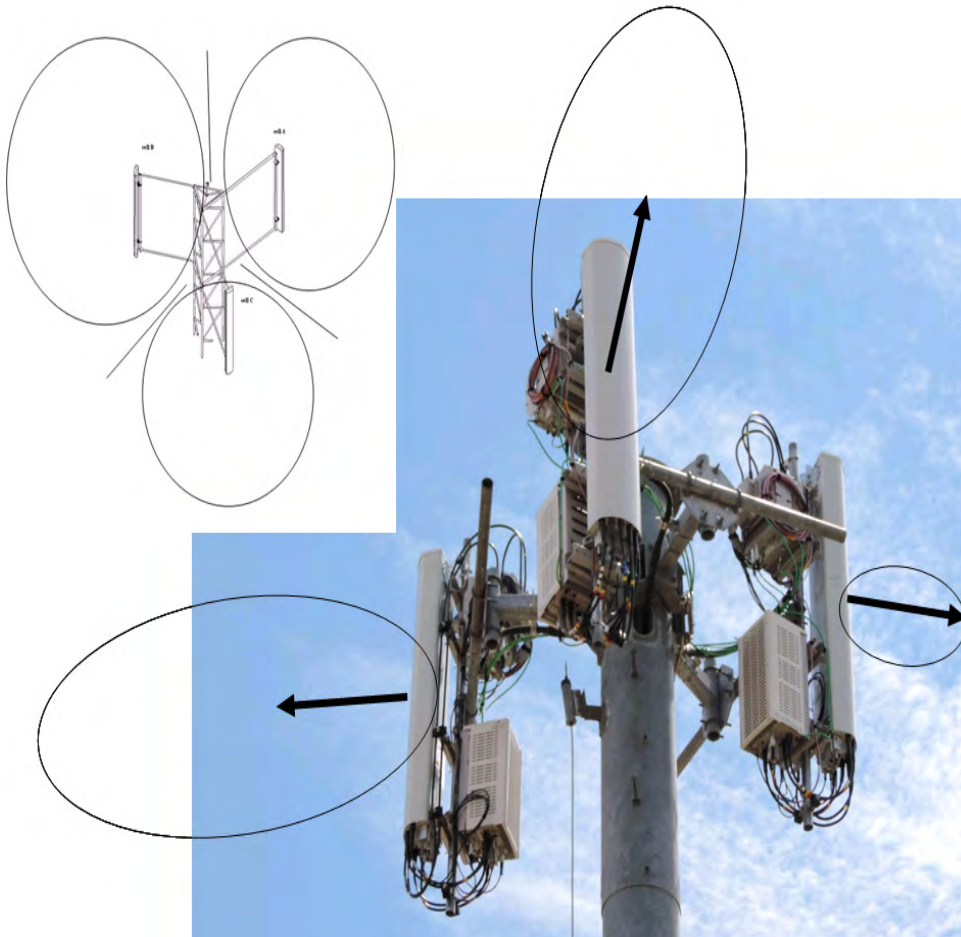
- **Omni directional cell:** Ένα παν-κατευθυντικό κύταρο (omni cell) εξυπηρετείται από μία κεραία του σταθμού βάσης η οποία εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου με σχεδόν την ίδια ισχύ (κάλυψη σε εμβέλεια  $360^{\circ}$  μοιρών), σχήμα 5.5.



**Σχήμα 5.5:** Παρουσίαση γεωγραφικής κάλυψης με **omni-directional antenna**

- **Sector cell:** Ένα κύταρο με κατευθυντική κεραία (sectorized directional antenna) κάλυψης αποτελείται από μία κεραία η οποία εκπέμπει σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση έχοντας στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας κατά κύριο λόγο ένα οριζόντιο εύρος λοβού ενίοτε  $120^{\circ}$  ή  $60^{\circ}$ . Το οριζόντιο εύρος του λοβού είναι συσχετιζόμενο με τον αριθμό των κυττάρων το οποίο θα θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε για να καλύψουμε περιμετρικά  $360^{\circ}$  τη γεωγραφική περιοχή αναλογιζόμενοι την εκτιμώμενη παρεμβολή λόγω αλληλοκαλύψεως των κυττάρων στον γεωγραφικό χώρο. Βέβαια ο αριθμός των κεραιών-κυττάρων που θα χρησιμοποιήσουμε είναι συσχετιζόμενος επίσης και με την έκδοση του εκάστοτε μηχανήματος

(BTS version) που θα χρησιμοποιήσουμε και το οποίο υποστηρίζει συγκεκριμένο αριθμό υποδοχών και πομποδεκτών (hardware constraints). Έτσι εάν χρησιμοποιήσουμε κεραιές με εύρος λοβού  $60^\circ$  θα χρειαστούμε 6 κεραιές για κάλυψη όλου του χώρου ( $6 \times 60^\circ = 360^\circ$ ), με εύρος  $120^\circ$  θα χρειαστούμε 3 κεραιές και ούτω καθεξής. Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η ιδέα των τριών κεραιών οι οποίες δημιουργούν πλήρη γεωγραφική κάλυψη.



**Σχήμα 5.6:** Παρουσίαση γεωγραφικής κάλυψης με *sectorized antenna*

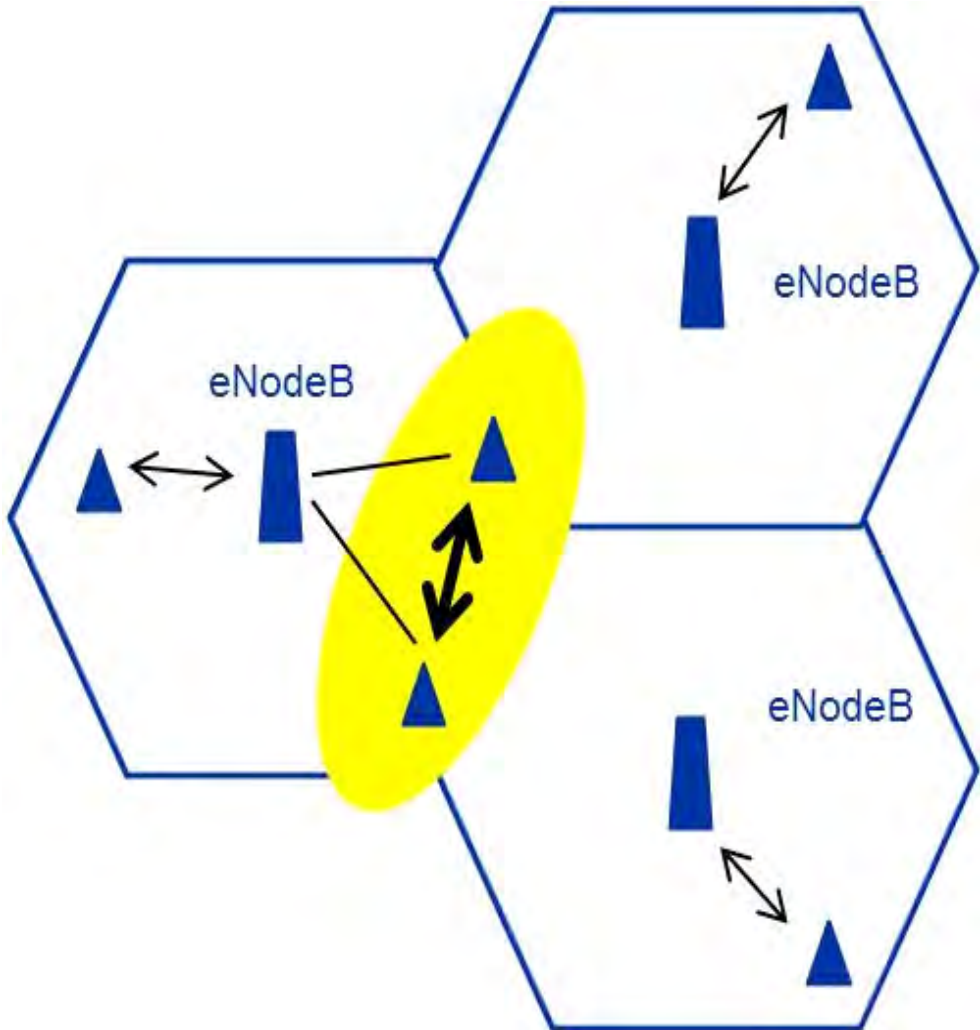
## 5.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Γεωγραφικής Κάλυψης Κυττάρων

### 5.2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το σημείο θα δώσουμε εν τάχει κάποιους βασικούς ορισμούς τεχνικών χαρακτηριστικών κεραιών ώστε να γίνουν κατανοητές οι περαιτέρω επεξηγήσεις που θα ακολουθήσουν στο παρόν αλλά και στο επόμενο κεφάλαιο. Αρχικά ο αναγνώστης θα πρέπει σε αυτό το σημείο να κατανοήσει ότι δεν μπορούμε πάντα να αυξήσουμε την χωρητικότητα (αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών ανά κύτταρο – sectorized user capacity) σε έναν γεωγραφικό χώρο κυτταρικής κάλυψης. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει συγκεκριμένο όριο στην εξυπηρετούμενη συνδρομητική χωρητικότητα την οποία μπορεί να παρέχει κάθε κύτταρο. Αυτός ο περιορισμός καθορίζεται εκ κατασκευής από βασικές αρχές του λογισμικού και του υλικού κάθε σταθμού βάσης (firmware restrictions). Τέτοιοι περιορισμοί αφορούν:

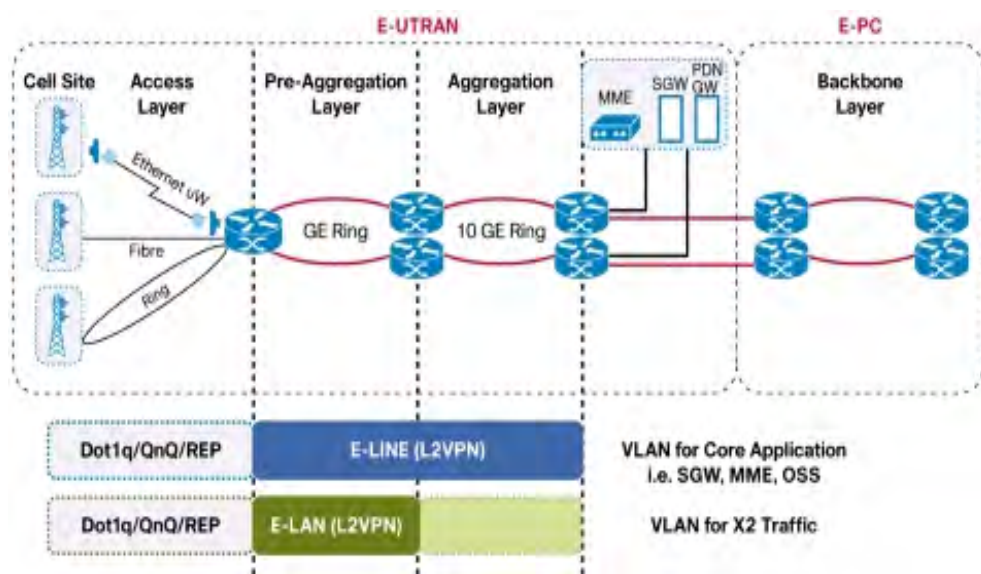
- **την αρχιτεκτονική του μηχανήματος** - αριθμός των διαθέσιμων ενεργοποιημένων αδειών στο λογισμικό ο οποίος και καθορίζει αναλυτικά πόσο επιτρέπεται να αυξήσουμε το φορτίο της μονάδος του επεξεργαστή στον σταθμό βάσης (microprocessor load) λόγω εξυπηρέτησης υπηρεσιών συνδεδεμένων χρηστών. Αυτό περιορίζει με άλλα λόγια τον αριθμό των χρηστών οι οποίοι θα μπορέσουν ταυτόχρονα να εξυπηρετηθούν στο κύτταρο. Αυτό καθορίζεται λοιπόν με άδειες στο λογισμικό (software license keys for connected users - BTS microprocessor load) κάθε πελάτη (πάροχος υπηρεσίας κινητής τηλεφωνίας Cosmote, Vodafone, WIND κτλπ) όταν αγοράζει μία μονάδα hardware για το BTS θα πρέπει να προσδιορίσει επακριβώς πόσες άδειες επιθυμεί να ενεργοποιήσει στην μονάδα. Διαφορετικές άδειες σημαίνει διαφορετική τιμή στην αγορά της ίδιας μονάδος, το οποίο εξαρτάται προφανώς και από τον οικονομικό προϋπολογισμό σχεδιασμού (planning budget) των εταιρειών.
- **Τον σχεδιασμό του ράδιο-δικτύου** – οι σχεδιαστές του ράδιο-δικτύου (η διαδικασία σχεδιασμού περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο) αποφασίζουν, βασισμένοι σε κριτήρια χωρητικότητας, γεωγραφικής κάλυψης και παρεμβολών λόγω κυτταρικής επικάλυψης και inter-cell interference, τον αριθμό των χρηστών και υπηρεσιών τις οποίες κάθε κύτταρο θα εξυ-

πηρετεί. Επομένως έχοντας κάνει έναν τέτοιον σχεδιασμό μπορούν να αποφανθούν για τον αριθμό των αδειών στο λογισμικό των μονάδων επεξεργασίας του BTS. Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η χωρητικότητα και ο περιορισμός στην γεωγραφική ράδιο κάλυψη λόγω αναμενόμενων παρεμβολών



**Σχήμα 5.7:** Παρουσίαση γεωγραφικής αλληλο-κάλυψης κυττάρων

- Την χωρητικότητα του δικτύου μετάδοσης/διασύνδεσης του σταθμού βάσης με το δίκτυο κορμού – Οι σχεδιαστές του ραδιο-δικτύου έχοντας αναλύσει την αναμενόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση (σε Mbps) κάθε κυττάρου, συναρτήσε βέβαια των αδειών λογισμικού και της κυτταρικής γεωγραφικής κάλυψης, αποφαινόνται για την χωρητικότητα του TCP/IP δικτύου μετάδοσης και διασύνδεσης από το BTS προς τις μονάδες δικτύου MME και SGW/PGW (πρώτο κεφάλαιο βιβλίου). Αν η χωρητικότητα του δικτύου μετάδοσης δεν είναι ορθώς υπολογισμένη αναμένονται φαινόμενα τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης (transmission network congestions due to bottleneck), σχήμα 5.8.

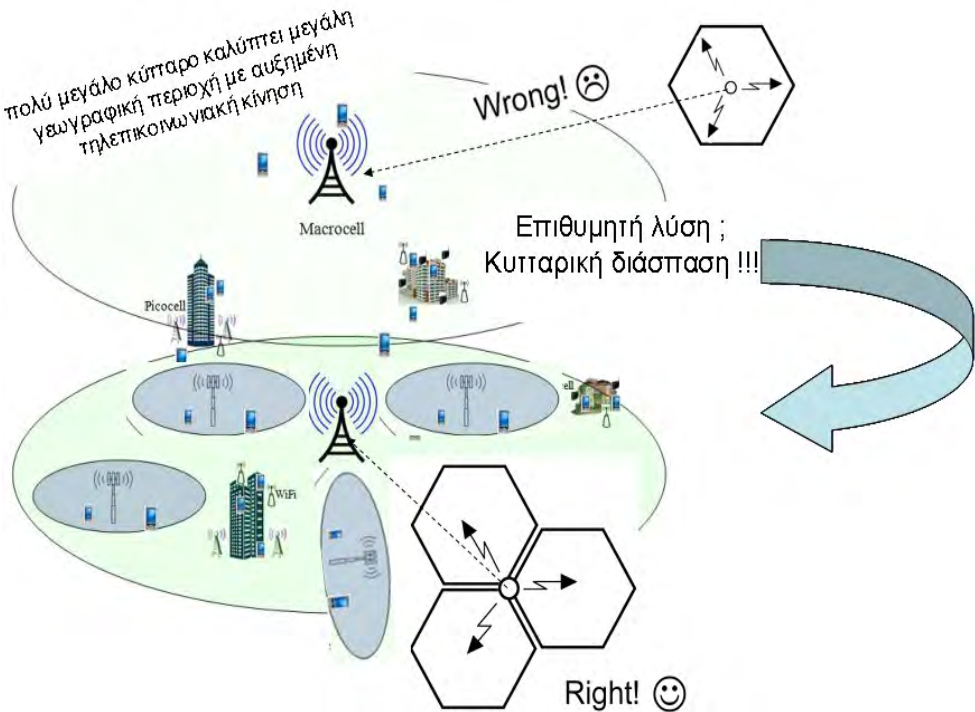


Σχήμα 5.8: Παράδειγμα διασυνδεσιμότητας eNodeB to core backhaul

### 5.2.2 Κυτταρική διάσπαση

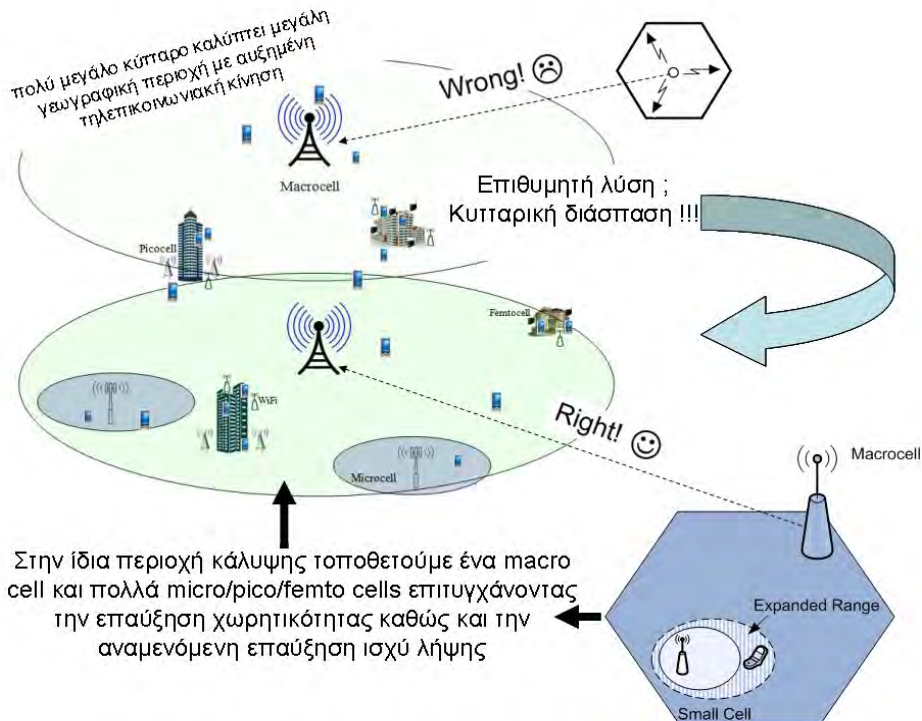
Η ιδέα της **κυτταρικής διάσπασης** ήλθε για να βοηθήσει να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της συνεχόμενης αύξησης της χωρητικότητας που παρατηρείται κάθε μέρα (αναλύσεις τηλεπικοινωνιακής κίνησης και εκτιμήσεις επαύξησης χωρητικότητας δικτύου βάσει στατιστικών αναλύσεων στα δομικά μέρη του δικτύου

– MME, SGW, PGW, eNodeB switching nodes) σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές. Με τον τρόπο αυτό αν σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή παρατηρήσουμε και εκτιμήσουμε βραχυπροθέσμως αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, και επιπλέον δεν έχουμε άλλο τρόπο αύξησης της χωρητικότητας του σταθμού βάσης, τότε διασπάμε το κύτταρο σε μικρότερα κύτταρα και καλύπτουμε την ίδια γεωγραφική περιοχή με περισσότερα μικρότερα κύτταρα, σχήμα 5.9.



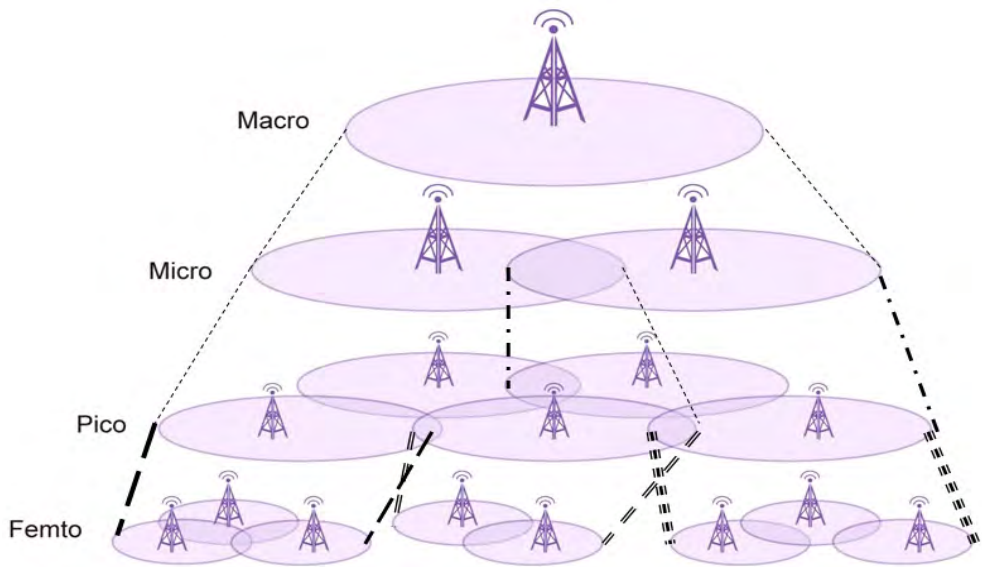
**Σχήμα 5.9:** Κυτταρική διάσπαση με αύξηση κυττάρων στην περιοχή

Μία άλλη προσέγγιση είναι η κυτταρική διάσπαση και η αλληλοκάλυψη και ο κυτταρικός σχεδιασμός ετερογενών κυττάρων και περιοχών κάλυψης (heterogeneous cell coverage). Σε μία τέτοια περίπτωση οι σχεδιαστές κάνουν χρήση των ιδιοτήτων περιορισμένης ράδιο-κάλυψης των κυτταρικών δομών των macro cells, micro cells, pico cells & femto cells ώστε να καλύψουν την ίδια γεωγραφική περιοχή με περισσότερα ετερογενή κύτταρα. Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζουμε μία τέτοια λύση.

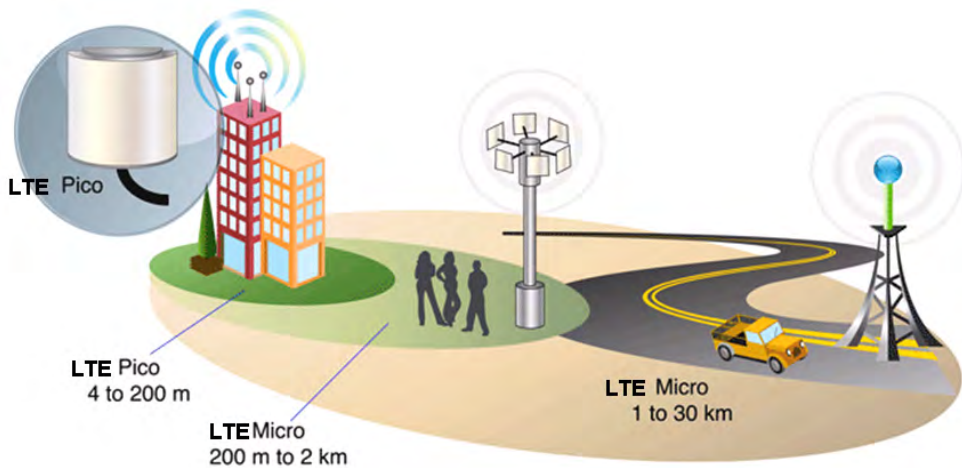


**Σχήμα 5.10:** Κυτταρική διάσπαση – λύση ετερογενούς κάλυψης

Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι η σύγχρονη τάση είναι να προτιμάται ιδιαιτέρως μία τέτοια λύση τελευταία καθώς θα πρέπει να προσφέρουμε όχι μόνο επαύξηση χωρητικότητας αλλά ταυτόχρονα και επαύξηση της ισχύος κάλυψης της ίδιας γεωγραφικής περιοχής από περισσότερα του ενός κύτταρα. Αυτό δικαιολογείται καθώς έχουμε πολλούς συνδρομητές να βρίσκονται εντός κτιρίων (οικίες, χώροι εργασίας κλπ). Επομένως τα ετερογενή περιβάλλοντα ραδιο κάλυψης περιλαμβάνουν πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών όπως ετερογενή κάλυψη μόνον με κύτταρα τεχνολογίας LTE (περιβάλλοντα macro/micro/pico/femto cells). Στο 5.11 παρουσιάζουμε την δομή των ετερογενών κυττάρων και στο σχήμα 5.12 το ετερογενές περιβάλλον τεχνολογίας LTE.



**Σχήμα 5.11:** Κυτταρική διάσπαση – ετερογενές περιβάλλον macro/micro/pico/femto cell ράδιο- κάλυψης



**Σχήμα 5.12:** Ετερογενές περιβάλλον LTE ράδιο- κάλυψης

Άλλη λύση είναι ετερογενή περιβάλλοντα ράδιο κάλυψης με χρήση κυττάρων τεχνολογίας LTE και WCDMA/GSM στον ίδιο γεωγραφικό χώρο, σχήμα 5.13. Μία τέτοια προσέγγιση έχει σαφή πλεονεκτήματα την επαναχρησιμοποίηση της υφισταμένης δομής των υπαρχόντων προθύστερων χρονικά σχεδιασμένων δικτύων τεχνολογίας WCDMA/HSPA και GSM/GPRS, τα οποία προσφέρουν πάρα πολύ καλή κάλυψη και χωρητικότητα και τα οποία διασφαλίζουν την συνεχή ράδιο-κάλυψη σε περίπτωση “νεκρών ζωνών” ράδιο κάλυψης του σχεδιασμού του δικτύου LTE.



**Σχήμα 5.13:** Κυτταρική διάσπαση – Inter-Radio Access Technology ετερογενής ράδιο-κάλυψη, περιβάλλον LTE/WCDMA/GSM macro/micro/pico/fempto cell

Το μεγαλύτερο όμως και αδιαμφισβήτητο μειονέκτημα είναι η δυσκολία ορθού σχεδιασμού και παραμετροποίησης των αλγορίθμων κινητικότητας του χρήστη (mobility functionality & algorithms) σε ένα τέτοιο δίκτυο. Εφόσον θα υπάρχουν πολλές νεκρές ζώνες κάλυψης και εφόσον οι χρήστες θα έχουν εν γένει μεγάλη κινητικότητα εντός της περιοχής κάλυψης είναι αναμενόμενο να εκτελούνται πολλές προσπάθειες δια-τεχνολογικές μεταγωγής κλήσεων (Inter-Radio Access Technology mobility handovers).



**Σχήμα 5.14:** Κυτταρική διάσπαση – user mobility σε περιβάλλον δια-τεχνολογικής ετερογενούς ράδιο-κάλυψη

Εάν οι παράμετροι δεν σχεδιαστούν σωστά τότε θα υπάρχουν πολλές δυσκολίες και αποτυχίες στην διατήρηση της ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών. Στο σχήμα 5.14 παρουσιάζεται η ιδέα της εξυπηρέτησης υπηρεσιών χρήστη με δυνατότητα δια-τεχνολογικής ετερογενούς κινητικότητας (Inter-Radio Access Technology mobility) σε περιβάλλον ετερογενούς ράδιο-κάλυψης (Inter-radio Access Technology Heterogeneous coverage). Σε ένα τέτοιο ετερογενές δίκτυο ο χρήστης απολαμβάνει την συνεχή και αδιάλειπτη ράδιο-κάλυψη και συνδεσιμότητα (always connected) καθώς και την δυνατότητα χρήσης υπηρεσιών κατά την διάρκεια των μετακινήσεων του από το σπίτι του στο γραφείο, στον δρόμο, σε κτίρια υπηρεσιών και εν γένει παντού μέσα στον αστικό και προαστιακό ιστό της πόλης.

Μία άλλη επίσης προσέγγιση είναι η δυνατότητα δημιουργίας hot-spot ράδιο κάλυψης σε συγκεκριμένα σημεία εντός του δικτύου. Αυτό προτιμάται ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη ανάγκη τοπικής επαύξησης χωρητικότητας (local capacity enhancements) λόγω ιδιαίτερων συνθηκών κινητικότητας συνδρομητών. Τέτοια περιβάλλοντα ράδιο κάλυψης είναι γραφεία Πρωθυπουργού και Υπουργών (όπου απαιτείται μοναδική και ασφαλής ράδιο κάλυψη από υποκλοπές), δωμάτια εντός κτιρίων (όπως δωμάτια συσκέψεων – conference rooms), ιδιαίτερα δωμάτια ξενοδοχείων (president suites), ιδιαίτερες οικίες σημαντικών επιχειρηματιών και στελεχών εταιρειών (villa coverage) καθώς και εσωτερικοί χώροι εταιρειών (γραφεία υψηλόβαθμων στελεχών, διευθυντών, διευθυνόντων συμβούλων κτλπ). Επίσης πέραν των ιδιαίτερων ράδιο-περιβαλλόντων κάλυψης υπάρχουν και περιοχές όπως πλατείες, κτίρια καταστημάτων (market malls), πάρκα εντός οικοδομικού ιστού, αποβάθρες τραίνων, αεροδρόμια κτλπ. Σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις η προτεινόμενη λύση των hot-spot ράδιο κάλυψης παρέχει ασφαλή ράδιο κάλυψη άνευ ιδιαίτερων παρεμβολών. Αυτό διότι, εφόσον συνήθως προτιμάται η χρήση femto cells και pico cells, η εκπεμπόμενη ισχύς ράδιο σήματος είναι πάρα πολύ χαμηλή ώστε να περιοριστεί εντός του μικρού γεωγραφικού χώρου κάλυψης (της τάξεως των 100 mWatts) και να μην υπάρχει η δυνατότητα το συγκεκριμένο κύτταρο να χρησιμοποιηθεί από άλλους χρήστες στην περιοχή.

Στο σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η ιδέα της χρήσης hot-spot ράδιο κάλυψης εντός κτιρίων και στο σχήμα 5.16 σε εξωτερικούς δημόσιους περιορισμένους χώρους ράδιο-κάλυψης