



Πανεπιστήμιο Πειραιώς  
Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων  
Π.Μ.Σ. " Ψηφιακά Συστήματα & Υπηρεσίες "

Ενεργειακά αποδοτική διαχείριση μικροκυψελικών δικτύων  
επικοινωνιών

Energy efficient management of microcellular communication  
networks

Όνοματεπώνυμο : Αθανασιάδης Κυριάκος  
ΑΜ : 12057

Επιβλέπων καθηγητής : Δρ. Άγγελος Ρούσκας

*Διπλωματική Εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στα Ψηφιακά Συστήματα και Υπηρεσίες.*

**ΠΕΙΡΑΙΑΣ, Φεβρουάριος 2016**

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Άγγελο Ρούσκα, που μου εμπιστεύτηκε την παρούσα διπλωματική εργασία και μου προσέφερε καθοδήγηση και συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της.

Ιδιαίτερης αναφοράς χρίζει ο στενός φίλος Γιάννης, η συμπαράσταση του οποίου υπήρξε πολύ σημαντική!

Άρια ευχαριστώ κι εσένα πάρα πολύ, τόσο για την υπομονή που επέδειξες, όσο και για την ψυχολογική στήριξη που μου παρείχες όλο αυτό τον καιρό.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πάνω από όλα την οικογένειά μου, για την αστείρευτη συμπαράσταση και υποστήριξη που πάντα μου προσφέρουν απλόχερα, πράγματα που με οδήγησαν στην ολοκλήρωση αυτού του πολύ σημαντικού στόχου της ζωής μου. Σε αυτούς οφείλω αυτό που είμαι και τους αφιερώνω αυτήν τη διπλωματική.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	7
Abstract .....	8
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Ιστορική αναδρομή.....</b>	<b>9</b>
1.1 Εισαγωγή .....	9
1.2 Εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.....	11
1.3 3GPP Long Term Evolution (LTE).....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Πράσινες Επικοινωνίες .....</b>	<b>16</b>
2.1 Εισαγωγή .....	16
2.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον και την οικονομία .....	17
2.3 Μετάβαση σε πράσινα δίκτυα.....	19
2.3.1 Πράσινες τεχνολογίες στις επικοινωνίες .....	21
2.3.2 Πράσινοι σταθμοί βάσης .....	24
2.3.3 Ετερογενή δίκτυα.....	28
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Παρουσίαση του προσομοιωτή και των αλγορίθμων .....</b>	<b>34</b>
3.1 Εισαγωγή .....	34
3.2 Προσομοιωτής καθοδικής ζεύξης συστήματος LTE .....	36
3.3 BALSΟ.....	42
3.4 TWEAK .....	45
3.5 Πειραματικές μετρήσεις .....	47
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>66</b>

## Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1.1.1	Συन्दρομητές κινητής τηλεφωνίας ανά τον κόσμο για τη περίοδο 2007-2015 .....	9
Σχήμα 1.1.2	Πρόβλεψη του αριθμού συन्दρομητών μέχρι το 2020 .....	10
Σχήμα 1.2.1	Εξέλιξη των συστημάτων κινητών επικοινωνιών .....	11
Σχήμα 1.3.1	Αρχιτεκτονική συστήματος LTE .....	12
Σχήμα 1.3.2	Ορθογώνια πολυπλεξία συχνότητας .....	13
Σχήμα 1.3.3	Δομή πλαισίου LTE (FDD) .....	14
Σχήμα 1.3.4	Δομή συμβόλου στο LTE.....	14
Σχήμα 1.3.5	Παράμετροι φυσικού επιπέδου για LTE (FDD) .....	15
Σχήμα 2.1.1	Πρόβλεψη για την εξέλιξη των δικτύων επικοινωνιών.....	16
Σχήμα 2.2.1	Πρόβλεψη για την εκπομπή CO2 εξαιτίας των σταθμών βάσης.....	17
Σχήμα 2.2.2	Πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας των σταθμών βάσης μέχρι το 2020 .....	18
Σχήμα 2.3.1	Κατανάλωση ενέργειας των τμημάτων του τομέα ΤΠΕ.....	20
Σχήμα 2.3.2	Κατανάλωση ενέργειας των υποσυστημάτων των τυπικών δικτύων επικοινωνιών ...	20
Σχήμα 2.3.1.1	Ολιστική προσέγγιση για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των δικτύων κινητών επικοινωνιών σύμφωνα με το Earth Project .....	22
Σχήμα 2.3.2.1	Διακύμανση του φορτίου κίνησης των δικτύων επικοινωνιών.....	24
Σχήμα 2.3.2.2	Αρχιτεκτονική του AEEPA.....	26
Σχήμα 2.3.2.3	Τεχνολογίες Operation Point και Component Deactivation για τους AEEPA .....	27
Σχήμα 2.3.2.4	Διαφορές της συμβατικής αρχιτεκτονικής κεραιών με τη προτεινόμενη κεραία χαμηλών απωλειών του Earth Project .....	28
Σχήμα 2.3.3.1	Ετερογενές δίκτυο επικοινωνιών .....	29
Σχήμα 2.3.3.2	Διαφορά της θέσης του SSDL με το PLUL σε ετερογενή δίκτυα .....	30
Σχήμα 2.3.3.3	Χρήση του Cell Range Extension σε ετερογενή δίκτυα.....	30
Σχήμα 2.3.3.4	Διαχείριση της διακυψελικής παρεμβολής στο 3GPP R8 .....	31
Σχήμα 2.3.3.5	Τεχνικές Carrier Aggregation και cross-carrier scheduling στο 3GPP R10 .....	32
Σχήμα 2.3.3.6	Τεχνική Coordinated Multi Point στο 3GPP R11 .....	33
Σχήμα 2.3.3.7	Παραλλαγές του CoMP σύμφωνα με την υπόθεση εργασίας.....	33
Σχήμα 3.1.1	WINNER Channel Modelling Process .....	34
Σχήμα 3.2.1	Αρχείο BSpos_FIXED για 25 micro σταθμούς βάσης .....	36
Σχήμα 3.2.2	Αρχείο master_function όπου φαίνεται ο αριθμός επαναλήψεων του πειράματος...37	
Σχήμα 3.2.3	Πλέγμα 1000x1000 μέτρα, με μια μικρότερη περιοχή στο εσωτερικό του .....	37

Σχήμα 3.2.4	Τυχαία τοποθέτηση των χρηστών στις 2 περιοχές του πλέγματος .....	38
Σχήμα 3.2.5	Καθορισμός παραμέτρων .....	39
Σχήμα 3.2.6	Παράμετροι φυσικού και MAC επιπέδου .....	39
Σχήμα 3.2.7	Εισαγωγή του αλγόριθμου επίλυσης και του bit rate των χρηστών .....	40
Σχήμα 3.2.8	Αλγόριθμοι επίλυσης.....	40
Σχήμα 3.2.9	Τιμές κατανάλωσης υποσυστημάτων ενός σταθμού βάσης .....	41
Σχήμα 3.2.10	Τύπος υπολογισμού της συνολικής κατανάλωσης του συστήματος .....	41
Σχήμα 3.3.1	Λογικό διάγραμμα του αλγόριθμου BALSΟ .....	44
Σχήμα 3.4.1	Λογικό διάγραμμα του αλγόριθμου TWEAK .....	46
Σχήμα 3.5.1	Πλέγμα 1000μ <sup>2</sup> με διαχωρισμό σε δυο περιοχές για τη προσομοίωση hotspot.....	47
Σχήμα 3.5.2	Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 1.1 (5 UEs in – 10 UEs out) .....	48
Σχήμα 3.5.3	Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 1.1.....	48
Σχήμα 3.5.4	Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 1.2 (10 UEs in – 5 UEs out) .....	49
Σχήμα 3.5.5	Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 1.2 .....	49
Σχήμα 3.5.6	Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 1.1 .....	50
Σχήμα 3.5.7	Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 1.1.....	50
Σχήμα 3.5.8	Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 1.2.....	51
Σχήμα 3.5.9	Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 1.2.....	51
Σχήμα 3.5.10	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSΟ για το σενάριο 1.1 .....	52
Σχήμα 3.5.11	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 1.1 .....	52
Σχήμα 3.5.12	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSΟ για το σενάριο 1.2 .....	53
Σχήμα 3.5.13	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 1.2 .....	53
Σχήμα 3.5.14	Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 2.1 (10 UEs in – 20 UEs out) .....	54
Σχήμα 3.5.15	Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 2.1 .....	54
Σχήμα 3.5.16	Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 2.2 (20 UEs in – 10 UEs out) .....	55
Σχήμα 3.5.17	Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 2.2 .....	55
Σχήμα 3.5.18	Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 2.1.....	56
Σχήμα 3.5.19	Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 2.1.....	56
Σχήμα 3.5.20	Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 2.2.....	57
Σχήμα 3.5.21	Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 2.2.....	57
Σχήμα 3.5.22	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSΟ για το σενάριο 2.1 .....	58
Σχήμα 3.5.23	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 2.1 .....	58

Σχήμα 3.5.24	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSΟ για το σενάριο 2.2 .....	59
Σχήμα 3.5.25	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 2.2 .....	59
Σχήμα 3.5.26	Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 3.1 (17 UEs in – 33 UEs out) .....	60
Σχήμα 3.5.27	Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 3.1 .....	60
Σχήμα 3.5.28	Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 3.2 (33 UEs in – 17 UEs out) .....	61
Σχήμα 3.5.29	Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 3.2 .....	61
Σχήμα 3.5.30	Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 3.1 .....	62
Σχήμα 3.5.31	Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 3.1 .....	62
Σχήμα 3.5.32	Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 3.2 .....	63
Σχήμα 3.5.33	Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 3.2 .....	63
Σχήμα 3.5.34	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSΟ για το σενάριο 3.1 .....	64
Σχήμα 3.5.35	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 3.1 .....	64
Σχήμα 3.5.36	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSΟ για το σενάριο 3.2 .....	65
Σχήμα 3.5.37	Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 3.2 .....	65

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η σύγκριση δυο ευριστικών αλγορίθμων έξυπνης ανάθεσης πόρων για ένα σύστημα LTE εύρους 5MHz. Ειδικότερα, οι αλγόριθμοι BALSΟ και TWEAK δοκιμάστηκαν σε σειρά πειραμάτων, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδοσή τους στις μετρικές του χρόνου επίλυσης, της ενεργειακής αποδοτικότητας και της χρησιμοποίησης πόρων σε περιβάλλον “bad urban microcell”. Ο χώρος για την εγκατάσταση του συστήματος ορίστηκε σαν ένα τετράγωνο 1000m<sup>2</sup>, στο οποίο τοποθετούνται οι micro σταθμοί βάσης σε σταθερές θέσεις και σε λειτουργία LTE, ενώ τα κινητά τερματικά σε τυχαίες θέσεις, διαφορετικές για κάθε προσομοίωση. Η τοποθέτηση των κινητών τερματικών στο χώρο έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργείται ένα hotspot στο κεντρικό χώρο του πλέγματος σε συνθήκες υψηλότερης ή χαμηλότερης φόρτισης σε σχέση με τη κίνηση στο υπόλοιπο πλέγμα. Οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν με τη χρήση ενός προσομοιωτή καθοδικής ζεύξης συστήματος LTE, χρησιμοποιώντας το στοχαστικό μοντέλο διάδοσης WINNER II.

## **Abstract**

The subject of this thesis is to study and compare two heuristic algorithms for smart radio resource allocation, over an LTE system which provides 5MHz bandwidth. Specifically, BALS0 and TWEAK algorithms were tested on a range of experiments in order to determine their performance in the metrics of processing time, energy efficiency and use of resources, over a "bad urban microcell" environment. The space for the installation of the system was defined as a square 1000m<sup>2</sup>, in which the micro base stations are placed at fixed respective locations set in LTE mode, where mobile terminals are placed at random positions, different for each simulation. The positioning of the mobile terminals in the grid is done in such a way as to create a hotspot in the central area of the grid, in order to simulate higher or lower load conditions compared with the rest of the grid. Experimental measurements were made using a downlink LTE system simulator utilizing the stochastic propagation model WINNER II.

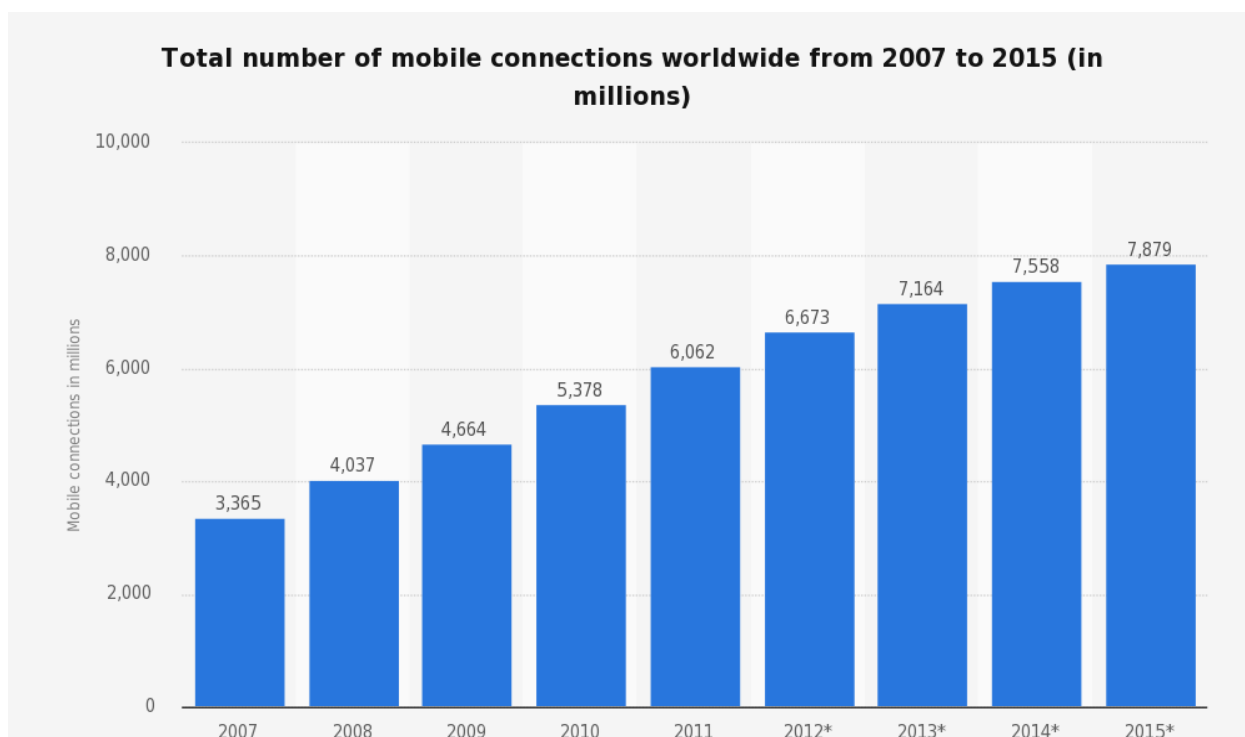


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Ιστορική αναδρομή

### 1.1 Εισαγωγή

Η εποχή στην οποία ζούμε έχει χαρακτηριστεί, δικαίως, ως η εποχή της πληροφόρησης. Καθημερινά καλούμαστε να διαχειριστούμε όλο και περισσότερες πληροφορίες. Ένας τομέας τεράστιας και πάρα πολύ γρήγορης ανάπτυξης είναι τα δίκτυα μέσω των οποίων μεταβιβάζονται οι πληροφορίες αυτές. Στις μέρες μας τα ασύρματα δίκτυα έχουν εξελιχθεί πάρα πολύ και έχουμε περάσει πλέον στην εποχή των δικτύων 4G. Έχουμε αφήσει αρκετά πίσω τα δίκτυα 3G και πλέον όλο και περισσότερα πράγματα έχουν να κάνουν με τα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς. Προσφέρονται πολύ περισσότερες δυνατότητες όπως υπηρεσίες πολυμέσων που θα αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους όπως τηλεσυνδιάσκεψη, ασύρματο Internet, υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης (300 Mbps), παγκόσμια κινητικότητα και φορητότητα υπηρεσιών σε χαμηλό κόστος. Πλέον, όλη η τεχνολογία θα στηρίζεται σε μεταγωγή πακέτων και όχι σε μεταγωγή κυκλωμάτων όπως στα 3G, και όλα τα στοιχεία του δικτύου θα είναι ψηφιακά.

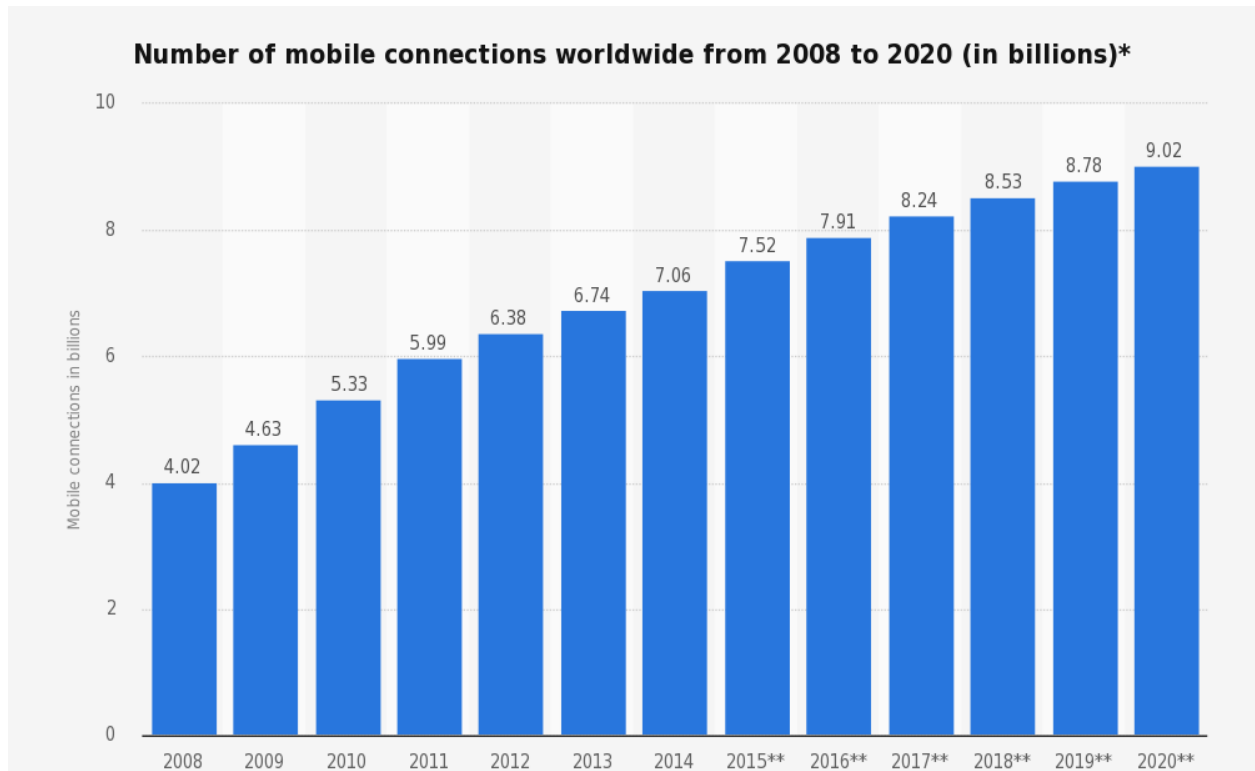
Η μεγάλη εξάπλωση των δικτύων κινητών και προσωπικών επικοινωνιών τα τελευταία χρόνια στηρίζεται στο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των υπηρεσιών που προσφέρουν: *την κινητικότητα*. Ο αριθμός των χρηστών συνεχίζει να αυξάνεται, ξεπερνώντας κάθε προσδοκία, λόγω της πρωτοποριακής δυνατότητας επικοινωνίας ενός τερματικού χωρίς την δέσμευση να βρίσκεται σε κάποιο σταθερό σημείο πρόσβασης.



Σχήμα 1.1.1 Συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας ανά τον κόσμο για τη περίοδο 2007-2015

Στο σχήμα 1.1.1 απεικονίζεται ο αριθμός των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως. Όπως φαίνεται, υπάρχει μια σταθερά αυξανόμενη ζήτηση για συνδέσεις, γεγονός που οφείλεται και στην ανάπτυξη ισχυρότερων δικτύων από τους παρόχους, ώστε να καλύπτεται η ανάγκη της ευρυζωνικότητας των συνδρομητών.

Τα σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιούν κυψελωτή δομή. Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος χωρίζεται σε επί μέρους τμήματα (κυψέλες) καθένα από τα οποία εξυπηρετείται από ένα σταθμό βάσης. Δυο σταθμοί βάσης που βρίσκονται σε ικανή απόσταση μεταξύ τους (τα όρια καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος) μπορούν να χρησιμοποιούν τους ίδιους ραδιοδιαύλους χωρίς να παρεμβάλλουν ο ένας στον άλλο. Με τον τρόπο αυτό λύνεται το πρόβλημα του περιορισμένου εύρους ζώνης συχνοτήτων που, στα κλασικά συστήματα ραδιοεπικοινωνίας ενός πομπού μεγάλης εμβέλειας, περιορίζει τον αριθμό των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν. Αυξάνοντας το πλήθος των κυψελών του συστήματος και μειώνοντας το μέγεθος τους (καθώς και την ισχύ των σταθμών βάσης προς αποφυγή παρεμβολών) είναι δυνατόν με δεδομένο εύρος φάσματος να εξυπηρετηθούν περισσότεροι χρήστες. Ήδη στα αστικά περιβάλλοντα εγκαθίστανται μικροκυψελικά συστήματα με σκοπό να καλύψουν την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση. Η χρήση τους αναμένεται να αυξηθεί με την εξάπλωση των δικτύων 4<sup>ης</sup> γενιάς.



Σχήμα 1.1.2 Πρόβλεψη του αριθμού συνδρομητών μέχρι το 2020

## 1.2 Εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας

Τα ασύρματα δίκτυα πρώτης γενιάς στόχευαν πρωτίστως στην επικοινωνία φωνής και δεδομένων που εμφανίζονται σε χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων. Πρόσφατα, είδαμε την εξέλιξη των ασύρματων συστημάτων δεύτερης και τρίτης γενιάς που ενσωματώνουν τις δυνατότητες που παρέχονται από την ευρυζωνικότητα. Εκτός από την υποστήριξη της κινητικότητας, η ευρυζωνικότητα στοχεύει επίσης στην υποστήριξη της κυκλοφορίας των πολυμέσων, με τη διασφάλιση ποιότητας της υπηρεσίας (QoS). Είδαμε επίσης την παρουσία των διαφόρων τεχνολογιών διεπαφής αέρα, και η ανάγκη για διαλειτουργικότητα αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο από την ερευνητική κοινότητα.

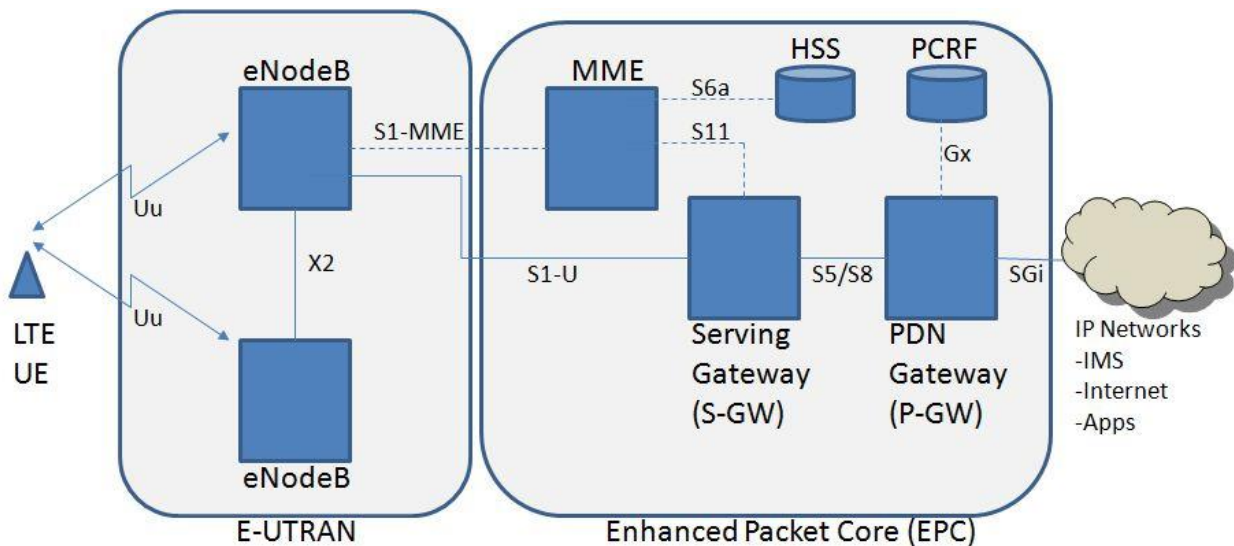
Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν γίνει ένα πολύ διαδεδομένο αγαθό. Ο αριθμός των κινητών τηλεφώνων και των ασύρματων χρηστών διαδικτύου έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Τα ασύρματα δίκτυα χωρίζονται ανάλογα με την επιφάνειά τους σε local, metropolitan, wide, και global networks. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα καλύψουμε την εξέλιξη των εν λόγω δικτύων, τις βασικές αρχές λειτουργίας τους και τις αρχιτεκτονικές τους.

Generation→ Features↓	1G	2G	3G	4G	5G
Deployment	1970 – 1980	1990 - 2001	2001-2010	2011	2015-20 onwards
Data Rates	2kbps	14.4-64kbps	2Mbps	200 Mbps to 1 Gbps	1 Gbps and higher
Technology	Analog Cellular Technology	Digital Cellular Technology: Digital narrow band circuit data Packet data	Digital Broadband Packet data: CDMA 2000 EVDO UMTS EDGE	Digital Broadband Packet data: WiMax LTE Wi-Fi	www Unified IP seamless combination of broadband LAN PAN MAN WLAN
Service	Analog voice service No data service	Digital voice with higher clarity SMS, MMS Higher capacity packetized data	Enhanced audio video streaming video conferencing support Web browsing at higher speeds IPTV support	Enhanced audio, video streaming IP telephony HD mobile TV	Dynamic Information access, Wearable devices with AI Capabilities
Multiplexing Switching	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Core Network	PSTN	PSTN	Packet N/W	Internet	Internet
Standards	MTS AMTS IMTS	2G:GSM 2.5:GPRS 2.75:EDGE	IMT-2000 3.5G:HSDPA 3.75G:HSUPA	Single unified standard LTE, WiMAX	Single unified standard
WEB Standard		www	www(IPv4)	www (IPv4)	www (IPv6)
Handoff	Horizontal only	Horizontal only	Horizontal & Vertical	Horizontal & Vertical	Horizontal & Vertical
Shortfalls	Low capacity, Unreliable handoff, Poor voice links, Less secure	Digital signals were reliant on location & proximity, required strong digital signals to help mobile phones	Need to accommodate higher network capacity	Being deployed	Yet to be implemented

Σχήμα 1.2.1 Εξέλιξη των συστημάτων κινητών επικοινωνιών

### 1.3 3GPP Long Term Evolution (LTE)

Η τεχνολογία Long Term Evolution (LTE) συχνά επονομάζεται σαν “4G LTE”, αλλά η πρώτη έκδοση του LTE δεν συμμορφώνεται πλήρως με τις απαιτήσεις της IMT-Advanced. Το LTE έχει θεωρητικό ρυθμό bit έως 100 Mbit/s στο downlink και 50 Mbit/s στο uplink, (εάν χρησιμοποιείται ένα κανάλι 20 MHz, με τη παράλληλη χρήση συστοιχιών από κεραιές). Η φυσική ραδιο-διεπαφή ονομάζεται Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Τα πρώτα LTE USB dongles δεν υποστηρίζουν οποιοδήποτε άλλο interface ραδιοσυχνότητων. Το LTE εμφανίστηκε αρχικά στις Σκανδιναβικές χώρες το 2009, αλλά μέχρι τα τέλη του 2013 υιοθετήθηκε από χώρες όπως οι ΗΠΑ, η Ουγγαρία, η Νότια Κορέα και το Ηνωμένο Βασίλειο, ενώ πλέον έχει αναπτυχθεί στις περισσότερες χώρες του πλανήτη.

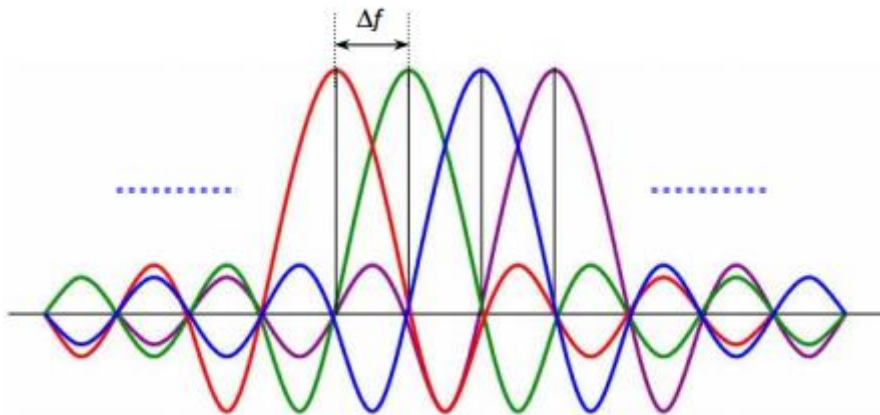


Σχήμα 1.3.1 Αρχιτεκτονική συστήματος LTE

Ο σχεδιασμός του LTE όσον αφορά το φυσικό επίπεδο (PHY), επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την απαίτηση για υψηλό ρυθμό μετάδοσης (100 Mbps DL/50 Mbps UL), καλύτερη φασματική απόδοση και πολλαπλές ζώνες καναλιών (1,25-20 MHz). Για την εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων, επιλέχθηκε η ορθογώνια πολυπλεξία συχνότητας (OFDM) ως βάση για το στρώμα PHY. Η OFDM είναι μια τεχνολογία που χρονολογείται από τη δεκαετία του 1960, αλλά με τις εξελίξεις στο χώρο της ηλεκτρονικής και της επεξεργασίας σήματος ωρίμασε πολλά χρόνια αργότερα και χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε άλλα συστήματα πρόσβασης, όπως 802.11 (WiFi) και 802.16 (WiMAX), καθώς και σε συστήματα εκπομπής (Digital Audio / Τηλεοπτική Μετάδοση - DAB / DVB).

Εκτός από την OFDM, το LTE εφαρμόζει τεχνικές πολλαπλών κεραιών όπως MIMO (multiple input multiple output), η οποία μπορεί είτε να αυξήσει την χωρητικότητα του καναλιού (χωρική πολυπλεξία) ή να ενισχύσει την ευρωστία του σήματος (κωδικοποίηση συχνότητας/ χώρου/ χρόνου). Μαζί, τα OFDM και MIMO αποτελούν δύο βασικές τεχνολογίες που εμφανίζονται στο LTE και αποτελούν τη σημαντικότερη διαφοροποίηση έναντι των συστημάτων 3G που βασίζονται στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA).

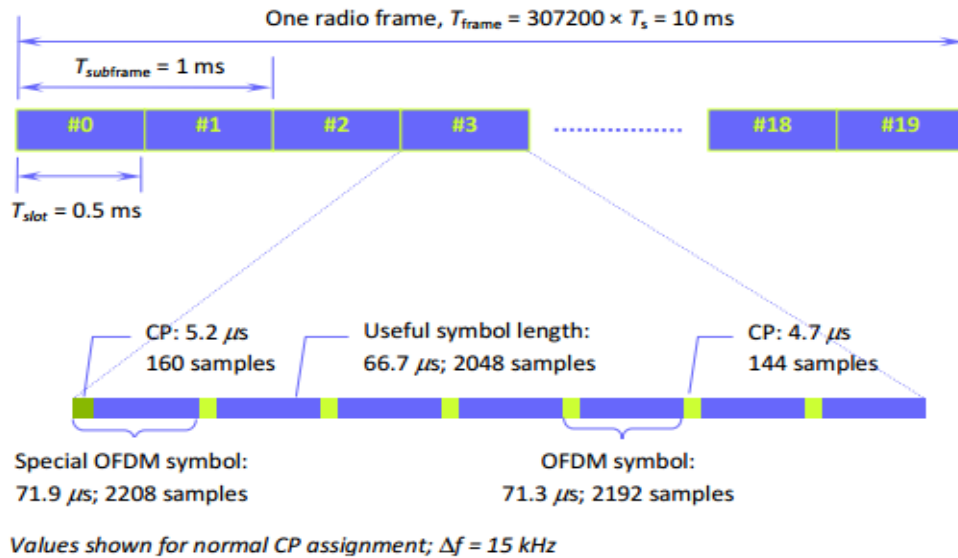
Η τεχνολογία OFDM βασίζεται στη χρήση πολλαπλών subcarriers στενής ζώνης, πάνω από ένα κανάλι με μεγάλο εύρος ζώνης. Τα subcarriers είναι αμοιβαίως ορθογώνια στο πεδίο της συχνότητας, κάτι που μετριάζει τη διασυμβολική παρεμβολή (ISI), όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.2. Κάθε ένα από αυτά τα από subcarrier αντιμετωπίζει flat fading, καθώς έχουν μικρότερο εύρος από το coherence bandwidth του καναλιού. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για πολύπλοκους αντισταθμιστές συχνότητας (equalizers), τα οποία εμφανίζονται σε τεχνολογίες 3G.



Σχήμα 1.3.2 Ορθογώνια πολυπλεξία συχνότητας

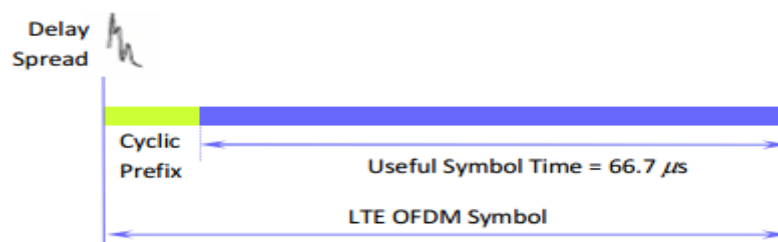
Στο downlink, το φυσικό στρώμα του LTE βασίζεται στην OFDMA. Ωστόσο, παρά τα πολλά πλεονεκτήματα, η OFDM έχει ορισμένα μειονεκτήματα, όπως η υψηλή ευαισθησία σε μετατοπίσεις συχνότητας (που προκύπτουν από την αστάθεια των ηλεκτρονικών και το φαινόμενο Doppler λόγω κινητικότητας) και ο υψηλός λόγος PAPR (peak-to-average power ratio). Το PAPR συμβαίνει λόγω της τυχαίας προσθετικής συμβολής των υπο-φερόντων και οδηγεί στην εξάπλωση του σήματος σε γειτονικές συχνότητες, εισάγει δηλαδή παρεμβολή. Είναι ένα πρόβλημα που μπορεί να αντιμετωπιστεί με εξειδικευμένους ενισχυτές ισχύος και τεχνικές linearization. Ενώ αυτές οι λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν στο σταθμό βάσης, κρίνονται ασύμφωρες για την υιοθέτησή τους στο κινητό τερματικό. Ως εκ τούτου, το LTE χρησιμοποιεί Single Carrier FDMA (SC-FDMA) με cyclic prefix στην άνω ζεύξη, η οποία μειώνει το λόγο PAPR, καθώς υπάρχει μόνο ένας φορέας σε αντίθεση με τους  $N$  φορείς στη κάθοδο.

Στο πεδίο του χρόνου, τα διαφορετικά χρονικά διαστήματα εντός του LTE εκφράζονται σε ακέραια πολλαπλάσια μιας βασικής μονάδας χρόνου  $T_s = 1/30720000$ . Το ραδιο-πλαίσιο έχει μήκος 10 ms ( $T_{frame} = 307200 * T_s = 10$  ms). Κάθε πλαίσιο διαιρείται σε δέκα ισομεγέθη υποπλαίσια (subframes) μήκους 1 ms ( $T_{subframe} = 30720 * T_s = 1$  ms). Ο προγραμματισμός της μετάδοσης γίνεται σε βάση υποπλαισίου τόσο για την κατερχόμενη όσο και για την ανερχόμενη ζεύξη. Κάθε υποπλαίσιο (subframe) αποτελείται από δύο ισομεγέθεις σχισμές μήκους 0,5 ms ( $T_{slot} = 15360 * T_s = 0,5$  ms). Η κάθε σχισμή σε με τη σειρά αποτελείται από έναν αριθμό συμβόλων OFDM, που μπορεί να είναι είτε επτά (κανονικό κυκλικό πρόθεμα) ή έξι (παρατεταμένο κυκλικό πρόθεμα). Το σχήμα 1.3.3 δείχνει τη δομή πλαισίου του LTE σε λειτουργία FDD.



Σχήμα 1.3.3 Δομή πλαισίου LTE (FDD)

Ο ωφέλιμος χρόνος συμβόλου είναι  $T_u = 2048 \cdot T_s \approx 66,7 \mu\text{s}$ . Για την κανονική λειτουργία, το πρώτο σύμβολο έχει ένα κυκλικό πρόθεμα μήκους  $T_{CP} = 160 \cdot T_s \approx 5,2 \mu\text{s}$ . Τα υπόλοιπα έξι σύμβολα έχουν ένα κυκλικό πρόθεμα μήκους  $T_{CP} = 144 \cdot T_s \approx 4,7 \mu\text{s}$ . Ο λόγος για διαφορετικό μήκος CP του πρώτου συμβόλου είναι ώστε ο συνολικός χρόνος της σχισμής να διαιρείται με το 15360. Για την εκτεταμένη λειτουργία, το κυκλικό πρόθεμα είναι το  $T_{CP-e} = 512 \cdot T_s \approx 16,7 \mu\text{s}$ . Το CP είναι μεγαλύτερο από το τυπικό delay spread που συναντάται στην πράξη, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.5.5. Το κανονικό κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται σε αστικές κυψέλες και σε εφαρμογές υψηλού ρυθμού δεδομένων, ενώ το εκτενές κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις, όπως multi-cell broadcast και σε πολύ μεγάλες κυψέλες (π.χ. αγροτικές περιοχές, εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας δεδομένων). Το CP χρησιμοποιεί μέρος της χωρητικότητας του φυσικού επιπέδου: 7,5% στην περίπτωση του κανονικού κυκλικού προθέματος. Ένας τρόπος για να μειωθεί το overhead που οφείλεται στο κυκλικό πρόθεμα είναι με τη μείωση της απόστασης μεταξύ των subcarriers  $\Delta f$ , με μια αύξηση του χρόνου συμβόλου  $T_u$ . Ωστόσο, αυτό θα αυξήσει την ευαισθησία του OFDM στις μετατοπίσεις συχνότητας που προκύπτουν από το Doppler spread, καθώς και διαφορετικούς τύπους σφαλμάτων στη συχνότητα που οφείλονται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα.



Σχήμα 1.3.4 Δομή συμβόλου στο LTE

Στο πεδίο συχνότητας, ο αριθμός των υπο-φερόντων  $N$  κυμαίνεται από 128-2048 ανάλογα με το εύρος ζώνης καναλιού. Η απόσταση μεταξύ των subcarriers είναι  $\Delta f = 1/T_p = 15\text{kHz}$ . Ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι  $f_s = \Delta f * N = 15000 * N$ . Αυτό οδηγεί σε ένα ρυθμό δειγματοληψίας που είναι πολλαπλάσιος ή υποπολλαπλάσιος του chip-rate του WCDMA (3,84 Mcps). Οι παράμετροι του LTE έχουν επιλεγεί έτσι ώστε τα μήκη FFT και οι ρυθμοί δειγματοληψίας να λαμβάνονται εύκολα για όλους τους τρόπους λειτουργίας, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η εύκολη υλοποίηση συσκευών διπλής λειτουργίας, έχοντας ένα κοινό clock reference. Το σχήμα 1.3.5 συνοψίζει μερικές από τις βασικές παραμέτρους για το φυσικό στρώμα για του LTE σε λειτουργία FDD.

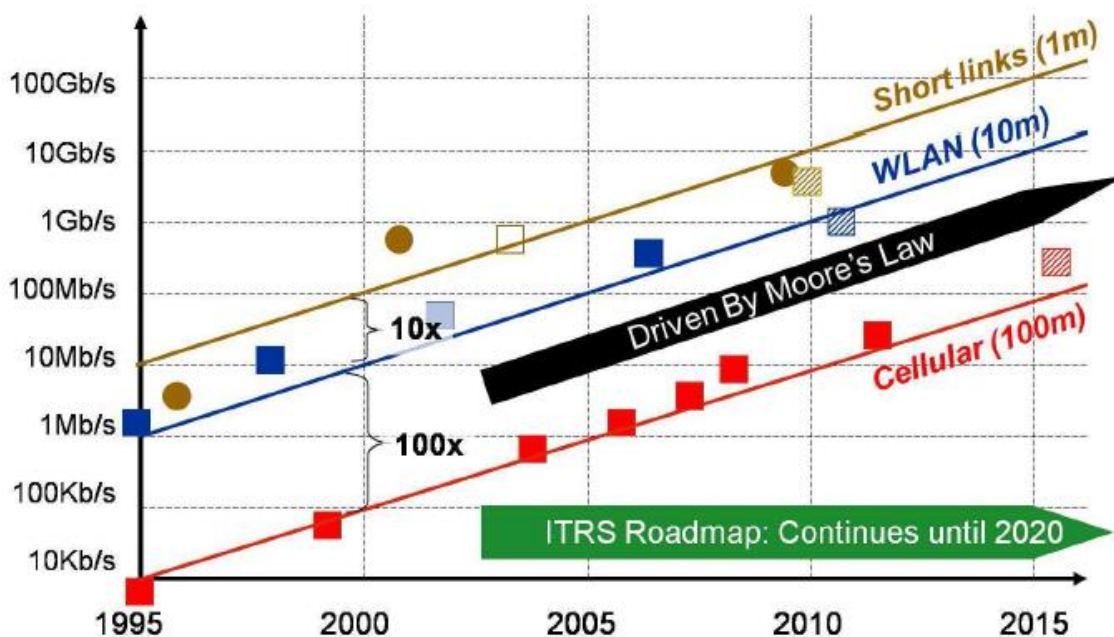
Channel Bandwidth (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
Frame Duration (ms)	10					
Subframe Duration (ms)	1					
Sub-carrier Spacing (kHz)	15					
Sampling Frequency (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
FFT Size	128	256	512	1024	1536	2048
Occupied Sub-carriers (inc. DC sub-carrier)	76	151	301	601	901	1201
Guard Sub-carriers	52	105	211	423	635	847
Number of Resource Blocks	6	12	25	50	75	100
Occupied Channel Bandwidth (MHz)	1.140	2.265	4.515	9.015	13.515	18.015
DL Bandwidth Efficiency	77.1%	90%	90%	90%	90%	90%
OFDM Symbols/Subframe	7/6 (short/long CP)					
CP Length (Short CP) ( $\mu\text{s}$ )	5.2 (first symbol) / 4.69 (six following symbols)					
CP Length (Long CP) ( $\mu\text{s}$ )	16.67					

Σχήμα 1.3.5 Παράμετροι φυσικού επιπέδου για LTE (FDD)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Πράσινες Επικοινωνίες

### 2.1 Εισαγωγή

Η μαζική χρήση των προσωπικών κινητών επικοινωνιών έχει αλλάξει τη καθημερινή ζωή των ανθρώπων σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών οι κινητές ασύρματες υπηρεσίες μετατράπηκαν σε ένα παγκόσμιο αγαθό. Το πρώτο GSM τηλεφώνημα έλαβε χώρα το 1991 στη Φινλανδία, και μόλις 15 χρόνια αργότερα, υπήρχαν πάνω από δύο δισεκατομμύρια χρήστες GSM. Σύμφωνα με την ITU, ο συνολικός αριθμός των κινητών συνδρομών στον κόσμο ξεπέρασε τις 5 δισεκατομμύρια από τα τέλη του 2010, περισσότερες δηλαδή από το 70% του πληθυσμού του πλανήτη. Συγκριτικά, υπάρχουν μόνο περίπου 1,2 δισεκατομμύρια συνδρομητές σταθερής τηλεφωνίας σε όλο τον κόσμο. Η κινητήρια δύναμη πίσω από αυτή την ταχεία ανάπτυξη ήταν η αυξανόμενη ανάγκη της διασύνδεσης των ανθρώπων για την κοινωνική και οικονομική αλληλεπίδραση του ανθρώπου. Επιπλέον, η επεξεργαστική ισχύς και η δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων των κινητών συσκευών διπλασιάζονται περίπου κάθε 18 μήνες, σύμφωνα με το Νόμο του Moore. Αυτή η μεγάλη ανάπτυξη με τη σειρά της καθιστά τη χρήση των όλο και πιο ισχυρών συσκευών και συστημάτων επικοινωνιών ελκυστική για τη μαζική αγορά. Προκειμένου τα συστήματα επικοινωνιών να είναι σε θέση να μεταφέρουν μια εκθετικά αυξανόμενη ποσότητα δεδομένων προς τον χρήστη σε ένα αποδεκτό χρονικό διάστημα, η μετάδοση δεδομένων (τόσο η ενσύρματη σύνδεση στο internet όσο και τα ασύρματα δίκτυα) έχουν εξελιχθεί περίπου με τον ίδιο ρυθμό, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.1.1 για ασύρματα συστήματα. Η ίδια τάση αναμένεται να συνεχιστεί στο εγγύς μέλλον.



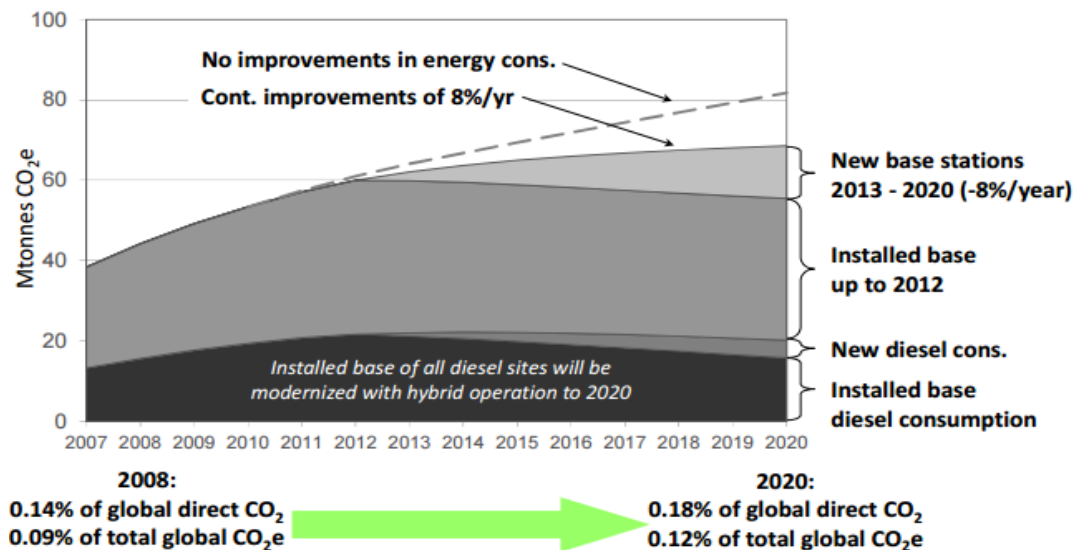
Σχήμα 2.1.1 Πρόβλεψη για την εξέλιξη των δικτύων επικοινωνιών



## 2.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον και την οικονομία

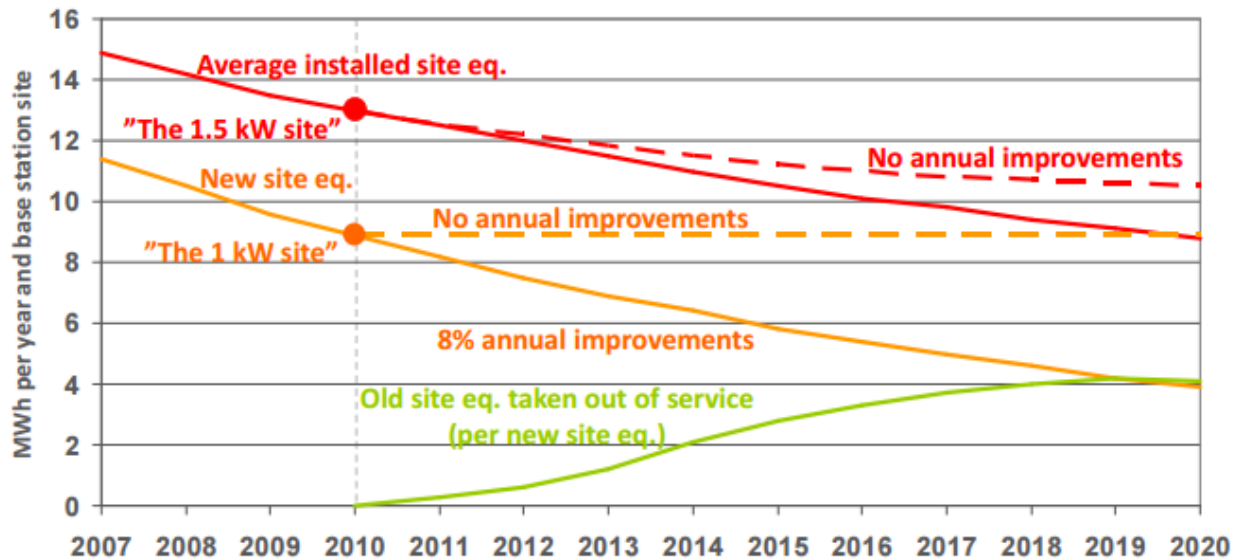
Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ασύρματες υπηρεσίες και την πανταχού παρούσα πρόσβαση στο δίκτυο, ωστόσο, συνοδεύεται από ένα τίμημα, το αυξανόμενο αποτύπωμα άνθρακα που αφορά τον κλάδο των κινητών επικοινωνιών. Έχει εκτιμηθεί ότι ολόκληρος ο κλάδος ICT (Πληροφορικής και Τεχνολογίας Επικοινωνιών), ότι αντιπροσωπεύει περίπου το 2% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> ρύπων και περίπου το 1,3% των εκπομπών CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e) για το 2007. Μελέτες επίσης εκτιμούν ότι το αντίστοιχο ποσοστό για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι 0,2% και 0,4% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> το 2007 και το 2020, αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν τις εκπομπές από ολόκληρα τα συστήματα επικοινωνιών, δηλαδή και από τους ρύπους που αφορούν τα κινητά τερματικά και όχι μόνο από τις εκπομπές που σχετίζονται με τη λειτουργία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Σε απόλυτα μεγέθη, η Έκθεση 'Smart 2020' έχει δείξει ότι το συνολικό αποτύπωμα ρύπων του τομέα ΤΠΕ, θα διπλασιαστεί περίπου μεταξύ των ετών 2007 και 2020, ενώ το αποτύπωμα των κινητών επικοινωνιών πρόκειται να υπερδιπλασιαστεί για το ίδιο χρονικό διάστημα, ποσότητα που αγγίζει το 33% των συνολικών εκπομπών ρύπων που προέρχονται από το Ηνωμένο Βασίλειο για ένα ολόκληρο χρόνο.

Εκτός από την ελαχιστοποίηση του συνολικού αποτυπώματος ρύπων των κινητών επικοινωνιών, υπάρχει μια ισχυρή οικονομική συνιστώσα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των εν λόγω δικτύων. Η διακίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας θα αυξηθεί δραματικά τα επόμενα πέντε χρόνια, κυρίως εξαιτίας της δραματικής αύξησης της κυκλοφορίας κινητών βίντεο, π.χ., το live streaming ή το YouTube[5]. Λαμβάνοντας υπόψη την αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας από τα δίκτυα, η οποία απαιτείται για την υπολογιστική πολυπλοκότητα των προηγμένων τεχνικών μετάδοσης και την αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσης που απαιτείται, αλλά και τις σταθερά αυξανόμενες τιμές της ενέργειας, γίνεται φανερό ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τις λειτουργικές δαπάνες (ΟΡΕΧ) των παρόχων κινητών τηλεπικοινωνιών.



Σχήμα 2.2.1 Πρόβλεψη για την εκπομπή CO<sub>2</sub> εξαιτίας των σταθμών βάσης

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από πετρελαιοκινητήρες, τόσο για τη κάλυψη περιοχών εκτός δικτύου όσο και ως εφεδρικοί κινητήρες των σταθμών, ευθύνεται μόνο για το 10% το 2007 αλλά είναι υπεύθυνη περίπου για το 30% όλων των εκπομπών ισοδύναμου CO<sub>2</sub> και οφείλονται σε μη βελτιστοποιημένη λειτουργία και απώλειες [5]. Ο κύριος λόγος για την επιβράδυνση της αύξησης των εκπομπών ντίζελ μεταξύ των ετών 2012 και 2020, είναι ότι όλο και περισσότεροι εκτός δικτύου σταθμοί αναβαθμίζονται και μετατρέπονται σε υβρίδια που λειτουργούν με πετρέλαιο και μπαταρίες. Η κατανάλωση ντίζελ προβλέπεται ότι θα εξακολουθεί να είναι υπεύθυνη για σχεδόν το ένα τέταρτο του συνόλου των εκπομπών CO<sub>2e</sub> το 2020, όταν όλες οι περιοχές εκτός δικτύου έχουν μοντελοποιηθεί ως υβρίδια. Μια άλλη σημαντική πτυχή είναι ότι νέοι σταθμοί βάσης είναι ενεργειακά αποδοτικότεροι σε σύγκριση με αυτούς που έχουν ήδη εγκατασταθεί. Νέοι σταθμοί βάσης επίσης συχνά εγκαθίστανται σε υφιστάμενους χώρους, έτσι ώστε μπορούν να επωφεληθούν από τα ήδη εγκατεστημένα συστήματα ισχύος και ψύξης. Επίσης, οι πιο σύγχρονοι σταθμοί βάσης παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σχέση με τους προκατόχους τους. Η διαδικασία αντικατάστασης του εξοπλισμού των σταθμών βάσης από το παλιό στο νέο διαμορφώνεται συντηρητικά, αρχής γενομένης από το 2011 και αυξάνεται με μέτριο ρυθμό. Αυτή η αύξηση στη συνέχεια επιβραδύνεται και φθάνει σε ένα επίπεδο σε 2020, το οποίο προέρχεται από το μέσο όρο της χρήσης παλαιότερων και νεότερων σταθμών. Είναι άξιο αναφοράς, ότι μόνο ένα σχετικά μικρό ποσοστό του συνόλου του εξοπλισμού των σταθμών βάσης που έχουν κατασκευαστεί στην πραγματικότητα έχει τεθεί εκτός υπηρεσίας ή αποσυρθεί. Οι πάροχοι προσπαθούν να εξελίσσουν τον υφιστάμενο εξοπλισμό τους αποσκοπώντας στη βελτίωση των εκπομπών ρύπων και της κατανάλωσης, ενώ παράλληλα προσθέτουν σύγχρονους σταθμούς με βελτιωμένη αποδοτικότητα στα δικτυώματά τους.



Σχήμα 2.2.2 Πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας των σταθμών βάσης μέχρι το 2020

Στο σχήμα 2.2.2 παρουσιάζεται η πρόβλεψη για τη κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης μέχρι το έτος 2020 [5]. Η συνεχής πορτοκαλί γραμμή αντιπροσωπεύει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των πρόσφατα εγκατεστημένων σταθμών με ετήσια βελτίωση στη κατανάλωση κατά 8%, ενώ

η συμπαγής κόκκινη γραμμή απεικονίζει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ενός «μέσου» σταθμού βάσης (λαμβάνοντας υπόψη το συνδυασμό των παλαιότερων και πρόσφατα αναπτυχθέντων sites) με το ίδιο ετήσιο ποσοστό βελτίωσης. Οι διακεκομμένες γραμμές υποθέτουν ότι η κατανάλωση των πρόσφατα εγκατεστημένων σταθμών είναι αμετάβλητη στο επίπεδο του 2010 (worst case), ενώ ο σταδιακός εκσυγχρονισμός των σταθμών βάσης αντιπροσωπεύεται από τη πράσινη γραμμή. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η κατανάλωση των σταθμών επιδέχεται μεγάλη βελτίωση, η οποία μπορεί να οδηγήσει στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων αλλά και στη δραστική μείωση των εξόδων των παρόχων τηλεπικοινωνιών.

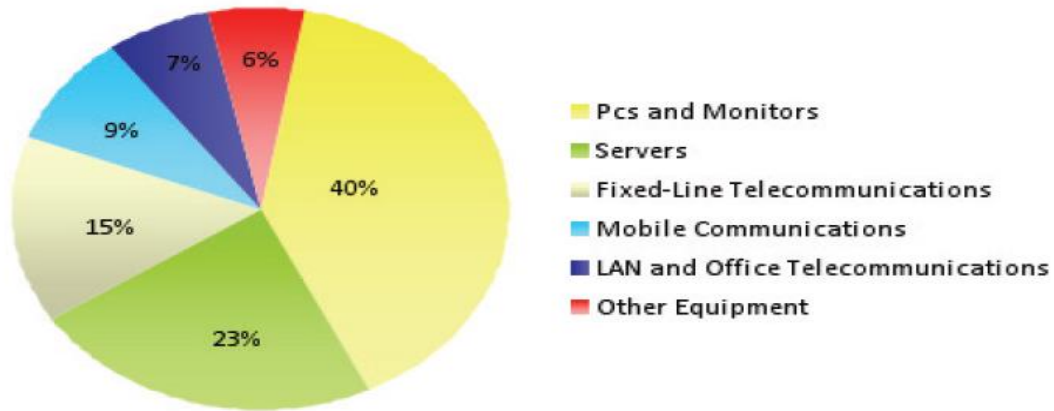
### 2.3 Μετάβαση σε πράσινα δίκτυα

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO<sub>2</sub> συνολικά, είναι ένας στόχος που αφορά όλο τον κόσμο. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει σαν στόχο μια μείωση κατά 20% για το έτος 2020. Ένα μέρος αυτής της μείωσης αφορά και τον τομέα Τηλεπικοινωνιών που μπορεί να συμβάλει με διάφορους τρόπους στην επίτευξή της. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα πράσινα δίκτυα, τα έξυπνα κτίρια, τα έξυπνα δίκτυα, τα ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS), τα ενεργειακά αποδοτικά ηλεκτρονικά στοιχεία και η εφαρμογή των ενσωματωμένων συστημάτων προς την κατεύθυνση των χαμηλών εκπομπών άνθρακα και τεχνολογίες ενεργειακής αποδοτικότητας.

Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αποτελούν ένα σημαντικό τομέα των ΤΠΕ και βρίσκονται σε τεράστια ανάπτυξη. Η συνεχής αύξηση της χωρητικότητας των συστημάτων καθώς και η παροχή πολύπλοκων υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο είναι μερικές από τις κύριες αιτίες που ανεβάζουν τη κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος των δικτύων συνεχώς, καθώς στο ανταγωνιστικό περιβάλλον του τομέα Τηλεπικοινωνιών, οι πάροχοι στρέφονται γρήγορα στις νέες τεχνολογίες προκειμένου να ενισχύσουν τα δίκτυα τους και να κερδίσουν μεγαλύτερο μερίδιο συνδρομητών από τους ανταγωνιστές τους. Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι για να συνεχιστεί αυτός ο αγώνας πρέπει να αναπτυχθούν πράσινες τεχνολογίες επικοινωνιών και πράσινα δίκτυα Τηλεπικοινωνιών.

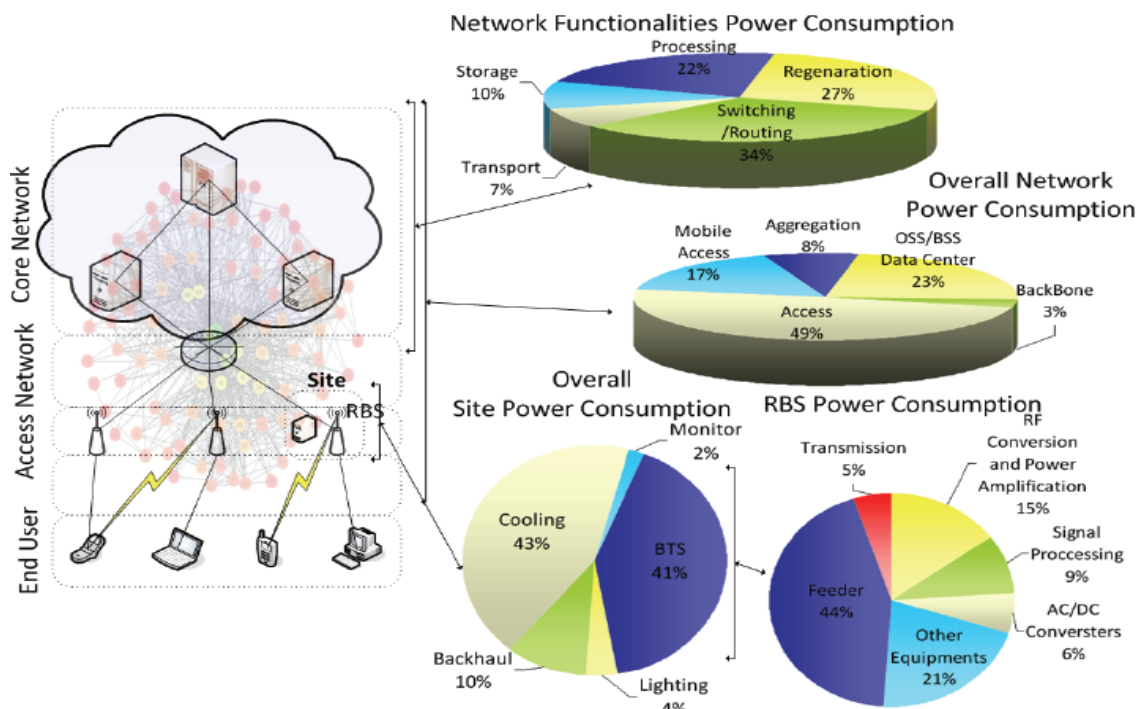
Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και η πανταχού ευρυζωνική πρόσβαση είναι αποδεδειγμένο ότι καταναλώνουν ένα τεράστιο ποσό ενέργειας για τη διανομή δεδομένων. Σε γενικές γραμμές, ο τομέας Τηλεπικοινωνιών αντιπροσωπεύει περίπου το 4% της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας. Ο στόχος είναι η ανάπτυξη των δικτύων τηλεπικοινωνιών που επιτρέπουν εξοικονόμηση ενέργειας, απαιτώντας μικρότερο λόγο Watts/Gbps δεδομένων και στην ουσία λιγότερων Watts/χρήση, χωρίς να περιορίζονται οι δυνατότητές του.

Το σχήμα 2.3.1 παρουσιάζει την κατανάλωση ενέργειας των διαφόρων τμημάτων του τομέα ΤΠΕ. Έχει παρατηρηθεί ότι σχεδόν το 50% (συμπεριλαμβανομένης της λειτουργίας των servers) οφείλεται στη λειτουργία των δικτύων Τηλεπικοινωνιών. Αυτά μπορεί να είναι κινητά δίκτυα, WLAN, τοπικά δίκτυα και δίκτυα σταθερής τηλεφωνίας.



Σχήμα 2.3.1 Κατανάλωση ενέργειας των τμημάτων του τομέα ΤΠΕ

Τα κινητά δίκτυα όμως παρουσιάζουν διαφορετική κατανομή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τα σταθερά. Όσον αφορά τα δίκτυα σταθερής τηλεφωνίας, περισσότερο από 70% της συνολικής ισχύος καταναλώνεται στο τμήμα τελικού χρήστη και μόνο το 30% οφείλεται στην λειτουργία του δικτύου. Από την άλλη πλευρά για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, ένα τμήμα της τάξης του 10% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί στο χρήστη, ενώ το 90% οφείλεται στη λειτουργία του δικτύου και επιβαρύνει μόνο τους παρόχους.

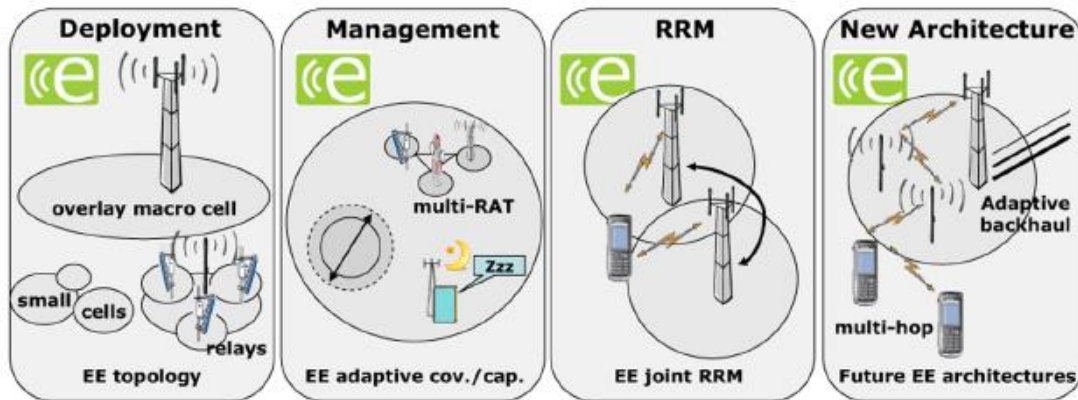


Σχήμα 2.3.2 Κατανάλωση ενέργειας των υποσυστημάτων των τυπικών δικτύων επικοινωνιών

Στο σχήμα 2.3.2 φαίνεται η κατανομή ενέργειας ενός τυπικού κυψελοειδούς δικτύου. Η μεγαλύτερη συνιστώσα της συνολικής κατανάλωσης οφείλεται στο Access Network και είναι περίπου το 50% της συνολικής κατανάλωσης, ενώ το αμέσως επόμενο υποσύστημα σε κατανάλωση ενέργειας είναι τα data centers (κατανάλωση 23%), τα οποία είναι υπεύθυνα για την αποθήκευση και τη μεταγωγή των δεδομένων προς τους χρήστες. Είναι σαφές λοιπόν ότι για την επίτευξη πράσινων δικτύων πρέπει να αναπτυχθούν σταθμοί βάσης με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις, όπως και πράσινα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Μια σημαντική έρευνα προς τα πράσινα δίκτυα έχει πραγματοποιηθεί από το earth Project (Energy Aware Radio and network technologies Project) [6].

### 2.3.1 Πράσινες τεχνολογίες στις επικοινωνίες

Ο τομέας των τηλεπικοινωνιών έχει γνωρίσει τεράστια επιτυχία και προκάλεσε την εξάπλωση της ζήτησης για ευρυζωνικές ασύρματες επικοινωνίες. Μέχρι τώρα, η τεχνολογία είχε σαν στόχο τη βελτίωση των ασύρματων δικτύων από τη σκοπιά της κάλυψης, της χωρητικότητας και της βελτίωσης του QoS για τους χρήστες των συστημάτων. Σήμερα, ο αριθμός των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας ισούται με περισσότερο από το ήμισυ του παγκόσμιου πληθυσμού. Η πρόγνωση για την αγορά των τηλεπικοινωνιών προϋποθέτει την αύξηση των συνδρομητών, τη βελτίωση στο ρυθμό δεδομένων των συνδρομητών, καθώς και την ανάπτυξη σταθμών βάσης για κινητά δίκτυα επόμενης γενιάς. Μια ανεπιθύμητη συνέπεια είναι η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας των ασύρματων δικτύων που προκαλεί την αύξηση της παγκόσμιας εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), και επιβάλλει όλο και πιο μεγάλο λειτουργικό κόστος για τις επιχειρήσεις. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλυθούν οι βασικοί άξονες της έρευνας που μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ενεργειακή αποδοτικότητα των ευρυζωνικών κυψελοειδών δικτύων, μειώνοντας έτσι το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας σήμερα έχουν μεγάλες δυνατότητες για εξοικονόμηση ενέργειας. Ο σχεδιασμός των δικτύων κινητής τηλεφωνίας έχει μέχρι τώρα επικεντρωθεί στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των τερματικών σταθμών, οι οποίοι περιορίζονται από την ισχύ της μπαταρίας τους. Αυτή η τάση έχει οδηγήσει σε μια κατάσταση όπου η κατανάλωση ενέργειας του τερματικού είναι μόνο ένα κλάσμα της κατανάλωσης ενέργειας ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Για παράδειγμα, η NTT DoCoMo[7] έχει υπολογίσει ότι, για τα 52 εκατομμύρια συνδρομητών της το 2006, η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου τους ανά κινητό χρήστη ανά ημέρα ήταν 120 φορές μεγαλύτερη από ό, τι η καθημερινή κατανάλωση ενέργειας ενός τυπικού κινητού τηλεφώνου του χρήστη. Η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου της NTT DoCoMo από το 2002 για 2006 φαίνεται να σχετίζεται άμεσα με την αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσης που εγκαταστάθηκαν και λιγότερο από την αύξηση των συνδρομητών της. Κατά συνέπεια, η βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης του σταθμού βάσης έχει μεγάλο αντίκτυπο στη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα του δικτύου. Το EARTH Project έχει διατυπώσει μια ολιστική προσέγγιση για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των δικτύων κινητών επικοινωνιών, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 2.3.1.1 Ολιστική προσέγγιση για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των δικτύων κινητών επικοινωνιών σύμφωνα με το Earth Project

Μέχρι τώρα, αρκετές τεχνολογίες Radio Access έχουν αναπτυχθεί με ένα παράλληλο τρόπο, για να φιλοξενούν διαφορετικές υπηρεσίες πάνω από τις ίδιες περιοχές. Παρ'όλα αυτά, τέτοιες λύσεις έχουν αυτόνομο σχεδιασμό δικτύου και διαχείριση πόρων. Επίσης, τα συστήματα που αναπτύσσονται έχουν βελτιστοποιηθεί ώστε να λειτουργούν αποδοτικά για υψηλά φορτία εξυπηρέτησης. Τα συστήματα όμως αυτά, δεν λειτουργούν όλη τη μέρα σε υψηλή φόρτιση. Επιπλέον, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας εμφανίζουν αργή μεταβολή της κίνησης τους ανάλογα με την ώρα της ημέρας, αλλά και αρκετές υψηλές διακυμάνσεις που οφείλονται στη κινητικότητα των χρηστών. Ωστόσο, επί του παρόντος τα δίκτυα έχουν ρυθμιστεί να λειτουργούν στατικά στο peak της απόδοσής τους. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενεργειακής σπατάλης συμβαίνει κατά τη διάρκεια συνθηκών χαμηλού φορτίου, αυτές οι διακυμάνσεις μπορεί να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο. Ως εκ τούτου, δυναμικές μεταβολές φορτίου θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές RRM(Radio Resource Management). Ο καινοτόμος σχεδιασμός των πράσινων δικτύων θα απαιτούσε να αναλυθούν τα εξής τρία θέματα:

- i. Ανάπτυξη δικτύου
- ii. Διαχείριση δικτύου
- iii. Διαχείριση των πόρων

- i. Ανάπτυξη δικτύου

Ενώ έχει δοθεί βάρος για την ανάπτυξη της απόδοσης, της χωρητικότητας και της κάλυψης των δικτύων, υπάρχει πολύ μικρή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης που οδηγούν σε μη-βέλτιστες στρατηγικές για τη κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Μια νέα έννοια στο σχεδιασμό δικτύων ερευνάται πλέον τόσο από επιστημονικούς αλλά και από βιομηχανικούς κύκλους, τα ετερογενή δίκτυα. Η ανάπτυξη των HetNet προτείνει μια ευέλικτη και ανοικτή αρχιτεκτονική για μια μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης, εφαρμογές και υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις QoS, καθώς και διαφορετικές στοίβες πρωτοκόλλου. Τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους στη τεχνολογία διεπαφής αέρα, το

μέγεθος κυψέλης, τις παρεχόμενες υπηρεσίες, την κάλυψη και την ιδιοκτησία. Τα συμπληρωματικά χαρακτηριστικά που προσφέρουν οι διαφορετικές τεχνολογίες διεπαφής προστίθενται αθροιστικά, αξιοποιώντας το κέρδος ποικιλομορφίας (diversity gain), έτσι οδηγούν το δίκτυο σε υψηλότερη συνολική απόδοση από ό,τι οι μεμονωμένες επιδόσεις των δικτύων ξεχωριστά. Στην πραγματικότητα, τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα ενός ετερογενούς δικτύου είναι τα σημαντικά κέρδη της χωρητικότητας του δικτύου και της αυξημένης κάλυψης μέσω της ευέλικτης επαναχρησιμοποίησης του φάσματος. Επίσης, η χρήση μικρότερων σταθμών βάσης σημαίνει λιγότερο απαιτητικά υποσυστήματα σε ισχύ, συμβάλλοντας επιπλέον στη μείωση της ενεργειακής δαπάνης του δικτύου.

ii. Διαχείριση δικτύου

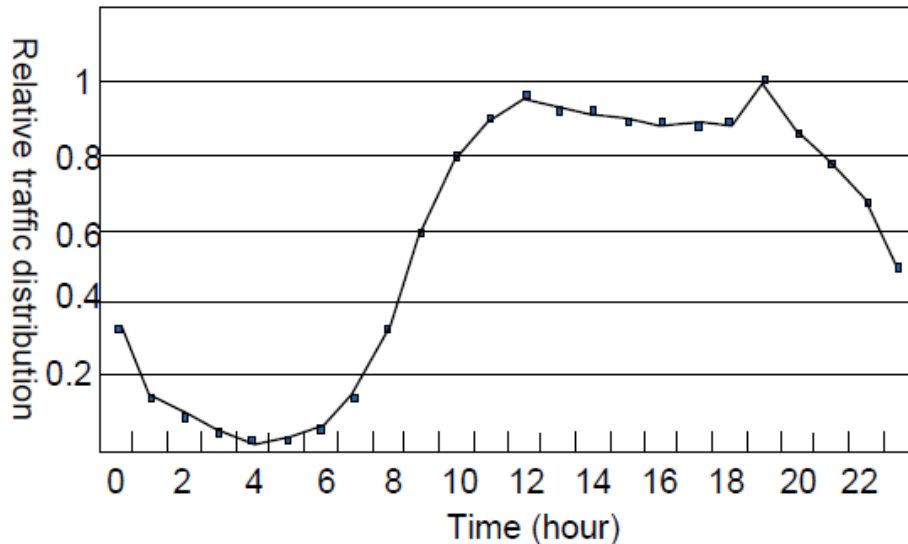
Καινοτόμες ιδέες για τη διαχείριση του δικτύου μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Η πρόκληση είναι να ρυθμιστούν όλοι οι κόμβοι του δικτύου, προκειμένου να επιτευχθούν κέρδη από τον συντονισμό μεταξύ των διαφόρων λειτουργιών, συμπεριλαμβανομένου του δικτύου κορμού. Η ιδέα είναι ότι το σύστημα μπορεί αυτόνομα και δυναμικά να μεταβάλλει την διάταξη του δικτύου σύμφωνα με π.χ., το ημερήσιο προφίλ κυκλοφορίας. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν ότι για το σχεδιασμό των νέων λειτουργιών των δικτύων είναι απαραίτητη η κατανόηση και ενσωμάτωση τεχνολογιών ενεργειακής αποδοτικότητας, καθώς και η ανάπτυξη αλγορίθμων διαχείρισης πόρων για τη βέλτιστη λειτουργία του δικτύου και παράλληλα την εξοικονόμηση ενέργειας.

iii. Διαχείριση των πόρων

Οι RRM αλγόριθμοι έχουν σχεδιαστεί για να βοηθήσουν το σύστημα να μεγιστοποιήσει τη χωρητικότητά του, με παράλληλη αντιμετώπιση των απαιτούμενων QoS και των περιορισμένων πόρων του δικτύου υπό συνθήκες φόρτου. Ωστόσο, το φορτίο σε συστήματα κινητών επικοινωνιών είναι δυναμικό και, τα παραδοσιακά σχήματα RRM δεν είναι απαραίτητως αποτελεσματικά σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν νέα RRM σχήματα που να περιλαμβάνουν συνεργασία των κυψελών, να λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά του RF front-end όπως Ενισχυτές ισχύος (PA), καθώς και τους περιορισμούς του εύρους ζώνης του κάθε δικτύου. Έχουν προταθεί πολλές τεχνικές RRM για την εξοικονόμηση ενέργειας, όπως ανταλλαγή της φασματικής απόδοσης με την ενεργειακή απόδοση, εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της καθυστέρησης μετάδοσης (κριτήριο Shannon), χρήση πολλαπλών επιπέδων διαμόρφωσης των σημάτων ανάλογα με το φορτίο κ.α.

### 2.3.2 Πράσινοι σταθμοί βάσης

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, ο σταθμός βάσης είναι ο κυριότερος παράγοντας της αύξησης της κατανάλωσης των ασύρματων δικτύων, τόσο λόγω του πλήθους των σταθμών που εγκαθίστανται, αλλά και λόγω της βελτιστοποίησης του σταθμού βάσης, ώστε να λειτουργεί αποδοτικά μόνο σε συνθήκες πλήρους φόρτου. Αυτή η τεχνική οδήγησε στην υπερκατανάλωση ενέργειας, καθώς το μοτίβο κίνησης των σταθμών βάσης εναλλάσσεται μέσα στη μέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.2.1 [8].



Σχήμα 2.3.2.1 Διακύμανση του φορτίου κίνησης των δικτύων επικοινωνιών

Το φορτίο κίνησης των σταθμών βρίσκεται πολύ χαμηλά τις πρωινές ώρες (1π.μ. – 6π.μ.), ενώ τις απογευματινές ώρες μπορεί να φτάσει ακόμα και στο 100%. Η κατανάλωση ενέργειας του σταθμού όμως, δεν αυξομειώνεται ανάλογα με το φορτίο που εξυπηρετείται, αλλά μένει σχεδόν σταθερή και ίση με το peak της. Είναι σαφές ότι εάν αντικατασταθούν οι σταθμοί βάσης από νέους, εξελιγμένους δυναμικούς σταθμούς βάσης, η κατανάλωση των κινητών δικτύων μπορεί να μειωθεί δραστικά. Μια προσέγγιση για δυναμικούς σταθμούς βάσης έχει αναλυθεί στο Earth Project [9] και συνοψίζεται παρακάτω. Η ανάλυση προτείνει αντικατάσταση των υποσυστημάτων των σταθμών βάσης με σύγχρονα, έξυπνα υποσυστήματα τα οποία δίνουν έμφαση στη κλιμάκωση της απαιτούμενης ενέργειας και του παραγόμενου έργου:



## 1. Adaptive Small-Cell Baseband Processor

Λόγω της συρρίκνωσης του εμβαδού των κυψελών και της πολυπλοκότητας της επεξεργασίας σήματος, η κατανάλωση ενέργειας των Baseband processors γίνεται ολοένα και πιο σημαντική, καθώς είναι το υποσύστημα στο οποίο εκτελούνται πολύπλοκες επεξεργασίες όπως

- Digital front-end processing and Analogue-Digital Conversion
- Up/Down sampling and filtering (Filtering)
- FFT and OFDM-specific processing
- Forward Error Correction (FEC)
- Frequency Domain (FD) processing (mapping/demapping, MIMO equalization)

Η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των ASIPs (Application Specific Instruction Processors), αντί των παραδοσιακών FPGAs. Κάθε ένα υποσύστημα του BB processor το οποίο έως τώρα ήταν κατασκευασμένο με FPGA, αντικαθιστάται από πολύπλοκους επεξεργαστές, οι οποίοι είναι βελτιστοποιημένοι για να κάνουν ο καθένας από μια λειτουργία μεμονωμένα. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με τη πλατφόρμα FPGA υπερβαίνει το 20%.

## 2. Adaptive Small-Cell RF Transceiver

Για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη κλιμάκωση της κατανάλωσης ανάλογα με το φορτίο, οι Small-Cell RF πομποδέκτες γίνονται ευέλικτοι σε διάφορα σημεία όπως:

- Sub-component muting and deactivation: να επιτρέπεται η περιορισμένη ή και πλήρης διακοπή του πομπού όταν δεν υπάρχει κίνηση.
- Bias point adaptation, gain distribution adaptation and linearity scaling: Μεταβλητό SNR και SINAD και εναλλαγή τους με την ισχύ εκπομπής κλίμακα του σήματος προς θόρυβο.
- Filter order and bandwidth adaptation: Αλλαγή του εύρους ζώνης baseband και να προσαρμογή της καταστολής παρεμβολών.

Ο συντονισμός των παραπάνω σημείων επηρεάζει τη κατανάλωση ενέργειας των πομποδεκτών RF και μπορούν να αξιοποιηθούν για αύξηση της ενεργειακής απόδοσης σε συνάρτηση με το σενάριο της κυκλοφορίας. Η πολυπλοκότητα των σημείων συντονισμού απαιτεί μια σειρά από προηγμένα πρωτόκολλα, ώστε να αναδιαμορφωθεί η λειτουργία του RF Transceiver. Ένα on-chip πρωτόκολλο σειριακή έχει αναπτυχθεί και περιγράφεται στο [10].

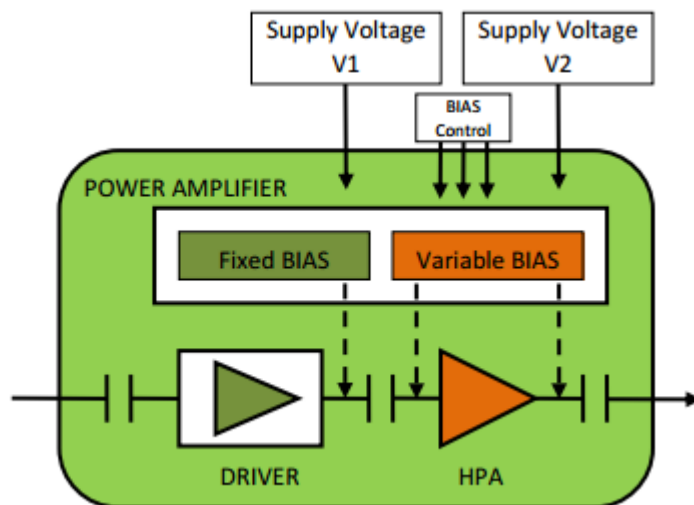
### 3. Adaptive Energy Efficient Power Amplifier

Σε αντίθεση με τα μακρο-δίκτυα, ο ενισχυτής ισχύος σε ένα δίκτυο small-cell δεν είναι το πιο ενεργοβόρο συστατικό. Αν και η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται ανάλογα με το μέγεθος των κυψελών, η ενεργειακή απόδοση του ενισχυτή ισχύος παραμένει ζωτικής σημασίας. Η απαίτηση αυτή διογκώνεται από το γεγονός ότι στους μικρούς σταθμούς βάσης σπάνια χρησιμοποιείται η τεχνική digital pre-distortion, οπότε ο ενισχυτής πρέπει να πετυχαίνει μεγάλο λόγο PAPR για τα LTE σήματα. Για την υποστήριξη του λόγου PAPR, ο ενισχυτής είναι αναγκασμένος να λειτουργεί σε μια περιοχή με χαμηλή ενεργειακή αποδοτικότητα. Είναι, επομένως, σημαντικό να διερευνηθούν τεχνικές για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

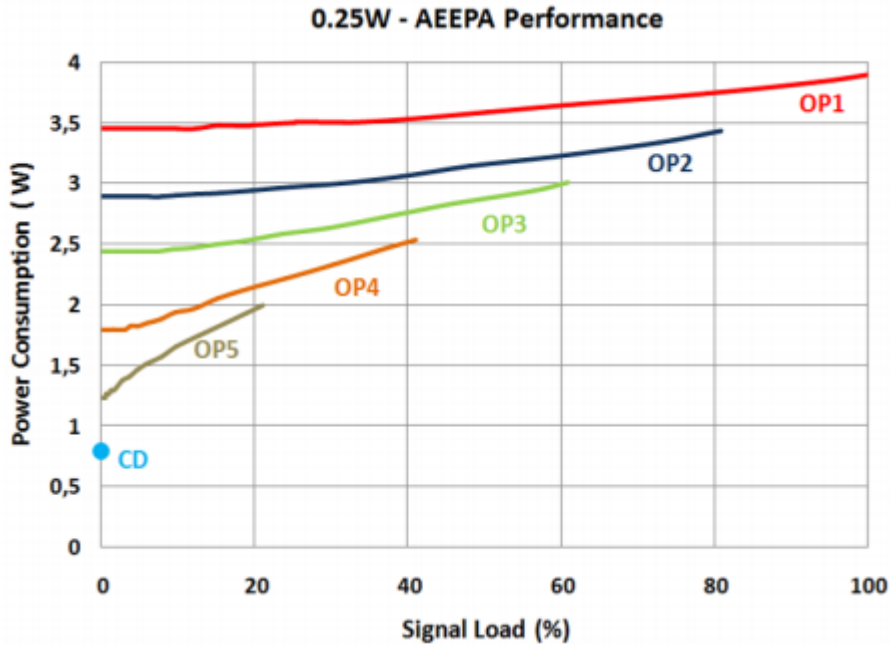
Ο Adaptive Energy Efficient PA (AEEPA) έχει προταθεί για να επιτευχθεί η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε ένα small-cell δίκτυο. Η ανάπτυξη του υποστηρίζει δύο τεχνικές: Τη ρύθμιση του σημείου λειτουργίας (OPA) και την απενεργοποίηση του ενισχυτή (CD). Και οι δύο τεχνικές επιτρέπουν να προσαρμοστεί το σημείο λειτουργίας του AEEPA σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος εξόδου RF ανάλογα με το φορτίο κίνησης και να απενεργοποιείται στις στιγμές που δεν υπάρχει φορτίο.

Ο εξοπλισμός του AEEPA έχει δύο στάδια:

- i. Ο Driver, ο οποίος λειτουργεί σαν ένας στατικός ενισχυτής ισχύος.
- ii. Ο ενισχυτής υψηλής ισχύος (HPA), είναι μια μονάδα που επιτρέπει τις τεχνικές OPA και CD να εφαρμόζονται.



Σχήμα 2.3.2.2 Αρχιτεκτονική του AEEPA

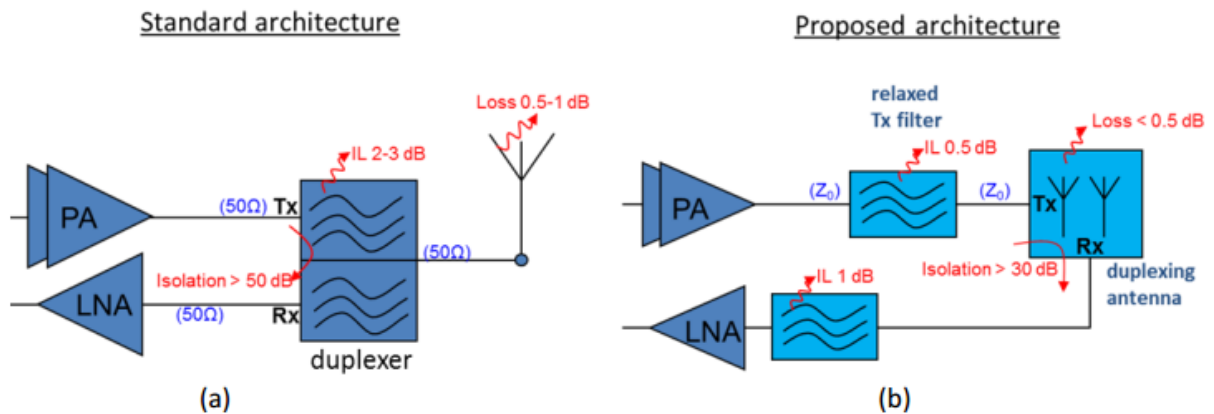


Σχήμα 2.3.2.3 Τεχνολογίες Operation Point και Component Deactivation για τους AEEPA

Πέντε σημεία λειτουργίας ορίστηκαν για τις διαφορετικές συνθήκες φορτίου: 100-80% για OP1, 80-60% για OP 2, 60-40% για OP 3, 40-20% για OP 4 και 0-20% για OP 5, παρέχοντας σημαντικές βελτιώσεις στην αποδοτικότητα του ενισχυτή. Εάν δεν εφαρμοστεί η τεχνική OPA, ο ενισχυτής λειτουργεί στο σημείο OP1. Η χρήση της τεχνικής OPA ωφελεί την αποδοτικότητα κυρίως σε συνθήκες χαμηλού φόρτου, όπως φαίνεται στο σχήμα. Σε συνδυασμό με την τεχνική της δυναμικής απενεργοποίησης (CD) στις στιγμές απραξίας, μεγιστοποιείται η εξοικονόμηση ενέργειας του δικτύου.

#### 4. Low-Loss Antenna Interface

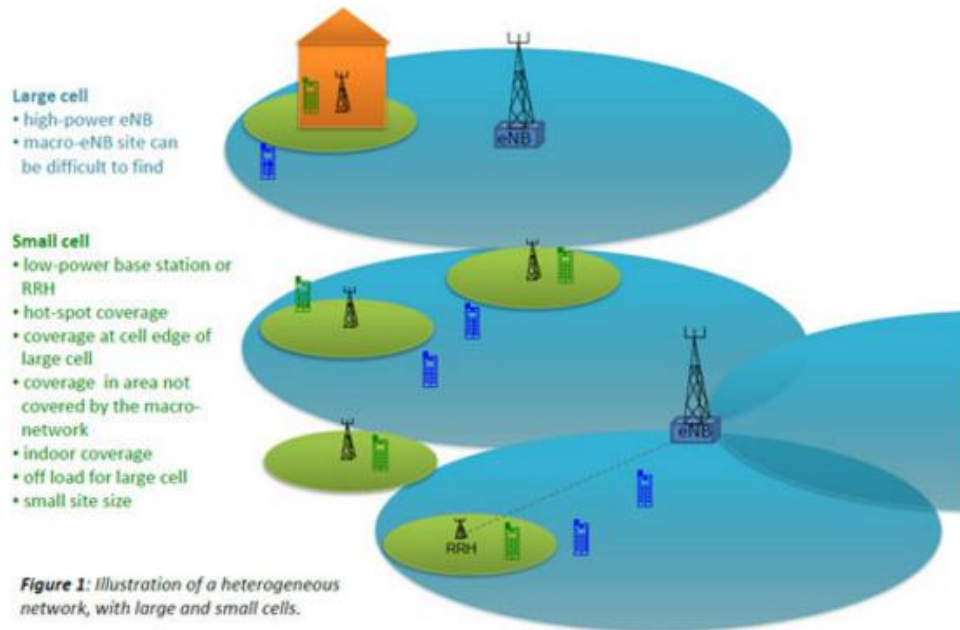
Η αποδοτικότητα των εμπορικών κεραιών σταθμού βάσης σπανίως ορίζεται, αλλά μπορεί να εκτιμηθεί στο 80-90%, κάτι που αφήνει χαμηλά περιθώρια βελτίωσης. Το Low-Loss Antenna Interface αποσκοπεί στη συνολική βελτίωση του Tx. Ειδικότερα, ασχολείται με τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του front-end σε κλασικές αρχιτεκτονικές FDD LTE για εφαρμογές small-cells. Η κύρια ιδέα βασίζεται στη κατάργηση του duplexer και τον επανασχεδιασμό της λειτουργίας του σαν κομμάτι της κεραίας. Η ίδια η κεραία εξασφαλίζει τουλάχιστον 30 dB απομόνωση μεταξύ των θυρών Tx- Rx, ενώ οι τυπικοί duplexers πετυχαίνουν απομόνωση της τάξης των 50 dB. Για να επιτευχθεί το όριο των 50 dB απομόνωσης, έχει σχεδιαστεί ένα πρόσθετο Tx φίλτρο, το οποίο περιορίζει το insertion loss για όλη τη μπάντα DL.



Σχήμα 2.3.2.4 Διαφορές της συμβατικής αρχιτεκτονικής κεραιών με τη προτεινόμενη κεραιά χαμηλών απωλειών του Earth Project

### 2.3.3 Ετερογενή δίκτυα

Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός των δικτύων είναι απαραίτητος για να αντιμετωπιστεί ο αυξανόμενος αριθμός των συνδρομητών κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών και πολυμεσικών εφαρμογών, τα οποία πρέπει να λειτουργούν χρησιμοποιώντας περιορισμένο φάσμα. Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι έχουν ανταπεξέλθει σε αυτή την πρόκληση με την αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων τους προσθέτοντας νέο φάσμα, ή προσθέτοντας τεχνικές πολλαπλών κεραιών και παράλληλα εφαρμόζοντας πιο αποτελεσματικά σχέδια διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για τη διακίνηση των δεδομένων στα δίκτυά τους. Ωστόσο, τα μέτρα αυτά δεν επαρκούν στα πιο πολυσύχναστα περιβάλλοντα και στις άκρες των κυψελών, όπου η απόδοση μπορεί να υποβαθμιστεί σημαντικά. Οι πάροχοι πλέον προσθέτουν μικρές κυψέλες στα μακρο δίκτυά τους για να διαμοιράσουν τα φορτία κίνησης σε περισσότερους κόμβους, στοχεύοντας στη διατήρηση της απόδοσης και της ποιότητας των υπηρεσιών, ενώ εξασφαλίζεται και η πιο αποτελεσματική επαναχρησιμοποίηση του φάσματος. Ένας τρόπος για την επέκταση ενός υπάρχοντος μακρο δικτύου για να θεωρείται και ομοιογενές, είναι η «πύκνωση» του με την προσθήκη περισσότερων τομέων ανά Enb, ή με την ανάπτυξη περισσότερων μακρο Enbs. Ωστόσο, η διαδοχική αύξηση μακρο Enbs στην ίδια επιφάνεια οδηγεί στη διαδοχική μείωση της απόστασης μεταξύ των Enbs. Αυτή η τεχνική μπορεί να επιδιωχθεί μόνο σε κάποιο βαθμό επειδή η εύρεση νέων μακρο-sites γίνεται όλο και πιο δύσκολη και μπορεί να είναι ακριβή, ιδιαίτερα στα κέντρα των πόλεων. Μια εναλλακτική λύση είναι η προσθήκη μικρότερων κυψελών με την εγκατάσταση σταθμών βάσης χαμηλής ισχύος (ENBs, HeNBs ή κόμβων αναμετάδοσης) ή με τη χρήση των Remote Radio Heads (RRH) στους υπάρχοντες μακρο-ENBs, ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται το μέγεθος της κυψέλης. Και για τις δυο περιπτώσεις το κόστος είναι μικρότερο, τόσο για την απόκτηση του σημείου εγκατάστασης όσο και για τη προμήθεια του εξοπλισμού που είναι πιο οικονομική όσο μικραίνουν τα μεγέθη των σταθμών.

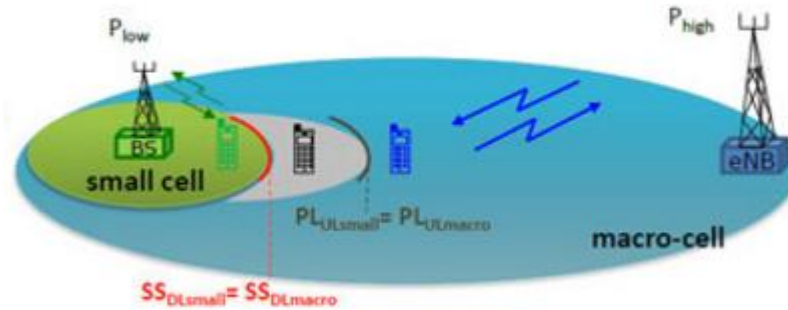


Σχήμα 2.3.3.1 Ετερογενές δίκτυο επικοινωνιών

Οι μικρές κυψέλες κυρίως προστίθενται για αύξηση της χωρητικότητας σε hot spots με υψηλή ζήτηση των χρηστών και ως συμπληρώματα σε περιοχές που δεν καλύπτονται από το μακρο δίκτυο, για εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους αμφότερα. Μπορούν επίσης να βελτιώσουν την απόδοση του δικτύου και της ποιότητας των υπηρεσιών από την εκφόρτωση κίνησης από τα μεγάλα μακρο Epbs. Το αποτέλεσμα είναι ένα ετερογενές δίκτυο με μεγάλα μακρο Epbs σε συνδυασμό με μικρές κυψέλες που παρέχουν αυξημένο bitrate ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με ένα κορεσμένο ομογενές μακρο δίκτυο. Στο σχήμα 2.3.3.1 φαίνεται ένα παράδειγμα ενός ετερογενούς δικτύου, με τη παράλληλη χρήση μεγάλων και μικρών σταθμών βάσης. Το πραγματικό μέγεθος των κυψελών δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύ εκπομπής του Epb, αλλά παίζει ρόλο και η θέση της κεραίας, όπως επίσης και το περιβάλλον όπου βρίσκεται (π.χ. αγροτική ή αστική περιοχή, εσωτερικός ή εξωτερικός χώρος).

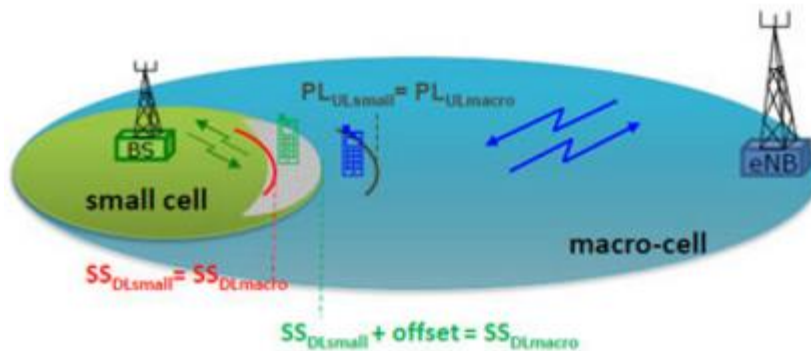
Ο ετερογενής σχεδιασμός των δικτύων είχε ήδη χρησιμοποιηθεί σε κάποια δίκτυα GSM. Οι μεγάλες και μικρές κυψέλες στο GSM διαχωρίζονται μέσω της χρήσης διαφορετικών συχνοτήτων. Αυτή η λύση εξακολουθεί να είναι δυνατή σε LTE, ωστόσο τα δίκτυα LTE χρησιμοποιούν κυρίως λόγο επαναχρησιμοποίησης συχνότητας  $N=1$  ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση του φάσματος, κάτι που οδηγεί στην ανάγκη περαιτέρω εξάλειψης της παρεμβολής μεταξύ των γειτονικών σταθμών του δικτύου. Με την εισαγωγή ενός μείγματος σταθμών βάσης με διαφορετικά μεγέθη δημιουργείται ένα ετερογενές δίκτυο, το οποίο απαιτεί πιο πολύπλοκο σχεδιασμό για την ορθή λειτουργία του. Σε ένα δίκτυο με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας 1, το κινητό τερματικό προσδένεται στο σταθμό με το ισχυρότερο σήμα DL (SSDL), ως εκ τούτου το σύνορο μεταξύ δύο κυψελών βρίσκεται στο σημείο όπου το SSDL είναι το ίδιο και για τις δυο κυψέλες. Σε ομοιογενή δίκτυα, αυτό τυπικά επίσης συμπίπτει με το σημείο για το UL (PLUL) και για τις δύο κυψέλες. Σε ένα ετερογενές δίκτυο, με κόμβους υψηλής ισχύος στις μεγάλες κυψέλες και κόμβους χαμηλής ισχύος στις μικρότερες, το σημείο του ίσου SSDL δεν θα

είναι απαραίτητως το ίδιο με εκείνο του ίσου PLUL, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.3.2. Αυτή η παράμετρος περιορίζει την ακτίνα της μικρής κυψέλης και κατά συνέπεια, τον αντίκτυπο που επιφέρει στο δίκτυο.



Σχήμα 2.3.3.2 Διαφορά της θέσης του SSDL με το PLUL σε ετερογενή δίκτυα

Ένα μείζον θέμα στο σχεδιασμό των ετερογενών δικτύων είναι να διασφαλιστεί ότι οι μικρές κυψέλες εξυπηρετούν πράγματι αρκετούς χρήστες. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι να αυξηθεί η περιοχή που εξυπηρετείται από τη μικρή κυψέλη, το οποίο μπορεί να γίνει μέσω της χρήσης ενός offset στο SSDL της μικρής κυψέλης. Αυτό ονομάζεται Cell Range Extension (CRE). Ένα αρνητικό αποτέλεσμα του CRE είναι η αυξημένη παρεμβολή στο DL που αντιμετωπίζουν τα κινητά τερματικά που βρίσκονται στην περιοχή της CRE και εξυπηρετείται από το σταθμό βάσης της μικρής κυψέλης, η οποία μπορεί να υποβαθμίσει τη ποιότητα υπηρεσίας.



Σχήμα 2.3.3.3 Χρήση του Cell Range Extension σε ετερογενή δίκτυα

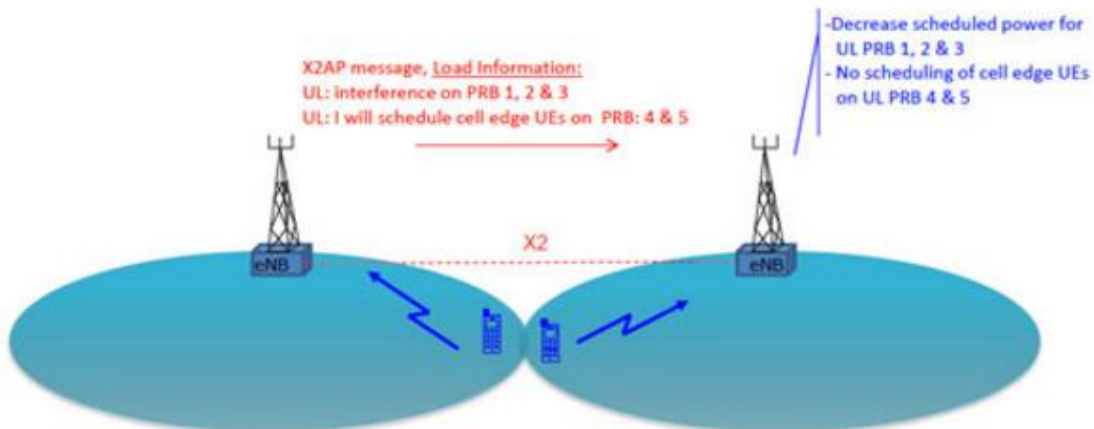
Για την εξάλειψη αυτού του φαινομένου, καθώς και για τη καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος, έχουν υλοποιηθεί διάφορες τεχνολογίες οι οποίες προστέθηκαν σταδιακά στη προτυποποίηση του 3GPP LTE και παρουσιάζονται σύντομα παρακάτω.

### 1. Intercell Interference Coordination

Η ICIC εισήχθη στο 3GPP R8 σαν μια τεχνολογία συντονισμού παρεμβολών για συστήματα LTE. Βρίσκει εφαρμογή σε καταστάσεις όπως στο σχήμα 2.3.3.4, όπου δυο κινητά τερματικά βρίσκονται στην ίδια περιοχή, αλλά ανήκουν σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης, οπότε υπάρχει πιθανότητα να χρησιμοποιούνται οι ίδιοι συχνοτικοί πόροι για την εξυπηρέτησή τους. Με τη χρήση του ICIC, οι ENBs μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω της διεπαφής X2 για να συντονίσουν τη λειτουργία τους. Η μείωση της παρεμβολής επιτυγχάνεται ανταλλάζοντας μηνύματα, μέσω των οποίων οι σταθμοί μπορούν να γνωρίζουν τα επίπεδα παρεμβολής των γειτόνων τους και να διαθέτουν πόρους (συχνότητα, ισχύς εκπομπής, κ.λπ.) στα κινητά τερματικά τους με έναν τρόπο που θα μπορούσε να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ των κυψελών. Το μήνυμα X2AP που χρησιμοποιείται για 'αυτό το σκοπό ονομάζεται "Load Information". Με το μήνυμα αυτό ένα ENB μπορεί να ενημερώσει τους γειτονικούς ENBs για:

- επίπεδο παρεμβολής UL ανά PRB.
- PRBS UL που διατίθενται για τα κινητά στις άκρες των κυψελών, και ως εκ τούτου είναι ευαίσθητα σε παρεμβολές UL.
- αν η ισχύς στο DL είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη από την τιμή κατωφλίου.

Οι ENBs που λαμβάνουν αυτά τα μηνύματα μπορούν να χρησιμοποιούν τις ληφθείσες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση στο προγραμματισμό για το UE.

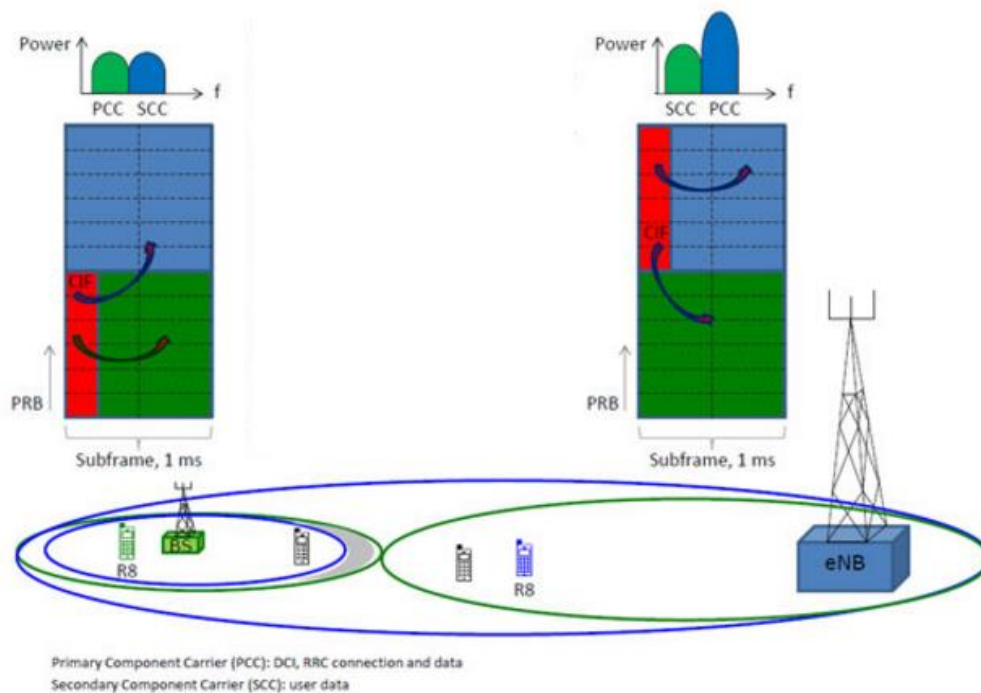


Σχήμα 2.3.3.4 Διαχείριση της διακυψελικής παρεμβολής στο 3GPP R8

## 2. Carrier Aggregation with cross-carrier scheduling

Η τεχνική Carrier aggregation (CA) εισήχθη στο 3GPP R10, παρέχοντας προς τα πίσω συμβατότητα με το R8, και αυξάνει το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης, άρα και το bitrate των κινητών τερματικών. Με τη χρήση του CA σε μια σειρά από φέροντα R8, (αναφέρονται ως Component Carriers ή CC), ενοποιούνται έτσι ώστε ένα CA-ικανό κινητό τερματικό να μπορεί να χρησιμοποιεί πόρους από όλα τα CCs, ενώ τα R8 / R9 κινητά τερματικά, χρησιμοποιούν πόρους μόνο από ένα CC.

Το Cross-carrier scheduling είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό σε ετερογενή δίκτυα. Χρησιμοποιώντας το CCS, είναι δυνατή η ανάθεση των φυσικών καναλιών ελέγχου DL (PDCCH) σε διαφορετικά φέροντα για τις μικρές και μεγάλες κυψέλες. Τα PDCCH πρέπει να παραλαμβάνονται από τα κινητά τερματικά στην άκρη των κυψελών, καθώς περιέχουν πληροφορίες της ζεύξης DL και πληροφορίες προγραμματισμού και μπορούν να μεταδίδονται με μεγαλύτερη ισχύ από ό,τι τα κανάλια δεδομένων. Ως εκ τούτου, με τη χρήση διαφορετικών φερόντων για τα PDCCH μειώνεται η πιθανότητα παρεμβολής.

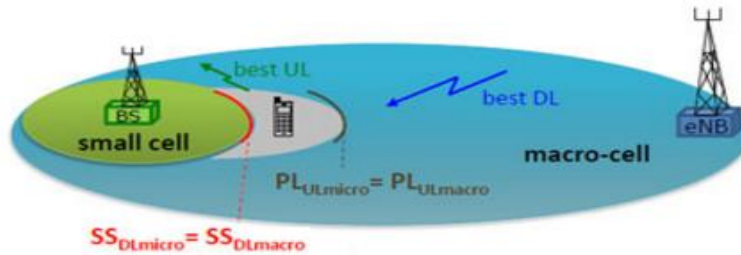


Σχήμα 2.3.3.5 Τεχνικές Carrier Aggregation και cross-carrier scheduling στο 3GPP R10



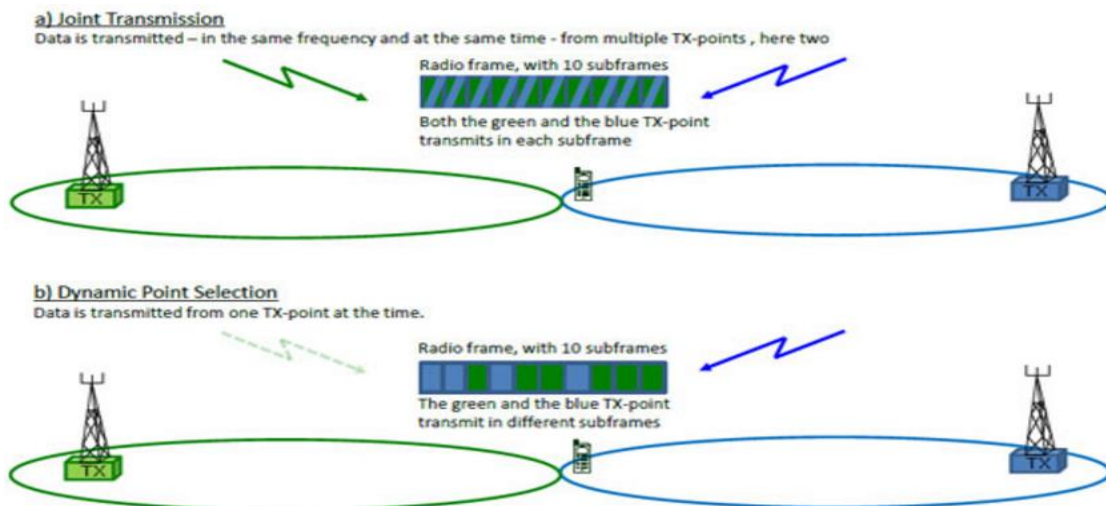
### CoMP – Coordinated Multi Point

Ένας τρόπος για να εξασφαλιστεί ότι ένα κινητό τερματικό χρησιμοποιεί το καλύτερο DL και το καλύτερο UL φέρον σε ένα δίκτυο είναι να χρησιμοποιεί το CoMP, το οποίο εισήχθη στο 3GPP R11. Με το CoMP, μια σειρά σημείων μετάδοσης/λήψης μπορούν να συνδυαστούν για την παροχή υπηρεσιών σε ένα κινητό τερματικό - για παράδειγμα, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα στα ίδια PRBs από περισσότερα από ένα σημεία μετάδοσης προς ένα κινητό, ή δεδομένα που αφορούν πολλαπλά υποπλάγια μπορούν να λαμβάνονται από διαφορετικά σημεία μετάδοσης. Αυτή η τεχνική φαίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη σε ετερογενή δίκτυα, γιατί δίνει τη δυνατότητα σε ένα κινητό τερματικό που βρίσκεται στην περιοχή CRE να χρησιμοποιήσει το βέλτιστο κανάλι UL στη μικρή κυψέλη και το βέλτιστο κανάλι DL στη μεγάλη κυψέλη. Για να λειτουργήσει η τεχνική Coordinated Multi Point, πρέπει και οι δυο σταθμοί να λειτουργούν συγχρονισμένα, ενώ πιθανόν να χρειαστεί η εγκατάσταση RRH στη μικρή κυψέλη.



Σχήμα 2.3.3.6 Τεχνική Coordinated Multi Point στο 3GPP R11

Το CoMP βρίσκει εφαρμογή σε ομογενή αλλά και σε ετερογενή δίκτυα και εφαρμόζεται με πολλούς τρόπους στο UL αλλά και στο DL [11]. Για παράδειγμα, όταν δυο ή περισσότεροι σταθμοί εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα και στο ίδιο subframe, η τεχνική ονομάζεται Joint Transmission. Όταν τα δεδομένα εκπέμπονται από δύο ή περισσότερους σταθμούς αλλά σε διαφορετικά subframes, η τεχνική ονομάζεται Dynamic Point Selection. Αντίστοιχα για το UL, υπάρχει το Joint Reception, όπου ένας αριθμός από σταθμούς δέχονται δεδομένα από ένα κινητό τερματικό.



Σχήμα 2.3.3.7 Παραλλαγές του CoMP σύμφωνα με την υπόθεση εργασίας

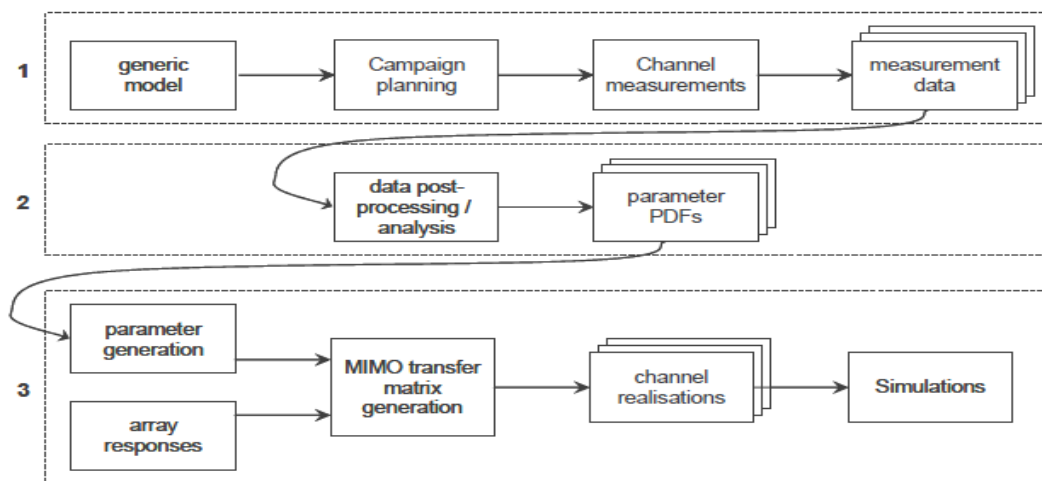
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Παρουσίαση του προσομοιωτή και των αλγορίθμων

### 3.1 Εισαγωγή

Για τις πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο καναλιού WINNER II [12], σύμφωνα με το οποίο μπορούν να προσομοιωθούν τα εξής σενάρια διάδοσης :

- indoor small office
- large indoor hall
- indoor-to-outdoor
- urban micro-cell
- bad urban micro-cell
- outdoor-to-indoor
- stationary feeder
- suburban macro-cell
- urban macro-cell
- rural macro-cell
- rural moving networks

Το μοντέλο WINNER II ακολουθεί μια στοχαστική προσέγγιση, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία πρακτικά απεριόριστων καναλιών διπλής κατεύθυνσης. Τα κανάλια αυτά υποστηρίζουν διάφορες τεχνολογίες κεραιοσυστημάτων. Οι παράμετροι του καναλιού καθορίζονται στοχαστικά, βάσει των στατιστικών κατανομών που προέρχονται από μετρήσεις παρόμοιων καναλιών. Οι κατανομές αυτές ορίζουν τιμές για μεταβλητές όπως delay spread, delay values, AoD - AoA spread, shadow fading και άλλα. Για κάθε κανάλι που δημιουργείται, υπολογίζονται οι παραπάνω μεταβλητές μεγάλης και μικρής κλίμακας από τις αντίστοιχες στατιστικές κατανομές. Τα διάφορα σενάρια μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας την ίδια προσέγγιση, αλλά με διαφορετικές παραμέτρους σύμφωνα με τις τιμές του εκάστοτε σεναρίου. Οι πίνακες των παραμέτρων για κάθε σενάριο που καλύπτεται από το μοντέλο αυτό βρίσκονται στα παραδοτέα κείμενα του WINNER II [12].



Σχήμα 3.1.1 WINNER Channel Modelling Process

Η μοντελοποίηση του καναλιού απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.1. Η διαδικασία χωρίζεται σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση ξεκινά από τον ορισμό των σεναρίων διάδοσης και περιλαμβάνει την επιλογή του περιβάλλοντος που πρέπει να μετρηθεί, του ύψους της κεραίας, την κινητικότητα, και άλλες γενικές απαιτήσεις. Το γενικό μοντέλο είναι απαραίτητο για τη διευκρίνιση των παραπάνω παραμέτρων. Ο σχεδιασμός μπορεί να ξεκινήσει όταν έχουν οριστεί τα σενάρια διάδοσης και το γενικό μοντέλο και πρέπει να γίνει προσεκτικά ώστε να ληφθούν υπόψη διάφορες πτυχές - π.χ. channel sounder setup, measurement route, link budget.

Η δεύτερη φάση της μοντελοποίησης καναλιού επικεντρώνεται στην ανάλυση των δεδομένων. Ανάλογα με τις απαιτούμενες παραμέτρους, εφαρμόζονται διαφορετικές μέθοδοι ανάλυσης. Τα προϊόντα της επεξεργασίας των δεδομένων θα μπορούσαν να είναι, για παράδειγμα, μια σειρά από κρουστικές αποκρίσεις, από στοιχεία απωλειών διαδρομής, ή παράμετροι διάδοσης. Στα προϊόντα αυτά εφαρμόζεται στατιστική ανάλυση, προκειμένου να εξαχθούν οι Power Distribution Functions (PDFs).

Η τρίτη φάση της διαδικασίας μοντελοποίησης καλύπτει τα στοιχεία που απαιτούνται για την προσομοίωση. Οι παράμετροι παράγονται σύμφωνα με τις PDFs, χρησιμοποιώντας γεννήτριες τυχαίων αριθμών και κατάλληλα φίλτρα. Για τη περίπτωση της χρήσης MIMO, οι πίνακες μεταφοράς λαμβάνονται με τη μέθοδο sum-of-rays. Τέλος, οι κρουστικές αποκρίσεις που δημιουργήθηκαν στη δεύτερη φάση της μοντελοποίησης ονομάζονται channel realizations και χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις.

### 3.2 Προσομοιωτής καθοδικής ζεύξης συστήματος LTE

Οι σταθμοί βάσης τοποθετούνται στο πλέγμα μέσω του αρχείου BSpos\_FIXED, το οποίο περιέχει τις πληροφορίες τους. Συγκεκριμένα στις στήλες 1,2 εισάγονται οι συντεταγμένες τοποθέτησης των σταθμών, στη στήλη 3 η κατανάλωση watt/subcarrier, στη στήλη 4 ορίζεται ο τύπος λειτουργίας του σταθμού (0 = LTE, 1 = HSPA), στη στήλη 5 ορίζεται η προϋπάρχουσα τοπολογία αν υπάρχει και στη στήλη 6 ο τύπος του σταθμού βάσης ως προς το μέγεθος της κυψέλης (1 = macrocell, 2 = microcell, 3 = femtocell).

BSpos_FIXED <25x6 double>						
	1	2	3	4	5	6
1	0.1667	0.1667	0.2333	0	0	2
2	0.1667	0.3333	0.2333	0	0	2
3	0.1667	0.5000	0.2333	0	0	2
4	0.1667	0.6667	0.2333	0	0	2
5	0.1667	0.8333	0.2333	0	0	2
6	0.3333	0.1667	0.2333	0	0	2
7	0.3333	0.3333	0.2333	0	0	2
8	0.3333	0.5000	0.2333	0	0	2
9	0.3333	0.6667	0.2333	0	0	2
10	0.3333	0.8333	0.2333	0	0	2
11	0.5000	0.1667	0.2333	0	0	2
12	0.5000	0.3333	0.2333	0	0	2
13	0.5000	0.5000	0.2333	0	0	2
14	0.5000	0.6667	0.2333	0	0	2
15	0.5000	0.8333	0.2333	0	0	2
16	0.6667	0.1667	0.2333	0	0	2
17	0.6667	0.3333	0.2333	0	0	2
18	0.6667	0.5000	0.2333	0	0	2
19	0.6667	0.6667	0.2333	0	0	2
20	0.6667	0.8333	0.2333	0	0	2
21	0.8333	0.1667	0.2333	0	0	2
22	0.8333	0.3333	0.2333	0	0	2
23	0.8333	0.5000	0.2333	0	0	2
24	0.8333	0.6667	0.2333	0	0	2
25	0.8333	0.8333	0.2333	0	0	2

Σχήμα 3.2.1 Αρχείο BSpos\_FIXED για 25 micro σταθμούς βάσης

Το πρόγραμμα τρέχει μέσω της master function, η οποία καλεί πρώτα τη γεννήτρια θέσεων των χρηστών (randusers.m), μετά φτιάχνει ένα κανάλι σύμφωνα με το μοντέλο WINNER II (test\_Wim2\_channel\_generation), μεταφέρει το κανάλι σε ένα συγκεκριμένο φάκελο (movefileorder.m) και τέλος ξεκινάει το προσομοιωτή (Execute\_Campaign.m) και λύνει το σενάριο που έχει επιλέξει ο χρήστης.

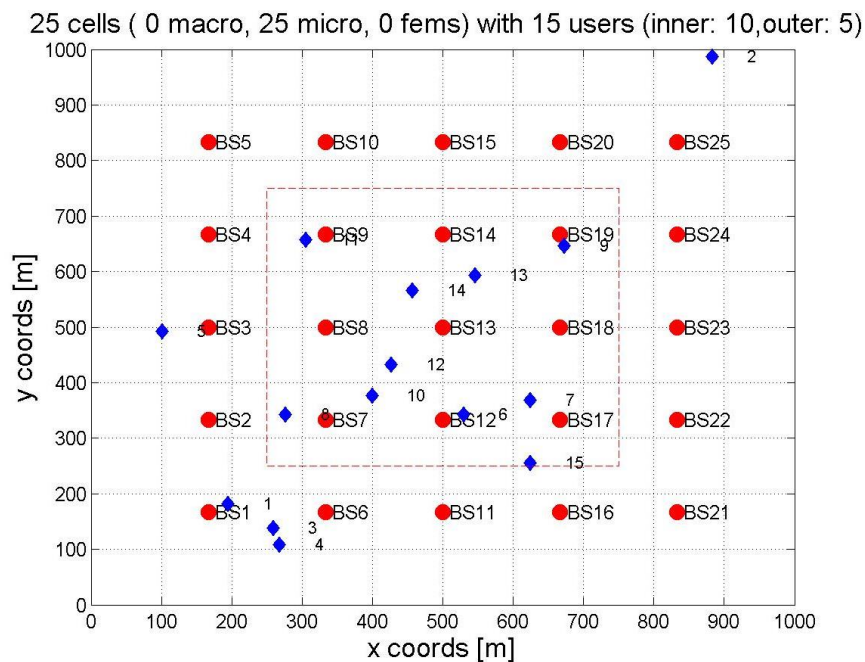
```

master_function.m* x
1 - users = input('Enter number of users:');
2 - save('C:\dkomna\Channel Generator\_update no gui\users.mat','users');
3
4 - for i = 1:1:100
5
6 -     pause(1)
7 -     run 'randusers'
8 -     pause(2)
9
10 -    run 'test_Wim2_channel_generation'
11
12
13 -    run 'movefileorder'
14
15
16 -    run 'Execute_Campaign'
17 - end
18
19

```

Σχήμα 3.2.2 Αρχείο master\_function όπου φαίνεται ο αριθμός επαναλήψεων του πειράματος

Το πλέγμα χωρίζεται στην εσωτερική περιοχή, η οποία βρίσκεται από το σημείο (250,250) μέχρι το σημείο (750,750) και την εξωτερική περιοχή, η οποία είναι ο υπόλοιπος χώρος. Οι σταθμοί βάσης απεικονίζονται με κόκκινο κύκλο, ενώ τα κινητά τερματικά με μπλε ρόμβο.



Σχήμα 3.2.3 Πλέγμα 1000x1000 μέτρα, με μια μικρότερη περιοχή στο εσωτερικό του

Στο αρχείο randusers, δημιουργούνται δυο σετ χρηστών, για τις δυο περιοχές του πλέγματος αντίστοιχα. Ανάλογα με το σενάριο φόρτου, μπορεί να γίνει επιλογή του αριθμού των χρηστών για κάθε περιοχή (γραμμές 16-22). Αρχικά, τοποθετούνται οι εξωτερικοί χρήστες (γραμμές 24-33) και αργότερα οι εσωτερικοί (γραμμές 35-39). Το αποτέλεσμα είναι ένα mat αρχείο με όνομα MSpos\_FIXED, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα περιεχόμενα του MSpos\_FIXED ανανεώνονται για κάθε επανάληψη που κάνει η master\_function ώστε να μην υπάρχουν ίδιες θέσεις για τους χρήστες.

```

randusers.m* x
11 - load('C:\dkomna\Channel Generator\_update no gui\users.mat')
12 - GRx=1;
13 - GRy=1;
14 - Users = NaN(users,3);
15
16 - if mod(users,3) == 0
17 -     users_outer = users/3;
18 -     users_inner = users*2/3;
19 - else
20 -     users_inner = (users*2/3)-(1/3);
21 -     users_outer = (users/3)+(1/3);
22 - end
23
24 - for i=1:1:users_outer+1
25 -     usersx=GRx*rand(1,1);
26 -     usersy=GRy*rand(1,1);
27
28 -     while (usersx >= 0.25 && usersx <= 0.75 && usersy >= 0.25 && usersy <= 0.75)
29 -         usersx=GRx*rand(1,1);
30 -         usersy=GRy*rand(1,1);
31 -     end
32 -     MSpos_FIXED(i,:) = [usersx,usersy];
33 - end
34
35 - for i=users_outer+1:1:users
36 -     usersx= 0.25 + rand(1,1).*(0.75-0.25);
37 -     usersy= 0.25 + rand(1,1).*(0.75-0.25);
38 -     MSpos_FIXED(i,:) = [usersx,usersy];
39 - end
40
41 - save('C:\dkomna\Channel Generator\_update no gui\MSpos_FIXED.mat','MSpos_FIXED')
42 - save('C:\dkomna\MSpos_FIXED.mat','MSpos_FIXED')
43 - save('C:\dkomna\Channel Generator\_update no gui\Bs_Ms_pos\MSpos_FIXED.mat','MSpos_FIXED')
44 - save('C:\dkomna\Users_Distribution.mat','users_inner','users_outer');
45

```

Σχήμα 3.2.4 Τυχαία τοποθέτηση των χρηστών στις 2 περιοχές του πλέγματος

Κατά τη δημιουργία του καναλιού, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταβλητές όπως τον τύπο κεραιών (isotropic/dipole), τη κεντρική συχνότητα του συστήματος και το σενάριο διάδοσης που ταιριάζει στη δοκιμαζόμενη τοπολογία σταθμών βάσης. Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε το *Bad Urban microcell scenario*.

```

Wim2_PrmsDefinition.m* x
18 %% system center frequency
19 CenterFrequency = 2.5e9;
20 fcstr = '2dot5'; % change the string description of the center frequency
21
22 %% type of arrays
23 BsAntennaElement = 'isotropic';
24
25 %% define the Winner propagation scenario for all links
26 UserDefined_WinnerPropScenario = {'B2'}; % length(UserDefined_WinnerPropScenario) must be equal to 1 or NumLinks
27

```

Σχήμα 3.2.5 Καθορισμός παραμέτρων

Εδώ ορίζονται οι μεταβλητές του καναλιού (BWchan, Nfft, Df) και ακολουθούν οι μεταβλητές του LTE συστήματος. Μετά την δημιουργία του καναλιού ξεκινά η λειτουργία του προσομοιωτή από το αρχείο execute\_Campaign.m. Παράμετροι όπως εύρος ζώνης συστήματος επικοινωνίας, αριθμός, εύρος ζώνης και ισχύς θορύβου των subcarriers ανά σταθμό βάσης καθώς και οι παράμετροι του MAC επιπέδου (όπως διάρκεια πλαισίου αποστολής και διάρκεια OFDM συμβόλου) υπολογίζονται και αρχικοποιούνται για να χρησιμοποιηθούν στις μετέπειτα προσομοιώσεις.

```

Execute_Campaign.m* x
48
49 % -----DON'T CHANGE: INNER in WINNER CM -----
50 cpar.BWchan = 100*10^6; % DON'T CHANGE!
51 cpar.Nfft = 500; % DON'T CHANGE!
52 cpar.Df = cpar.BWchan/cpar.Nfft; % subcarrier spacing, DON'T CHANGE IT!
53 % -----
54
55 cpar.BW = 5*10^6; % system bandwidth in Hz
56 cpar.Ns = cpar.BW/cpar.Df; % number of subchannels, enter manually 1 for SC
57 cpar.Ts = 1/cpar.BW; % symbol duration
58 cpar.BWs = cpar.BW/cpar.Ns; % subchannel BW
59 cpar.Tss = 1/cpar.BWs; % OFDMA symbol duration, else is equal to Ts
60 cpar.Pnoise = cpar.N0*cpar.BWs; % noise power per subchannel
61
62 % MAC
63 cpar.Tframe = 0.001; % frame duration in sec
64 cpar.Nsymb = cpar.Tframe/cpar.Tss; % number of symbols/frame:
65 cpar.WindowLength = 10000; % averaging window in number of frames (moving)

```

Σχήμα 3.2.6 Παράμετροι φυσικού και MAC επιπέδου

Στις γραμμές 164-170 ορίζονται η μέθοδος επίλυσης του σεναρίου και το guaranteed bit rate για τους χρήστες. Για κάθε σενάριο που λύνεται, εμφανίζεται και ένα snapshot του χώρου που περιέχει τους σταθμούς βάσης και τους κινητούς σταθμούς.

```

Execute_Runs.m* x
164 - tempRequiredBRPerUserArray = 250 * ones(1, NumMSs);
165 - methods_used = [2]; %choices: 'exhaustive' = 1, 'european_wireless' = 2, 'revokka_trial' = 3, 'PIMRC' = 4
166
167 - for BR_multiplier = 2
168 - for methodUsedCounter = 1:size(methods_used,2)
169 -     requiredBRPerUserArray = BR_multiplier * tempRequiredBRPerUserArray;
170 -     areBSsOpen = zeros(1, NumBSs);

```

Σχήμα 3.2.7 Εισαγωγή του αλγόριθμου επίλυσης και του bit rate των χρηστών

Έχουν υλοποιηθεί τρεις διαφορετικές μέθοδοι για την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Οι δυο τελευταίες είναι ευριστικές και έχουν σαν κύριο χαρακτηριστικό την ταχεία εύρεση μιας όχι απαραίτητα βέλτιστης λύσης στο δοθέν πρόβλημα, ενώ η πρώτη είναι εξαντλητική, δηλαδή χαρακτηρίζεται από μεγάλο χρόνο εκτέλεσης καθώς επεξεργάζεται όλα τα πιθανά σενάρια χρήσης, αλλά δεσμεύεται να βρει την βέλτιστη λύση.

```

190 -     if (methods_used(methodUsedCounter) == 1) %exhaustive
191 -         method_used = 'exhaustive';
192 -     elseif (methods_used(methodUsedCounter) == 2) %european_wireless
193 -         method_used = 'european_wireless';
194 -     elseif (methods_used(methodUsedCounter) == 4) %PIMRC
195 -         method_used = 'PIMRC';
196 -     end

```

Σχήμα 3.2.8 Αλγόριθμοι επίλυσης

Στο τέλος τρέχει η exhaustive\_search στην οποία γίνεται η πραγματική ανάθεση των subcarriers του συστήματος προς τους χρήστες και ο υπολογισμός της κατανάλωσης του συστήματος σύμφωνα με τον αλγόριθμο που το έλυσε. Οι τιμές κατανάλωσης των υποσυστημάτων ενός τυπικού σταθμού βάσης ανάλογα με την εμβέλεια του παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2.9.



```
exhaustive_search.m* x
10 - air_conditioning_consumption = 300;
11 - air_conditioning_consumption_micro = 0;
12 - air_conditioning_consumption_fem = 0;
13
14 - signal_processing_consumption = 200;
15 - signal_processing_consumption_micro = 35;
16 - signal_processing_consumption_fem = 5;
17
18 - general_power_supply = 100;
19 - general_power_supply_micro = 15;
20 - general_power_supply_fem = 2.5;
21
22 - PA_incl_feeder_consumption = 1200;
23 - PA_incl_feeder_consumption_micro = 145;
24 - PA_incl_feeder_consumption_fem = 30;
```

Σχήμα 3.2.9 Τιμές κατανάλωσης υποσυστημάτων ενός σταθμού βάσης

Η συνολική κατανάλωση του συστήματος υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης, και περιλαμβάνει τόσο τα στατικά κόστη των ενεργών σταθμών, αλλά και τα δυναμικά κόστη για την εκπομπή των απαραίτητων subcarriers για την ορθή εξυπηρέτηση των χρηστών. Τα παράγωγα της κάθε προσομοίωσης αποθηκεύονται σε αρχεία κειμένου μέσα σε ξεχωριστούς φακέλους. Κάθε φάκελος περιλαμβάνει δυο αρχεία κειμένου, μια σύνοψη της προσομοίωσης στο αρχείο compact.txt και το αναλυτικό αποτέλεσμα της μέσα από το αρχείο results.txt, ενώ υπάρχει και η επιλογή της αποθήκευσης του δικτύου με τις θέσεις των σταθμών βάσης και των κινητών τερματικών σε αρχείο εικόνας (figure.jpg).

```
exhaustive_search.m* x
329 - overallConsumedPower =
330 -     (air_conditioning_consumption + signal_processing_consumption + general_power_supply) +
331 -     (power_per_LTE_channel_micro * number_of_assigned_channels_LTE_micro +
332 -     power_per_LTE_channel_macro * number_of_assigned_channels_LTE_macro +
333 -     power_per_LTE_channel_fem * number_of_assigned_channels_LTE_fem)
334
```

Σχήμα 3.2.10 Τύπος υπολογισμού της συνολικής κατανάλωσης του συστήματος

### 3.3 BALSΟ

Ο αλγόριθμος που θα μελετήσουμε είναι ο BALSΟ (**BA**se station **L**ocation / **S**tatus **O**ptimizer ) .

Έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα σαν αλγόριθμος και συγκεκριμένα:

- 1) επιτυγχάνει σχεδόν τη βέλτιστη αποδοτικότητα της κατανάλωσης ενέργειας και συνεπώς, ελαχιστοποιεί τις εκπομπές CO<sub>2</sub>.
- 2) αποτελεί έναν αλγόριθμο χαμηλής πολυπλοκότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν πάροχο κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του κυψελωτού συστήματος, καθώς και στις φάσεις διαχείρισης δικτύου.
- 3) λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις των χρηστών ( QoS – Quality of Services ) , διατηρώντας έτσι ορισμένα πρότυπα όσον αφορά τους βασικούς δείκτες απόδοσης ( KPIs ) του δικτύου
- 4) έχει δημιουργηθεί και αναπτυχθεί υπό την προϋπόθεση να χειρίζεται τις σημερινές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης ( Radio Access Technologies – RATs ) και ως εκ τούτου λαμβάνει εγγενώς υπόψη τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των δικτύων επόμενης γενιάς.

Μια απλή περιγραφή των βημάτων του αλγόριθμου αυτού ακολουθεί παρακάτω.

1. Πρώτα δημιουργείται μια λίστα με τους καταγεγραμμένους χρήστες και τους διαθέσιμους σταθμούς βάσης. Όλοι οι σταθμοί βάσης θεωρούνται κλειστοί-ανενεργοί και ανοίγουν μόνο οι απολύτως απαραίτητοι προκειμένου να εξασφαλιστεί ο εγγυημένος ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων ( guaranteed bitrate ) για όλους τους χρήστες του δικτύου.
2. Η λίστα των χρηστών καταρτίζεται σύμφωνα με το εγγυημένο bitrate σε φθίνουσα σειρά. Ο πρώτος χρήστης στην λίστα ονομάζεται και Head of List ( HoL ) user. Σε περίπτωση που υπάρξουν ισοπαλίες, πρώτος στη λίστα μπαίνει ο χρήστης που χρειάζεται τον μικρότερο αριθμό σταθμών βάσης προκειμένου να ικανοποιηθεί πλήρως το bitrate του. Η πληροφορία αυτή δίνεται από τα blocks που είναι υπεύθυνα για την πληροφόρηση της κατάστασης των καναλιών (Channel State Information –CSI blocks) και τα οποία ανταλλάσσονται μεταξύ των σταθμών βάσης και των χρηστών. Ο εξοπλισμός του χρήστη είναι αυτός που υπολογίζει την ποιότητα των υπηρεσιών ( QoS ) που μπορούν να του παρέχουν οι διαθέσιμοι σταθμοί βάσης.
3. Ελέγχεται αν υπάρχουν σταθμοί βάσης ανοιχτοί οι οποίοι μπορούν να εξυπηρετήσουν το απαιτούμενο bitrate του πρώτου χρήστη της λίστας που δημιουργήθηκε προηγουμένως. Αν υπάρχει ένας σταθμός, τότε επιλέγεται σαν σταθμός εξυπηρέτησης, ενώ αν υπάρχουν πολλοί, επιλέγεται ο σταθμός που πετυχαίνει το μεγαλύτερο bitrate προς το χρήστη, με τη λογική ότι θα τον εξυπηρετήσει χρησιμοποιώντας λιγότερους πόρους.
4. Έπειτα αντιστοιχίζονται τα απαραίτητα κανάλια των σταθμών. Τον χρήστη αναλαμβάνει να τον εξυπηρετήσει εκείνος ο σταθμός βάσης που και ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις του όσον αφορά το bitrate του, αλλά ταυτόχρονα χρησιμοποιεί και τα λιγότερα κανάλια του ( δεσμεύει δηλαδή τους λιγότερο δυνατούς πόρους του). Μόλις εξυπηρετηθεί ο χρήστης αφαιρείται από την λίστα.

5. Αν η λίστα έχει αδειάσει τότε δεν υπάρχει άλλος χρήστης για να εξυπηρετηθεί και η λύση έχει δοθεί. Αν η λίστα περιέχει χρήστες, τότε ο BALSΟ επιλέγει το σταθμό βάσης που μπορεί να εξυπηρετήσει το πρώτο σταθμό της λίστας χρηστών κ.ο.κ. Τέλος, αν μείνει κάποιος χρήστης στη λίστα και δεν υπάρχει κατάλληλος σταθμός για την εξυπηρέτησή του, το σενάριο σημειώνεται ως άλυτο.

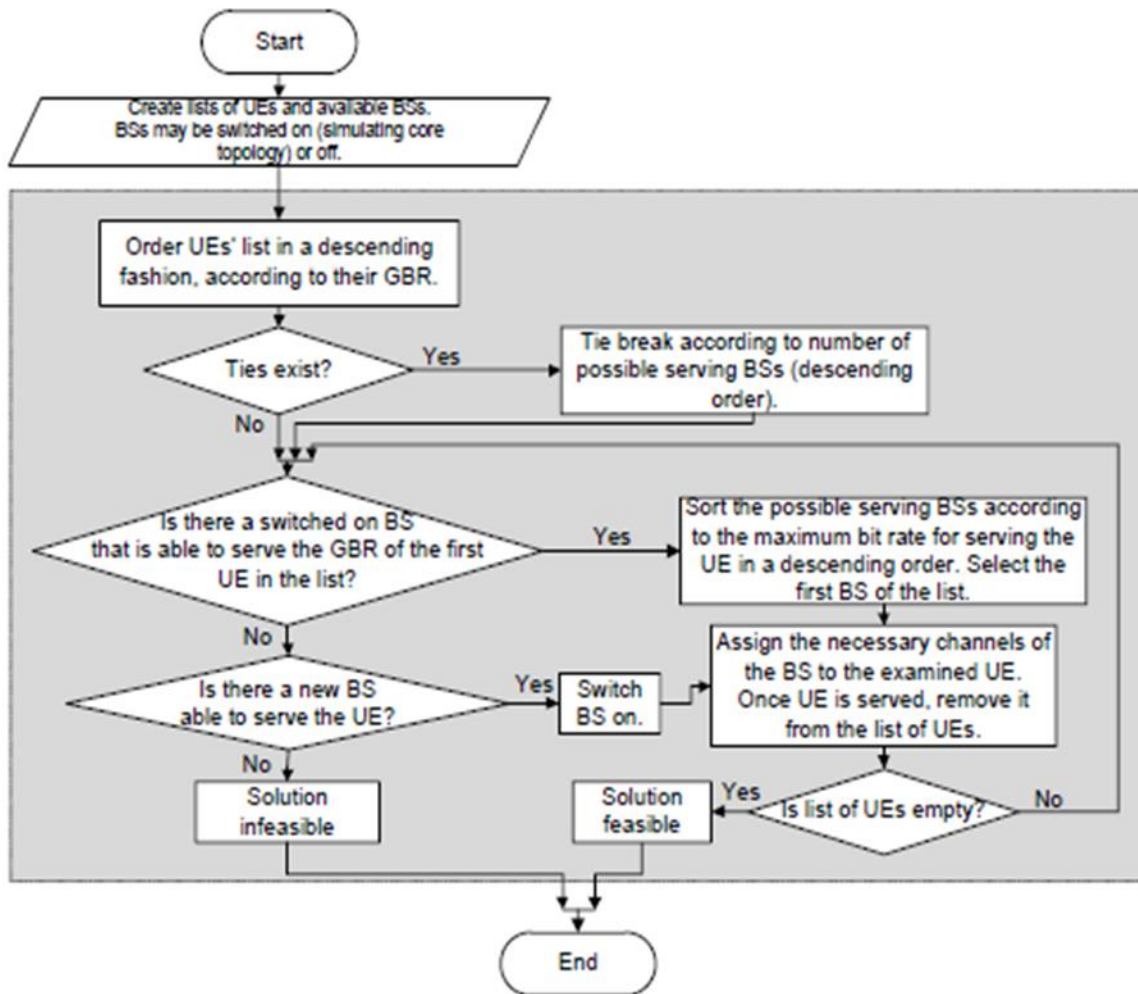
Αν ένας χρήστης δε μπορεί να εξυπηρετηθεί από το σύστημα με την υπάρχουσα τοπολογία σταθμών, ο BALSΟ θα επιχειρήσει να βρει έναν ακόμα σταθμό για να επιστρέψει. Ο σταθμός αυτός πρέπει να πληροί δυο κριτήρια.

- Το bit rate του εξεταζόμενου σταθμού βάσης για τον χρήστη που δεν εξυπηρετήθηκε προηγουμένως, πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το απαιτούμενο bit-rate του, δηλαδή δίνεται έμφαση στην εξυπηρέτηση του συγκεκριμένου χρήστη.
- Οι σταθμοί βάσης που πληρούν το πρώτο κριτήριο θα συμμετάσχουν στο δεύτερο, το οποίο και πάλι είναι η μεγαλύτερη μέση απόδοση σε όλο το εύρος των χρηστών, έτσι ώστε ο σταθμός που θα επιλεγεί να είναι σε θέση να προσφέρει όσο το δυνατόν περισσότερο bit-rate στο σύστημα.

Αυτό το σετ περιορισμών διασφαλίζει τη γρήγορη απόκριση του συστήματος σε μια αδυναμία εξυπηρέτησης, καθώς ο επόμενος σταθμός βάσης που θα χρησιμοποιηθεί στην ανάθεση θα είναι ο βέλτιστος για την εξυπηρέτηση του προβληματικού κινητού τερματικού.

Ο BALSΟ είναι με διαφορά ο ταχύτερος αλγόριθμος εξυπηρέτησης, λόγω της αρχιτεκτονικής του και της φιλοσοφίας του να εξυπηρετεί το φορτίο σειριακά (προσθέτοντας ένα σταθμό τη φορά, ανάλογα με τον αντίκτυπο που αυτός επιφέρει).

Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να χαρακτηριστεί και σαν ευέλικτος γιατί έχει την ικανότητα να φιλοξενεί διάφορες τεχνολογίες δικτύου, ποιότητα υπηρεσιών αλλά και τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης. Για παράδειγμα μπορεί να λειτουργήσει και για ένα σύστημα HSPA ( High Speed Packet Access ) με την διαφορά ότι αντί οι φυσικοί πόροι του δικτύου να είναι subchannels, είναι κωδικοί.



Σχήμα 3.3.1 Λογικό διάγραμμα του αλγόριθμου BALS

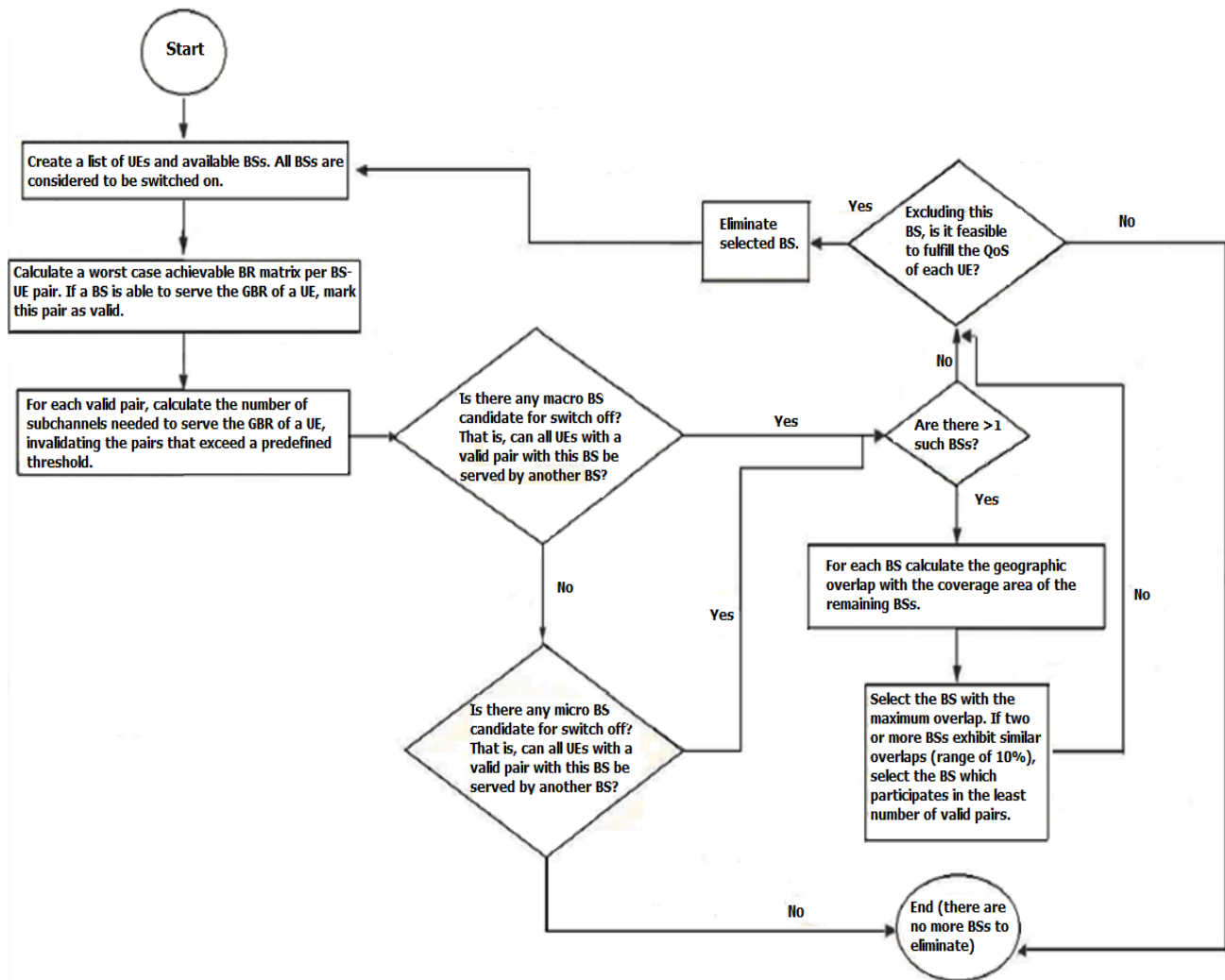
### 3.4 TWEAK

Σε αυτή τη μελέτη, έχει αναπτυχθεί ένα βέλτιστο σχήμα κατανάλωσης ενέργειας για δίκτυα πρόσβασης ραδιοεπικοινωνίας (TWEAK – opTimal poWer consumption schEme for rAdio access networKs), λαμβάνοντας υπόψη την συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου πρόσβασης ραδιοεπικοινωνίας (RAN). Τα πλεονεκτήματα μας είναι πολλαπλά.

Παρακάτω θα περιγράψουμε πολύ σύντομα και επιγραμματικά την λειτουργία του αλγόριθμου. Θα προσπαθήσουμε με απλά λόγια να εξηγήσουμε το τι ακριβώς κάνει μέσα από την καταγραφή των βημάτων που ακολουθεί.

1. Δημιουργεί λίστες με καταγεγραμμένους χρήστες και σταθμούς βάσης. Όλοι οι σταθμοί βάσης θεωρούνται “ανοιχτοί”.
2. Υπολογίζεται το χειρότερο bitrate ανά ζευγάρι σταθμού βάσης-χρήστη. Αν ένας χρήστης μπορεί να εξυπηρετηθεί από περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης, επιλέγεται ο σταθμός εκείνος που πληροί τις προϋποθέσεις για την καλύτερη εξυπηρέτηση του χρήστη. Αν ένας σταθμός μπορεί να αποδώσει το GBR ενός χρήστη τότε αυτό το ζευγάρι “σταθμού-χρήστη” χαρακτηρίζεται ως έγκυρο.
3. Για κάθε έγκυρο ζευγάρι υπολογίζεται ο αριθμός των απαιτούμενων υποκαναλιών (subchannels) προκειμένου να ικανοποιηθεί πλήρως το εγγυημένο bitrate (GBR) του χρήστη. Αν αυτός ο αριθμός των υποκαναλιών ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο (το 33% των συνολικών καναλιών του κάθε σταθμού βάσης) τότε το ζευγάρι αυτό θεωρείται άκυρο.
4. Εξετάζεται αν υπάρχουν σταθμοί οι οποίοι έχουν όλα τα ζευγάρια τους άκυρα, ενώ την ίδια στιγμή οι χρήστες του δικτύου εξυπηρετούνται από κάποιον άλλο σταθμό.
  - i. Αν δεν υπάρχει τέτοιος σταθμός, τότε όλοι οι ενεργοί σταθμοί βάσης είναι απαραίτητοι για την ομαλή λειτουργία του δικτύου.
  - ii. Αν υπάρχει μόνο ένας τέτοιος σταθμός, μαρκάρεται σαν υποψήφιος για απενεργοποίηση.
  - iii. Αν υπάρχουν περισσότεροι από έναν σταθμοί, μαρκάρεται σαν υποψήφιος αυτός με τη μεγαλύτερη κοινή γεωγραφική περιοχή με τους υπόλοιπους ενεργούς σταθμούς.
5. Αν με τον αποκλεισμό του υποψήφιου σταθμού, όλοι οι χρήστες εξυπηρετούνται, τότε ο υποψήφιος σταθμός απενεργοποιείται και ο αλγόριθμός συνεχίζει τη λειτουργία του από το βήμα 2.
6. Ο αλγόριθμος τερματίζεται όταν δεν υπάρχουν άλλοι υποψήφιοι για απενεργοποίηση, ή όταν έχουν εξυπηρετηθεί όλοι οι χρήστες.

Ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει και σε σύστημα HSPA(High Speed Packet Access) με τη διαφορά ότι θα χρησιμοποιεί σαν φυσικούς πόρους του δικτύου, κώδικες αντί για υποκανάλια (subchannels).



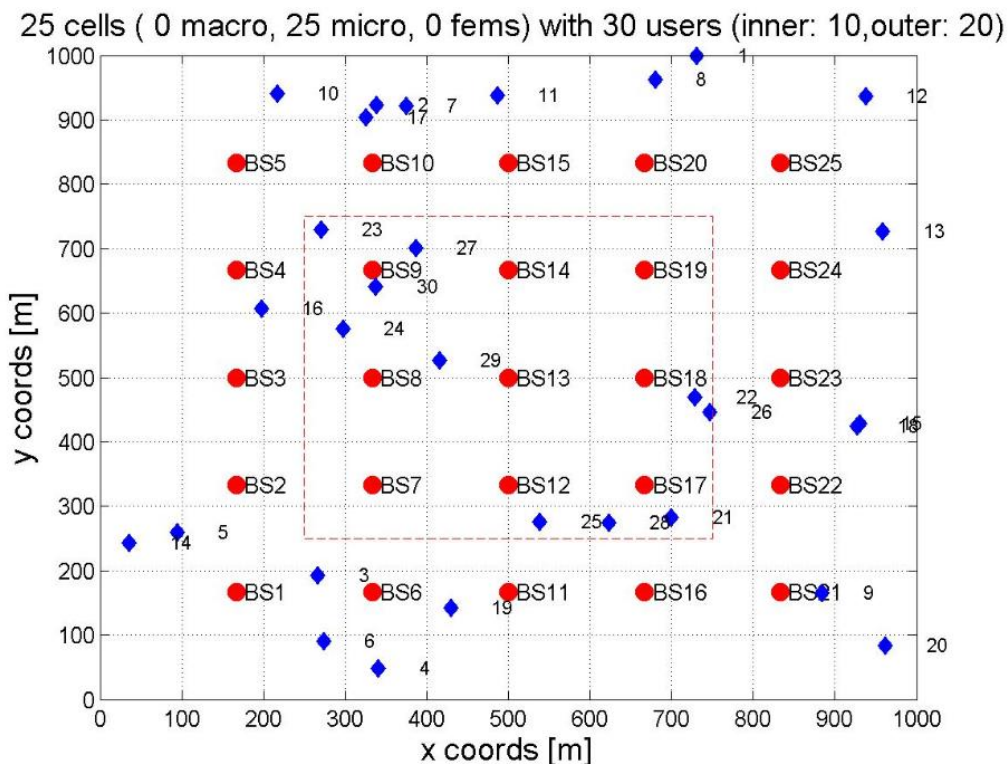
Σχήμα 3.4.1 Λογικό διάγραμμα του αλγόριθμου TWEAK

### 3.5 Πειραματικές μετρήσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων των δυο αλγορίθμων για διαφορετικές συνθήκες φόρτου. Τα προϊόντα των μετρήσεων εστιάζονται στην κατανάλωση ενέργειας των αλγορίθμων, στο χρόνο εκτέλεσής τους και στη πιθανότητα ενεργοποίησης του κάθε σταθμού.

Ο χώρος του συστήματος είναι ένα τετράγωνο  $1000\mu^2$ , στον οποίο τοποθετήθηκαν συμμετρικά και ομοιόμορφα 25 micro base stations. Ο χώρος αυτός χωρίστηκε σε δυο περιοχές, την εσωτερική περιοχή η οποία οριοθετείται στις συντεταγμένες (250 250), (250 750), (750 250), (750 750) και την εξωτερική περιοχή η οποία περιέχει το υπόλοιπο εμβαδό του αρχικού τετραγώνου. Το φορτίο εξυπηρέτησης τοποθετήθηκε στις δυο περιοχές με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει ανομοιόμορφη φόρτιση της μιας εκ των δυο περιοχών, για τη προσομοίωση hotspot. Επίσης, ορίστηκαν τρία σετ από GBR [500kbps, 750kbps, 1000kbps] που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές ανάγκες των χρηστών. Μελετήθηκαν τα εξής σενάρια φόρτου:

- 15 χρήστες με κατανομή [5 in, 10 out] και [10 in, 5 out], GBR [500kbps, 750kbps, 1000kbps]
- 30 χρήστες με κατανομή [10 in, 20 out] και [20 in, 10 out], GBR [500kbps, 750kbps, 1000kbps]
- 50 χρήστες με κατανομή [17 in, 33 out] και [33 in, 17 out], GBR [500kbps, 750kbps, 1000kbps]

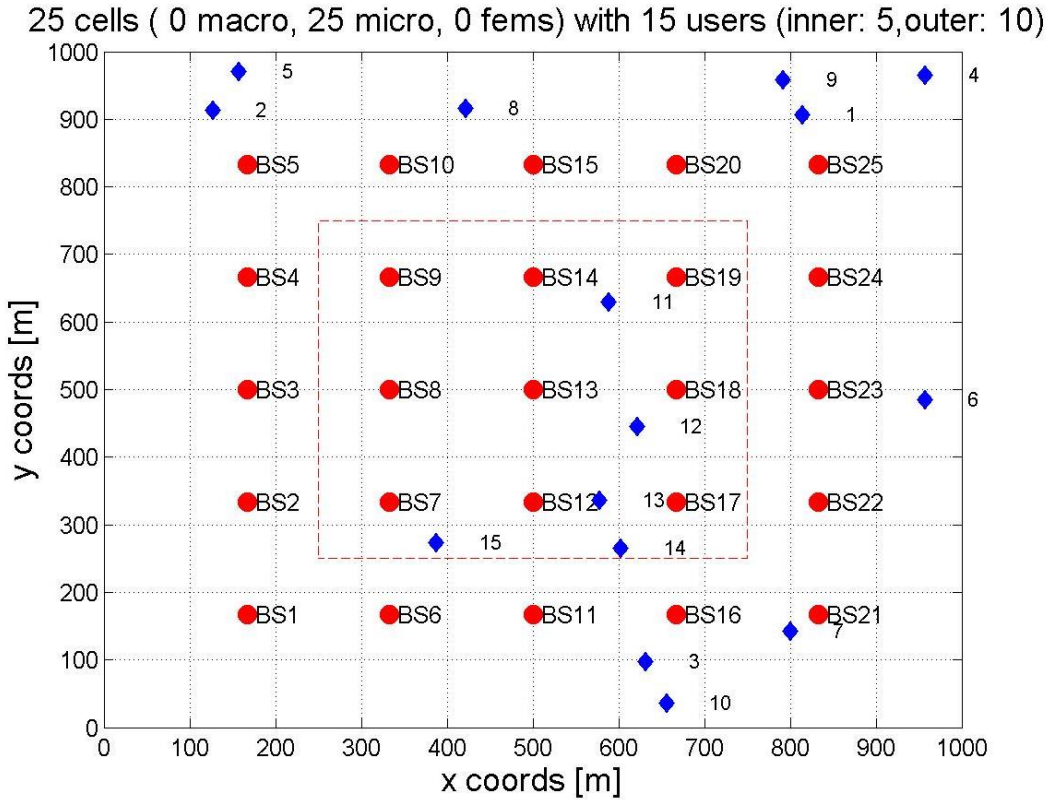


Σχήμα 3.5.1 Πλέγμα  $1000\mu^2$  με διαχωρισμό σε δυο περιοχές για τη προσομοίωση hotspot

**Σενάριο 1 (25 BSs, 15 users)**

Περίπτωση 1: 5 χρήστες στη εσωτερική περιοχή( [250,250] - [750,750] ) και 10 στην εξωτερική.

Παρακάτω παρατίθεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα πλέγματος για την συγκεκριμένη περίπτωση τοποθέτησης των χρηστών.



Σχήμα 3.5.2 Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 1.1 (5 UEs in – 10 UEs out)

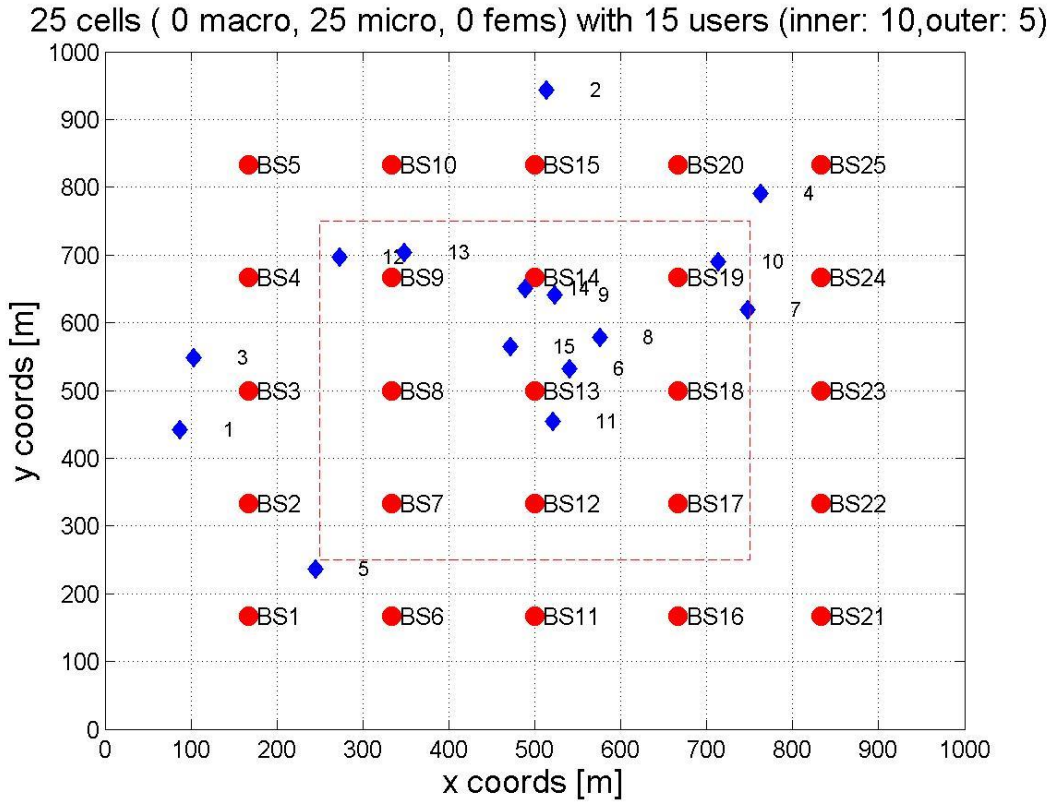
	BALSO		TWEAK	
	Mean values (sec)	Mean values (W)	Mean values (sec)	Mean values (W)
500kbps	2.35	486.3	5.51	480.5
750kbps	2.58	517.3	5.49	547.2
1000kbps	2.75	546.2	5.48	599.5

Σχήμα 3.5.3 Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 1.1



Περίπτωση 2: 10 χρήστες στη εσωτερική περιοχή( [250,250] - [750,750] ) και 5 στην εξωτερική.

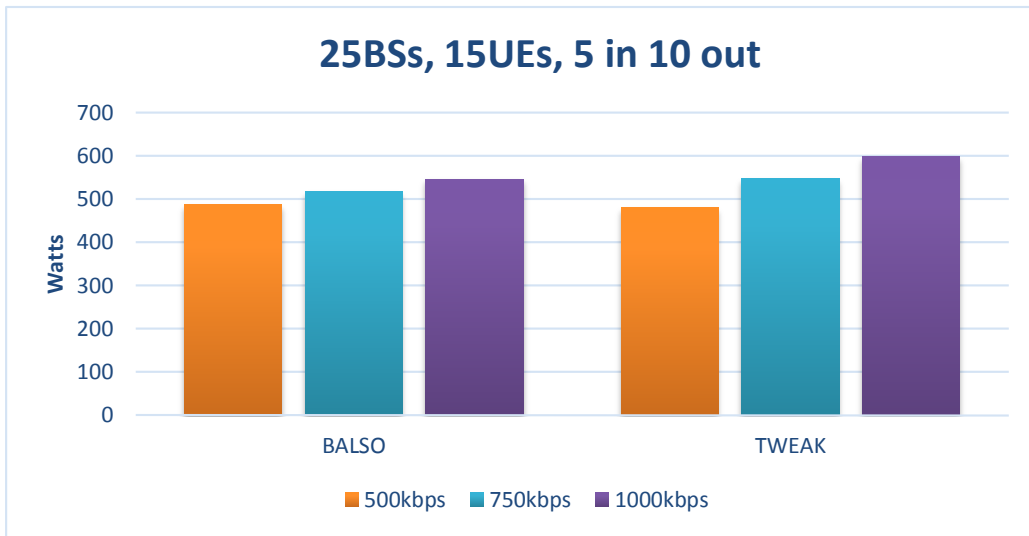
Παρακάτω παρατίθεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα πλέγματος για την συγκεκριμένη περίπτωση τοποθέτησης των χρηστών.



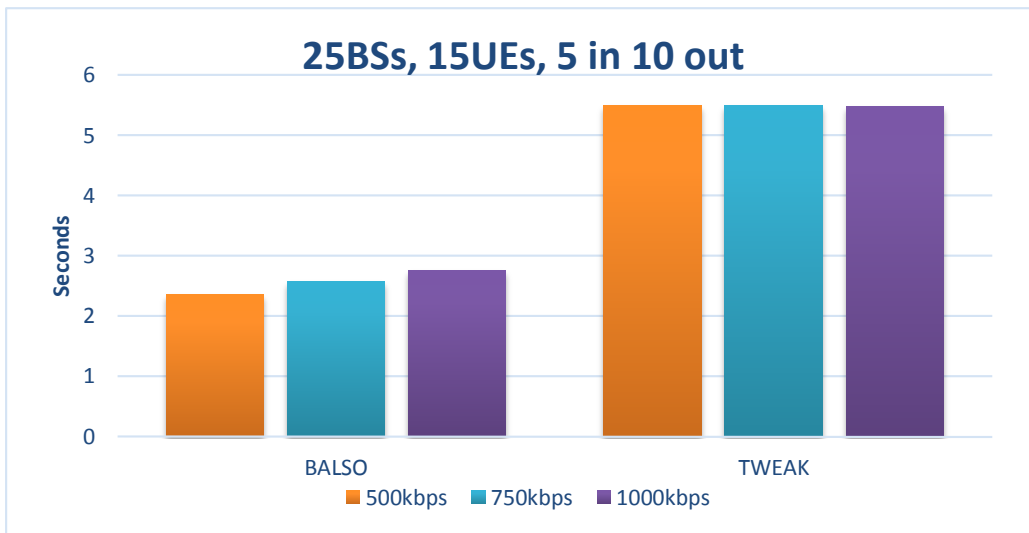
Σχήμα 3.5.4 Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 1.2 (10 UEs in – 5 UEs out)

	BALSO		TWEAK	
	Mean values (sec)	Mean values (W)	Mean values (sec)	Mean values (W)
500kbps	1.36	415.2	5.56	523.2
750kbps	1.47	465.2	5.54	626.4
1000kbps	1.67	506.8	5.53	638.9

Σχήμα 3.5.5 Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 1.2

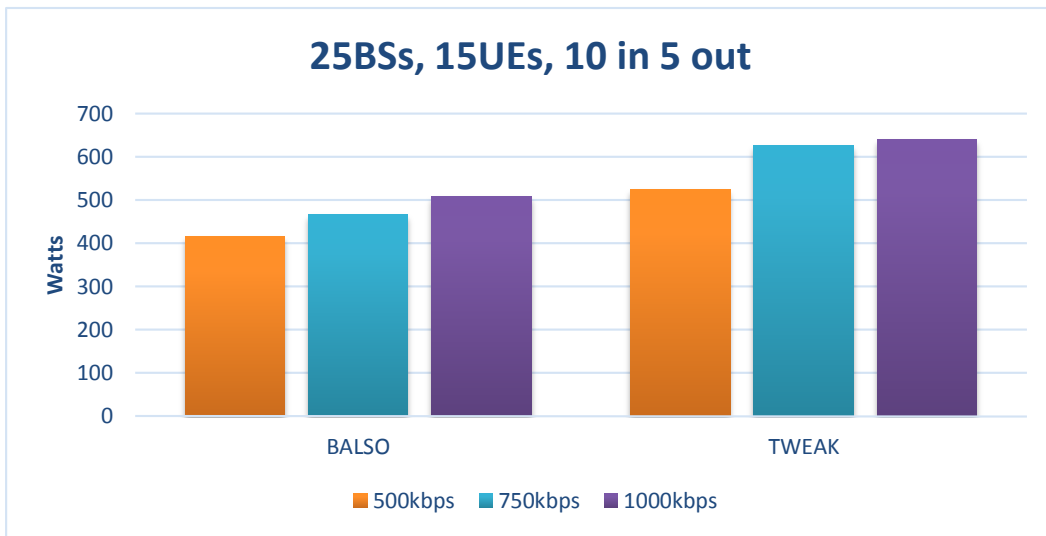


Σχήμα 3.5.6 Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 1.1

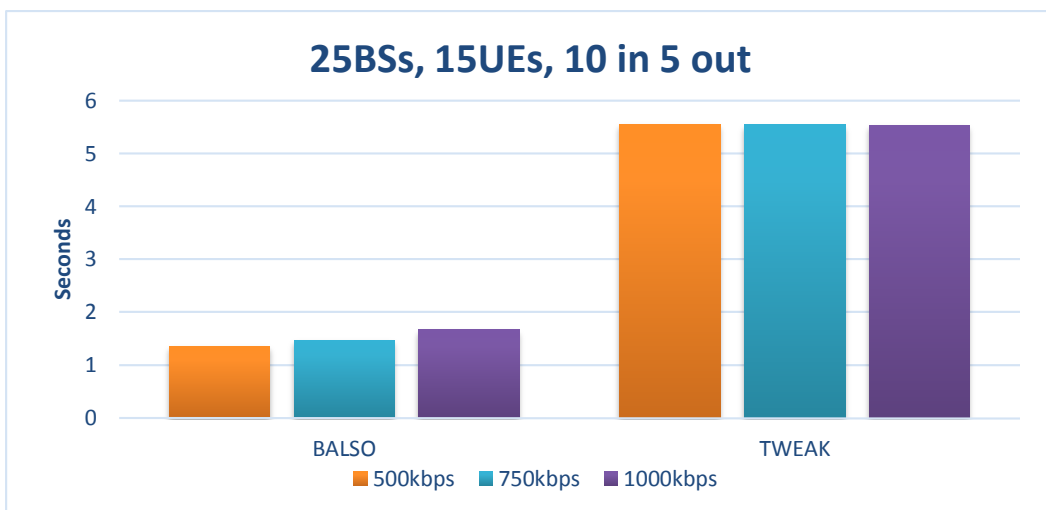


Σχήμα 3.5.7 Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 1.1

Οι δυο αλγόριθμοι εμφάνισαν παρόμοια αποτελέσματα στη κατανάλωση ενέργειας, ενώ ο BALS0 εκμεταλλεύεται την απλοϊκή αρχιτεκτονική του και λύνει το σενάριο σε πολύ σύντομο χρόνο σε σχέση με τον TWEAK.



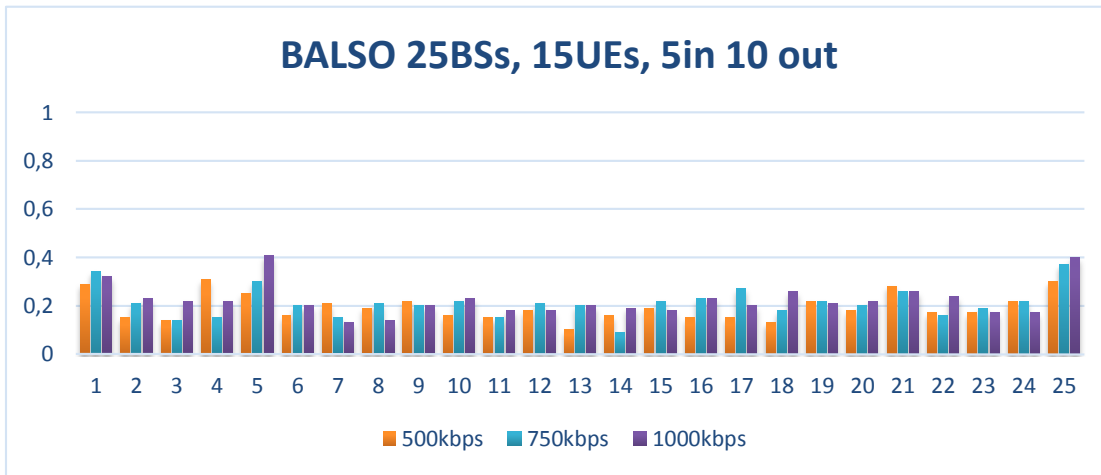
Σχήμα 3.5.8 Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 1.2



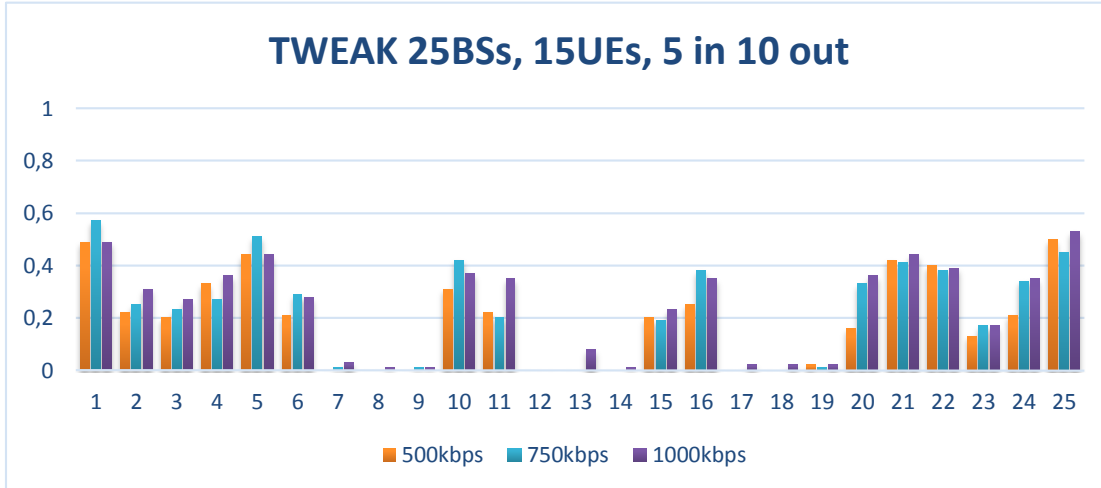
Σχήμα 3.5.9 Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 1.2

Όπως φαίνεται στα σχήματα του σεναρίου 1.2, ο BALS0 ωφελείται από τη παρουσία πολλών χρηστών στο κεντρικό χώρο, καθώς ενεργοποιεί τους σταθμούς που βρίσκονται στη βέλτιστη θέση για να εξυπηρετήσουν τα κινητά τερματικά, σε αντίθεση με τον TWEAK, ο οποίος χρησιμοποιεί τους κεντρικούς σταθμούς βάσης πολύ σπανιότερα, καθώς εισάγουν μεγάλη παρεμβολή στο σύστημα. Ως εκ τούτου, αναγκάζεται να χρησιμοποιεί περισσότερους σταθμούς από τον BALS0 και έτσι η διαφορά στην απόκριση και τη κατανάλωση μεγαλώνει ακόμα περισσότερο. Για τον TWEAK ωστόσο, παρατηρείται μια σύγκλιση των χρόνων των πειραμάτων, δηλώνοντας έτσι την άνεση του συστήματος να εξυπηρετήσει το φορτίο.

Στον τομέα της χρησιμοποίησης των πόρων, ο BALSΟ στην περίπτωση του σεναρίου με τους 5 χρήστες στην εσωτερική περιοχή και τους 10 στην εξωτερική, μοιράζει το φορτίο σχεδόν ισοδύναμα στους σταθμούς βάσης. Ο TWEAK από την μεριά του και για το ίδιο πάντα σενάριο, χρησιμοποιεί κυρίως τους ακριανούς σταθμούς (1,5,21,25) και κάποιους από την εξωτερική περιοχή του πλέγματος (10,11,15,16,20,22), χωρίς όμως να χρησιμοποιεί σχεδόν καθόλου σταθμούς βάσης που βρίσκονται στην εσωτερική περιοχή του grid. Η διαφοροποίηση του TWEAK έγκειται στην αρχιτεκτονική του, η οποία εστιάζει στους σταθμούς που δε συνεισφέρουν μεγάλη παρεμβολή στο σύστημα.

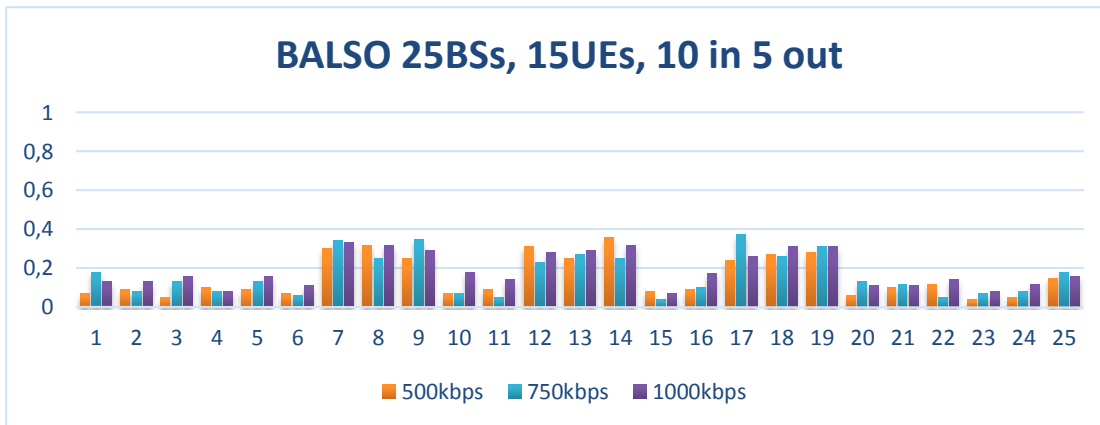


Σχήμα 3.5.10 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSΟ για το σενάριο 1.1

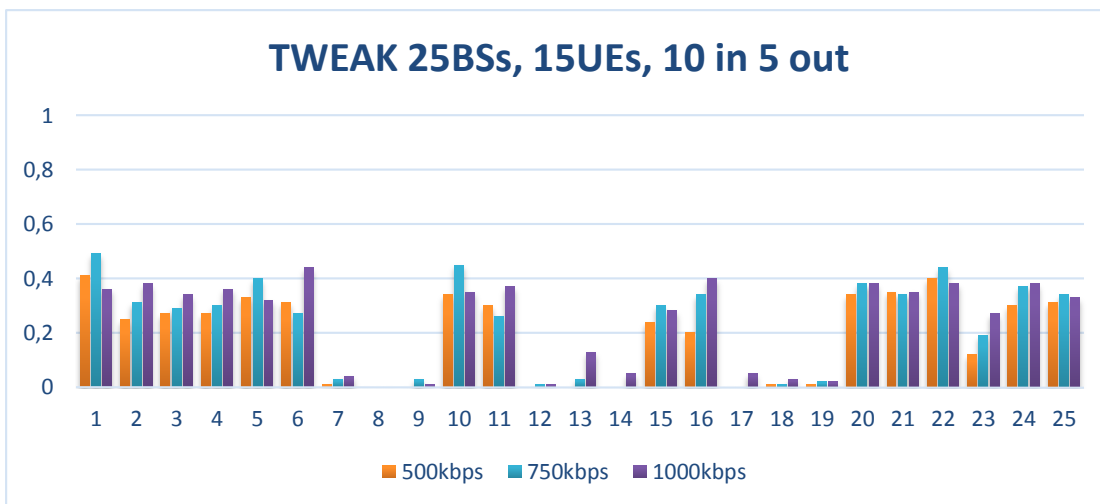


Σχήμα 3.5.11 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 1.1

Στο δεύτερο υποσενάριο με την αλλαγή της διάταξης των χρηστών αλλάζει και το μοτίβο ενεργοποίησης των σταθμών του BALSΟ, ο οποίος λύνει το σενάριο χρησιμοποιώντας κυρίως τους 9 εσωτερικούς σταθμούς (7,8,9,12,13,14,17,18,19), γιατί οι περισσότεροι βρίσκονται στην εσωτερική περιοχή. Αντιθέτως, η κατανομή που εφαρμόζει ο TWEAK δείχνει τη τάση του αλγόριθμου να χρησιμοποιεί τους σταθμούς βάσης με μικρή επικάλυψη στο χώρο, για το περιορισμό της παρεμβολής στο σύστημα.



Σχήμα 3.5.12 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSΟ για το σενάριο 1.2



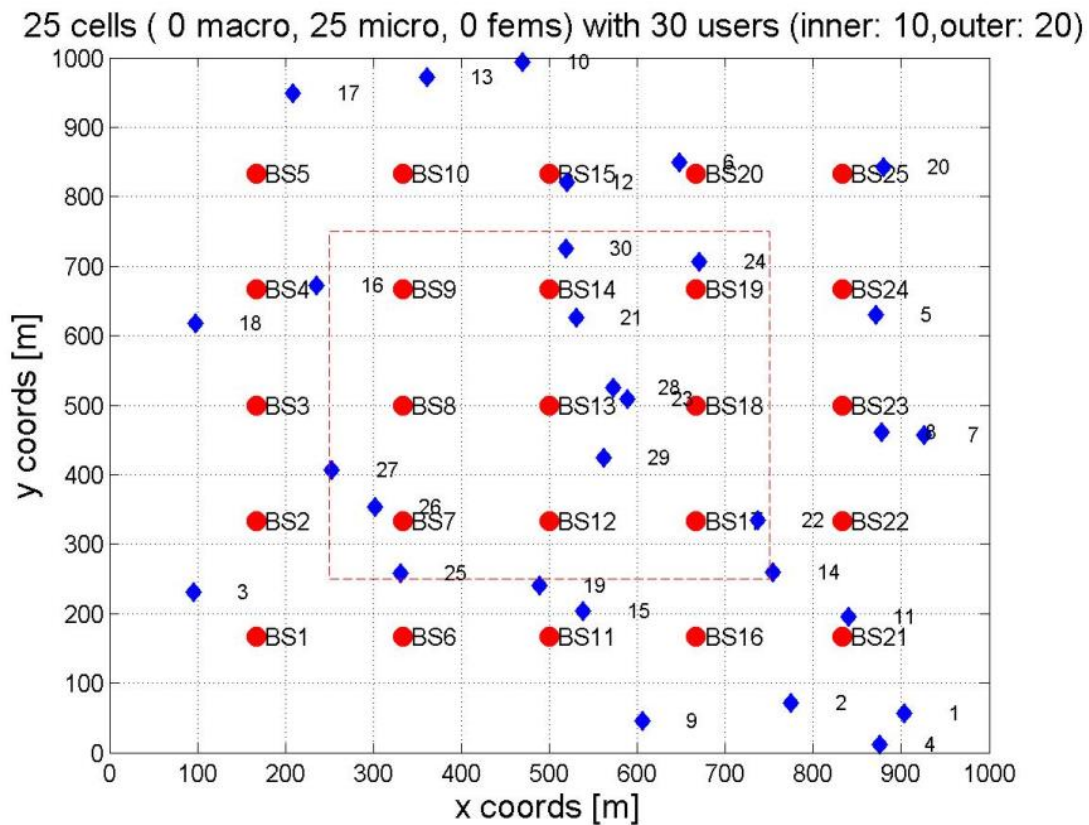
Σχήμα 3.5.13 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 1.2

Για τα διαγράμματα του BALSΟ, παρατηρούμε μια διαφορά στη χρησιμοποίηση των σταθμών γιατί στη 2<sup>η</sup> περίπτωση το μεγαλύτερο ποσοστό τους βρίσκεται στη μικρή περιοχή του πλέγματος, οπότε χρησιμοποιούνται κυρίως οι εσωτερικοί σταθμοί βάσης και λιγότερο οι εξωτερικοί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ταχύτερη ολοκλήρωση των πειραμάτων όπως φαίνεται στους σχετικούς πίνακες. Στη περίπτωση του TWEAK, η φόρτιση της εσωτερικής περιοχής οδηγεί στην αύξηση των σταθμών που λύνουν το κάθε σενάριο, καθώς οι εξωτερικοί σταθμοί προσφέρουν περιορισμένη κάλυψη στο χώρο που βρίσκονται οι περισσότεροι χρήστες.

**Σενάριο 2 (25 BSs, 30 users)**

Περίπτωση 1: 10 χρήστες στη εσωτερική περιοχή( [250,250] - [750,750] ) και 20 στην εξωτερική.

Παρακάτω παρατίθεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα πλέγματος για την συγκεκριμένη περίπτωση τοποθέτησης των χρηστών.



Σχήμα 3.5.14 Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 2.1 (10 UEs in – 20 UEs out)

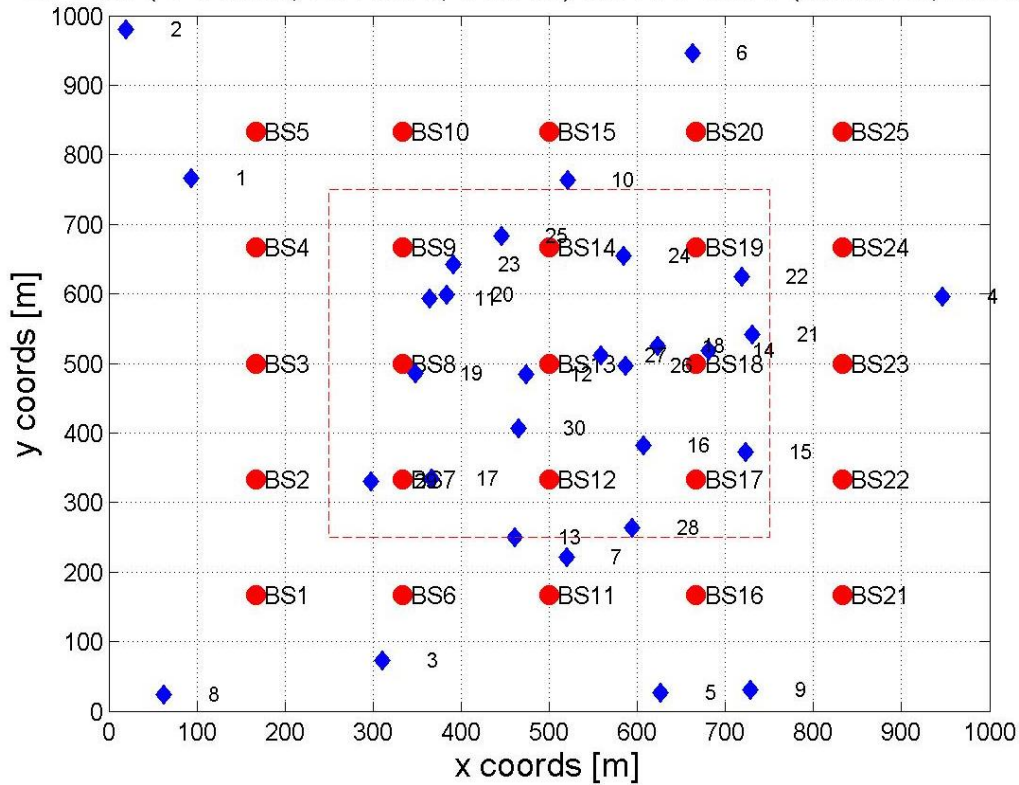
	BALSO		TWEAK	
	Mean values (sec)	Mean values (W)	Mean values (sec)	Mean values (W)
500kbps	3.84	746.72	12.07	787.39
750kbps	4.15	832.04	10.16	900.27
1000kbps	4.54	925.44	8.95	1026.43

Σχήμα 3.5.15 Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 2.1

Περίπτωση 2: 20 χρήστες στη εσωτερική περιοχή( [250,250] - [750,750] ) και 10 στην εξωτερική.

Παρακάτω παρατίθεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα πλέγματος για την συγκεκριμένη περίπτωση τοποθέτησης των χρηστών.

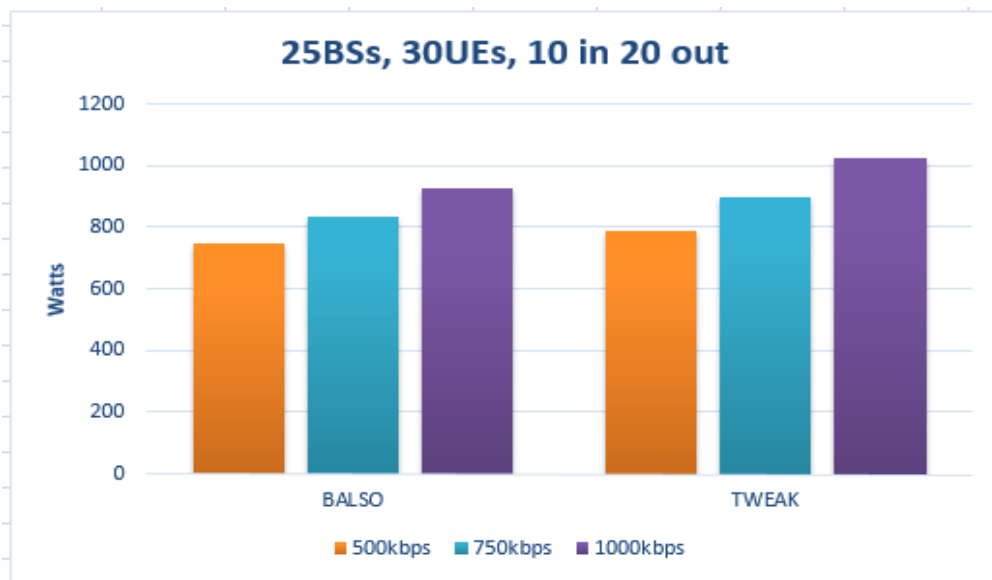
25 cells ( 0 macro, 25 micro, 0 fems) with 30 users (inner: 20,outer: 10)



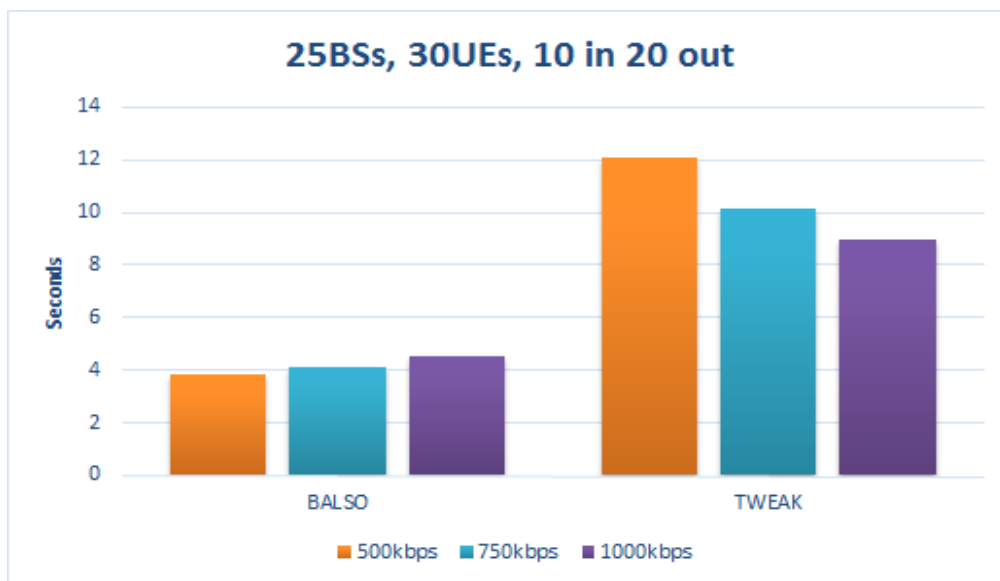
Σχήμα 3.5.16 Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 2.2 (20 UEs in – 10 UEs out)

	BALSO		TWEAK	
	Mean values (sec)	Mean values (W)	Mean values (sec)	Mean values (W)
500kbps	3.32	682.19	9.06	873.99
750kbps	3.80	799.80	8.99	1024.43
1000kbps	4.36	910.52	8.98	1091.51

Σχήμα 3.5.17 Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 2.2



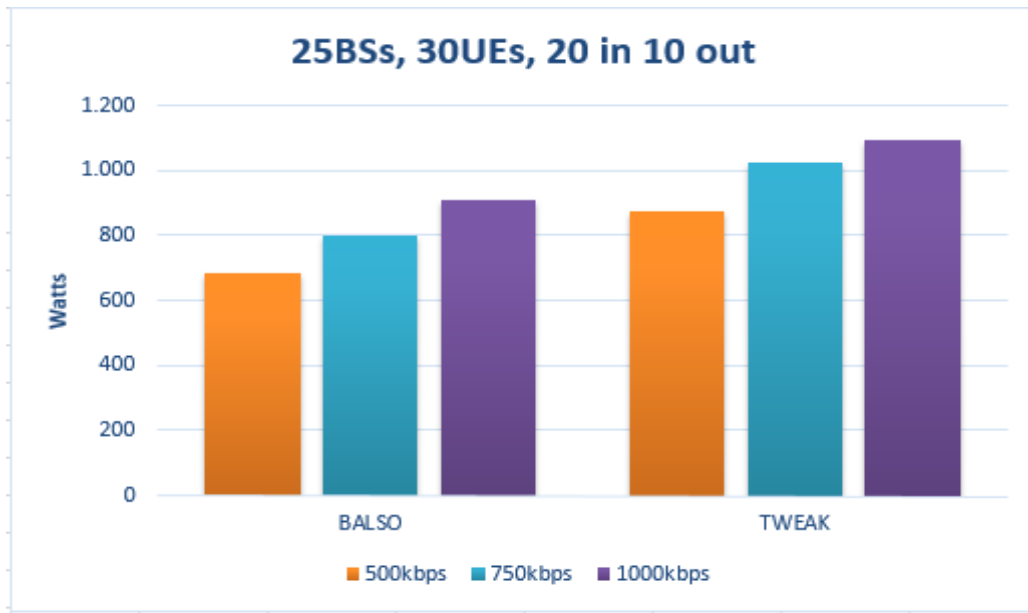
Σχήμα 3.5.18 Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 2.1



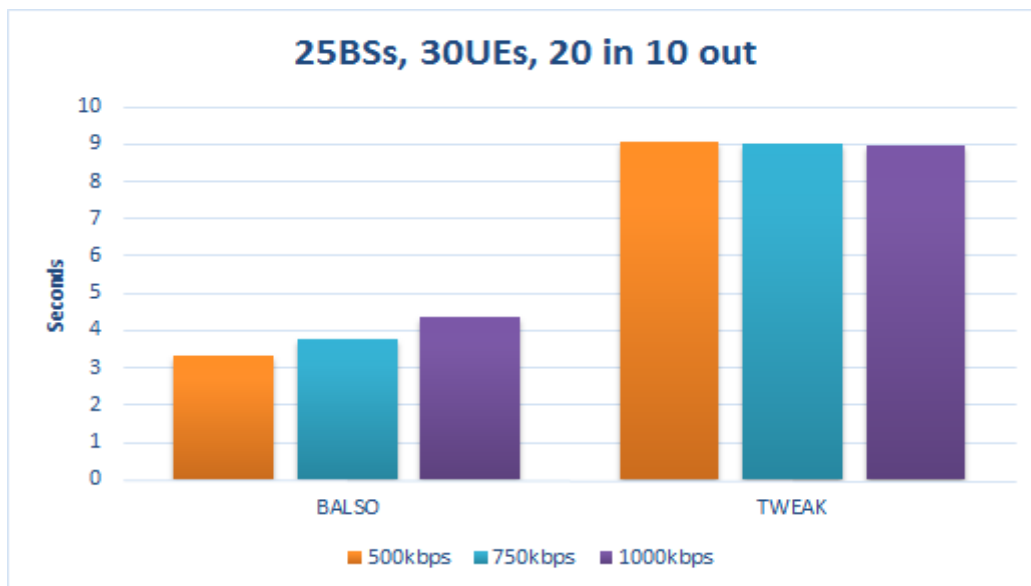
Σχήμα 3.5.19 Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 2.1

Για το σενάριο 2.1, παρατηρείται μια μικρή υπεροχή του BALS0 στη κατανάλωση ενέργειας και μια ξεκάθαρη υπεροχή στη ταχύτητα, κάτι που οφείλεται στη διαφορά της αρχιτεκτονικής των δυο αλγορίθμων, καθώς ο TWEAK έχει επιπλέον κριτήρια ποιότητας για την εξυπηρέτηση των χρηστών (κατώφλι χρησιμοποίησης πόρων, επίπεδα παρεμβολής στο σύστημα) τα οποία τον οδηγούν στην ενεργοποίηση περισσότερων σταθμών σε σχέση με το BALS0.





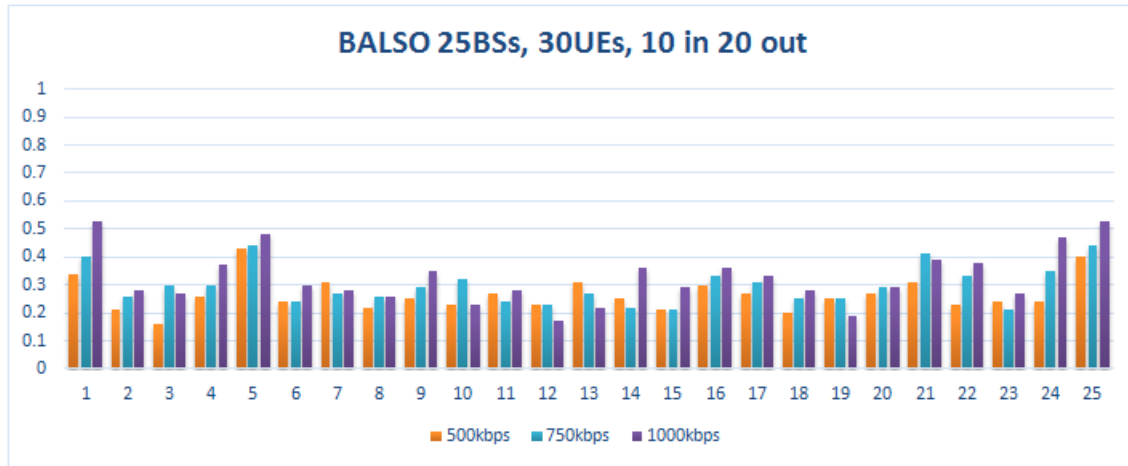
Σχήμα 3.5.20 Ενερειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 2.2



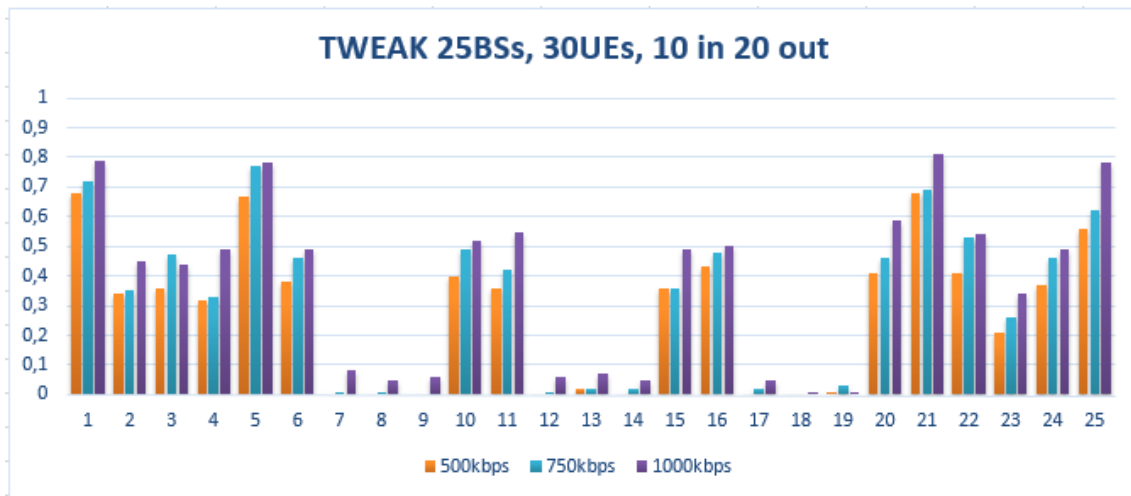
Σχήμα 3.5.21 Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 2.2

Για το σενάριο 2.2 μεγαλώνει η ψαλίδα στην κατανάλωση υπέρ του BALS0, καθώς όπως έχει διατυπωθεί προηγουμένως, ο TWEAK χρησιμοποιεί πολύ λίγο τους εσωτερικούς σταθμούς βάσης του συστήματος για τη διατήρηση της παρεμβολής σε χαμηλό επίπεδο, έτσι υστερεί σε σενάρια με υπερφόρτωση της εσωτερικής περιοχής έναντι του BALS0. Στο τομέα της απόκρισης και οι δυο αλγόριθμοι ωφελούνται από τη διάταξη των χρηστών στην εσωτερική περιοχή, καθώς απαιτούνται λιγότεροι υπολογισμοί για την εξυπηρέτησή τους.

Στον τομέα της χρησιμοποίησης των πόρων, ο BALSΟ στην περίπτωση του υποσεναρίου 1, μοιράζει το φορτίο σχετικά ισοδύναμα στους σταθμούς βάσης. Ο TWEAK αντιθέτως χρησιμοποιεί κυρίως τους ακριανούς σταθμούς (1,5,21,25) και λιγότερο τους υπόλοιπους σταθμούς της εξωτερικής περιοχής του πλέγματος (10,11,15,16,20,22), ενώ δεν χρησιμοποιεί σχεδόν καθόλου τους σταθμούς βάσης που βρίσκονται στην εσωτερική περιοχή του grid.

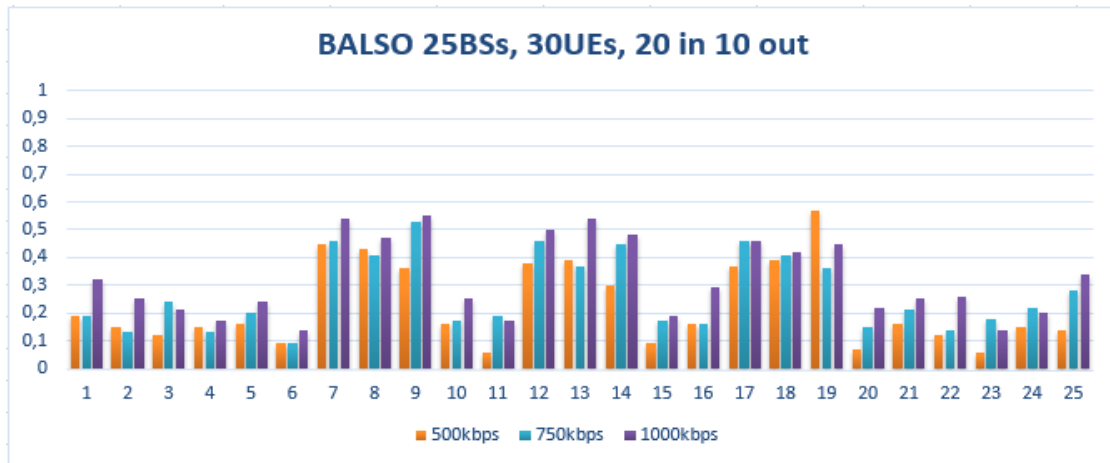


Σχήμα 3.5.22 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSΟ για το σενάριο 2.1

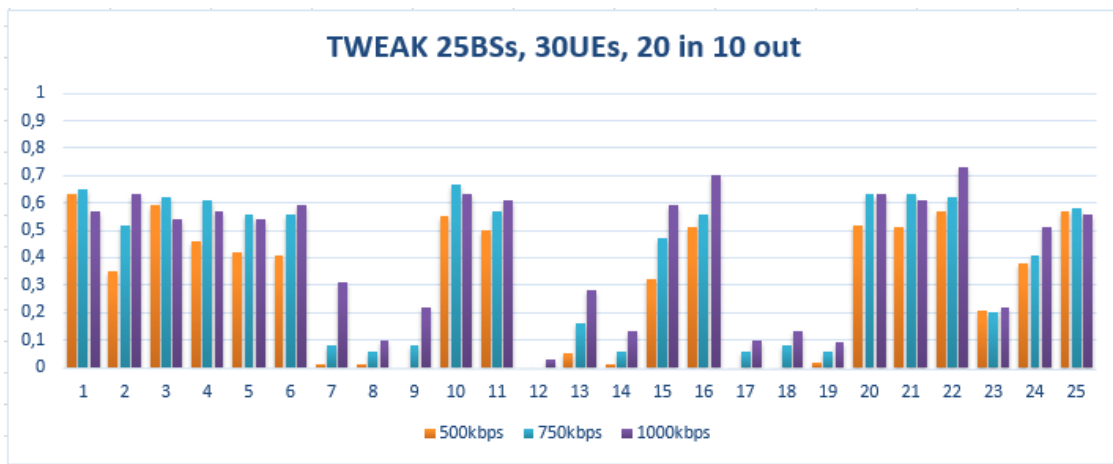


Σχήμα 3.5.23 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 2.1

Για το υποσενάριο 2, η αύξηση των χρηστών στην εσωτερική περιοχή του πλέγματος επιφέρει αλλαγές στο μοτίβο ενεργοποίησης σταθμών του BALSΟ, καθώς μεγαλώνει αρκετά το ποσοστό ενεργοποίησης των 9 εσωτερικών σταθμών. Για τον TWEAK, συνεχίζει η κατά κόρον χρησιμοποίηση των εξωτερικών σταθμών, ενώ λόγω του αυξημένου φορτίου ανεβαίνει και το ποσοστό ενεργοποίησης των εσωτερικών σταθμών, οι οποίοι λειτουργούν συμπληρωματικά σε περιπτώσεις όπου η ζήτηση δεν καλύπτεται από τους ακριανούς.



Σχήμα 3.5.24 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSO για το σενάριο 2.2



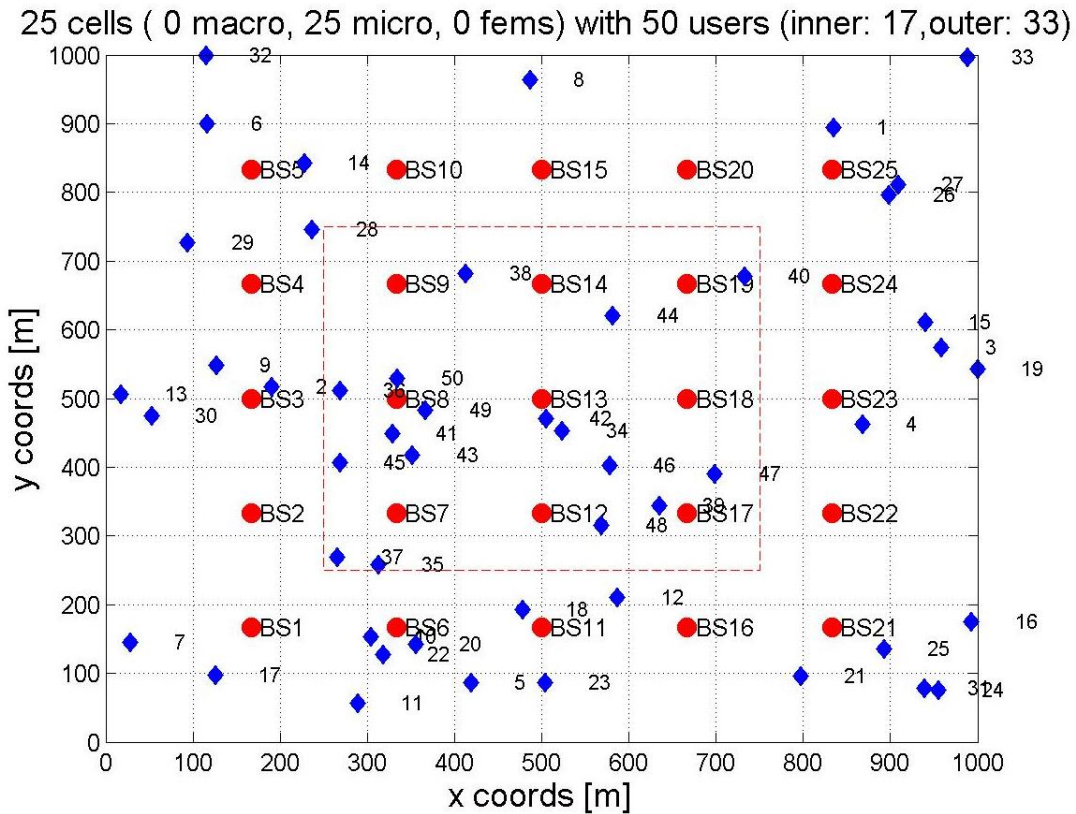
Σχήμα 3.5.25 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 2.2

Κατά τη σύγκριση των σχημάτων BALSO, είναι εμφανές ότι συνεχίζεται το πρότυπο του σεναρίου 1. Στη περίπτωση όπου οι περισσότεροι χρήστες βρίσκονται στην εξωτερική περιοχή, ο BALSO μοιράζει το φορτίο με αρκετά ομοιόμορφο τρόπο στους 25 σταθμούς, ενώ όταν φορτωθεί η κεντρική περιοχή, παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση της χρησιμοποίησης των εσωτερικών σταθμών με παράλληλη μείωση της χρησιμοποίησης των υπόλοιπων. Για τα σχήματα του TWEAK, η χρησιμοποίηση των εσωτερικών σταθμών παραμένει πολύ χαμηλά ανεξαρτήτως της κατανομής του φορτίου, αλλά όσο μεγαλώνει η ζήτηση για bitrate, τόσο ο αλγόριθμος αναγκάζεται να τους ενεργοποιεί, παρόλο που αυτό επιφέρει αύξηση της στάθμης παρεμβολής στο σύστημα.

**Σενάριο 3 (25 BSs, 50 users)**

Περίπτωση 1: 17 χρήστες στη εσωτερική περιοχή( [250,250] - [750,750] ) και 33 στην εξωτερική.

Παρακάτω παρατίθεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα πλέγματος για την συγκεκριμένη περίπτωση τοποθέτησης των χρηστών.



Σχήμα 3.5.26 Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 3.1 (17 UEs in – 33 UEs out)

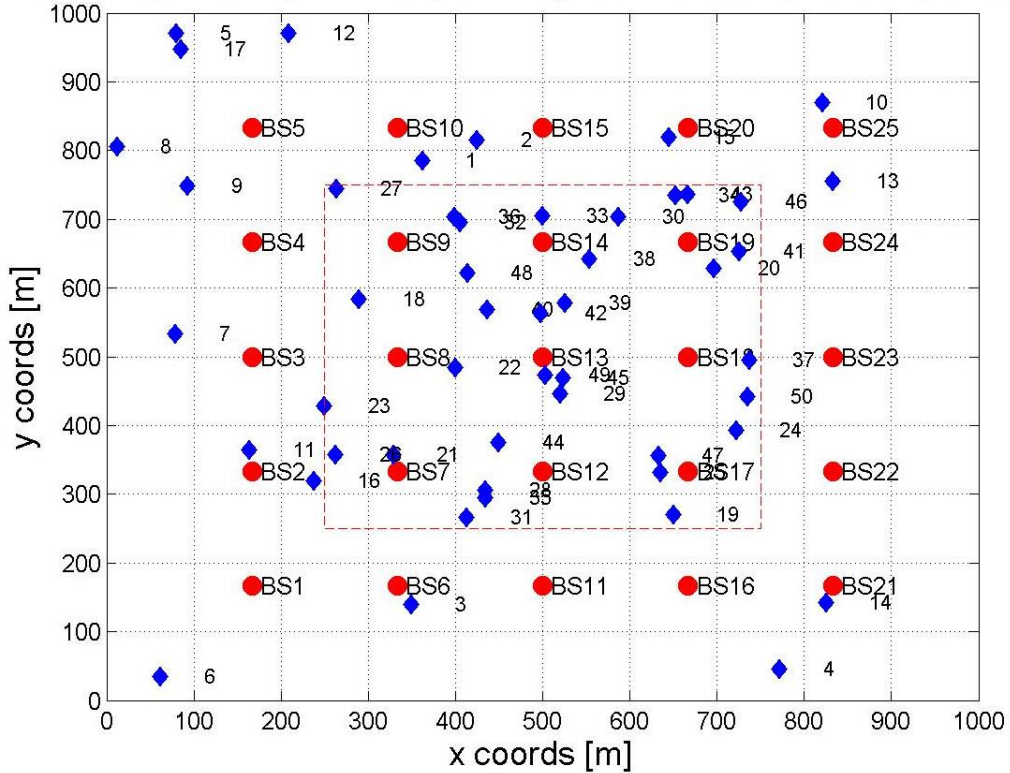
	BALSO		TWEAK	
	Mean values (sec)	Mean values (W)	Mean values (sec)	Mean values (W)
500kbps	7.05	1046.46	13.76	1095.43
750kbps	8.06	1191.08	13.37	1305.59
1000kbps	8.78	1370.86	13.21	1497.76

Σχήμα 3.5.27 Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 3.1

Περίπτωση 2: 33 χρήστες στη εσωτερική περιοχή( [250,250] - [750,750] ) και 17 στην εξωτερική.

Παρακάτω παρατίθεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα πλέγματος για την συγκεκριμένη περίπτωση τοποθέτησης των χρηστών.

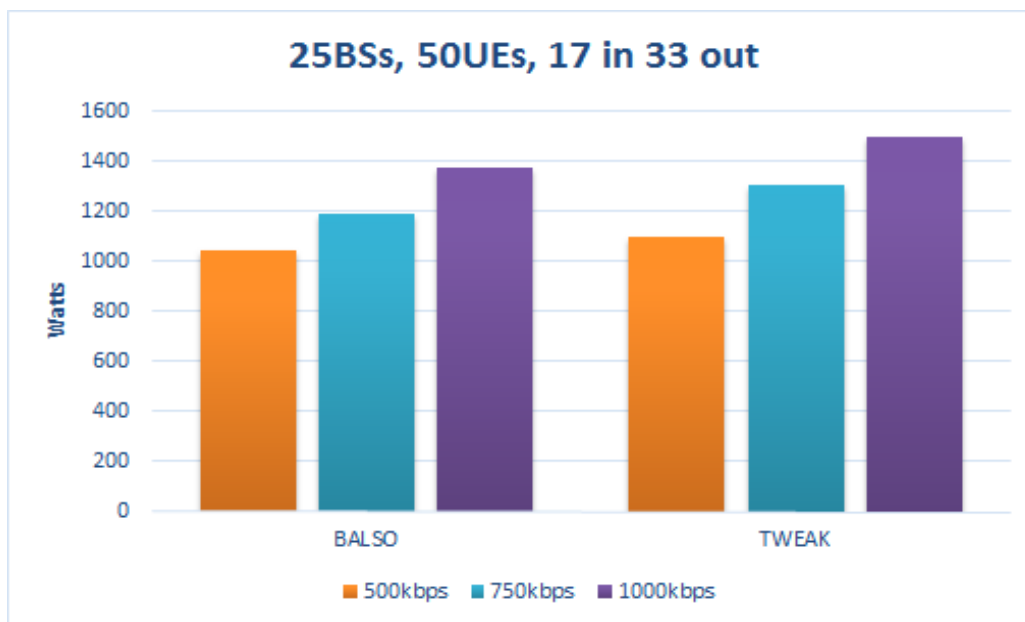
25 cells ( 0 macro, 25 micro, 0 fems) with 50 users (inner: 33,outer: 17)



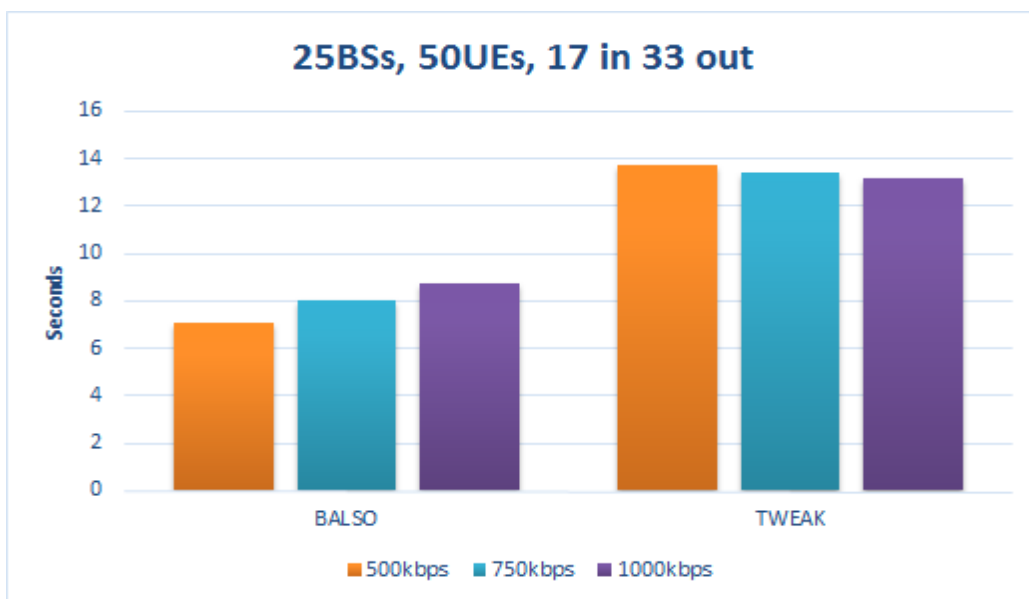
Σχήμα 3.5.28 Ενδεικτικό πλέγμα για το σενάριο 3.2 (33 UEs in – 17 UEs out)

	BALSO		TWEAK	
	Mean values (sec)	Mean values (W)	Mean values (sec)	Mean values (W)
500kbps	6.69	986.04	15.17	1389.96
750kbps	7.77	1160.16	14.74	1408.63
1000kbps	8.65	1318.52	13.68	1561.09

Σχήμα 3.5.29 Πίνακας αποτελεσμάτων για το σενάριο 3.2

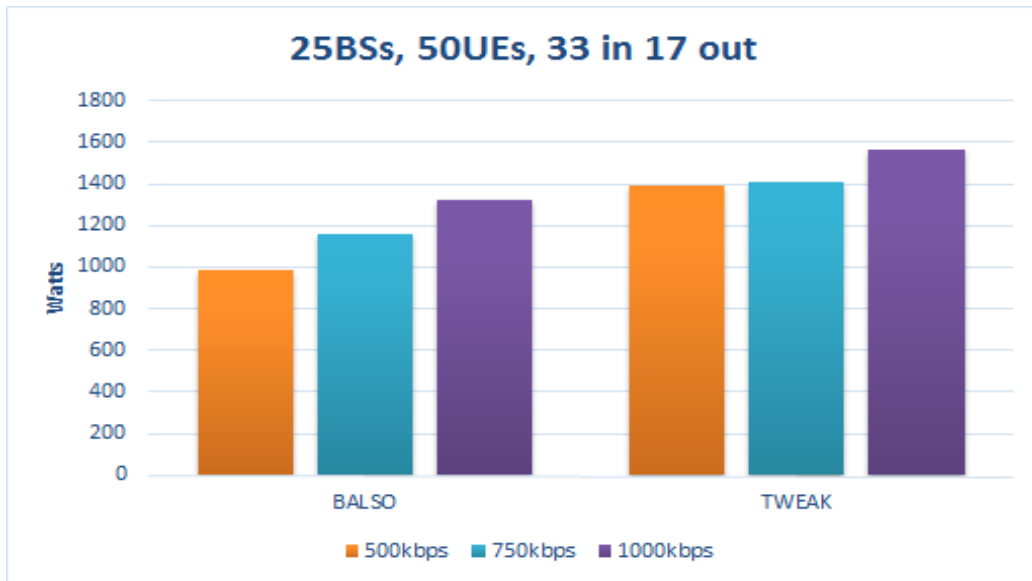


Σχήμα 3.5.30 Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 3.1

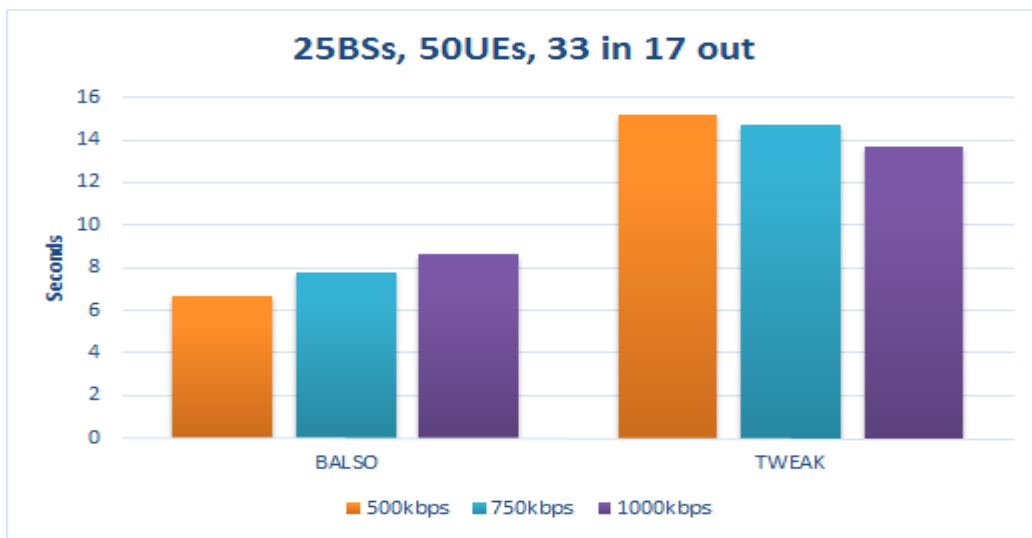


Σχήμα 3.5.31 Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 3.1

Για το σενάριο 3.1, ο BALS0 υπερτερεί και στις δυο μετρικές της κατανάλωσης ενέργειας και της απόκρισης. Αυτό οφείλεται στην αρχιτεκτονική του, η οποία του επιτρέπει να χρησιμοποιεί λιγότερους σταθμούς από τον TWEAK για τη λύση του σεναρίου, μειώνοντας τόσο το κόστος ενεργοποίησης των σταθμών αλλά και τον όγκο των υπολογισμών για την ανάθεση των πόρων του συστήματος στους χρήστες.



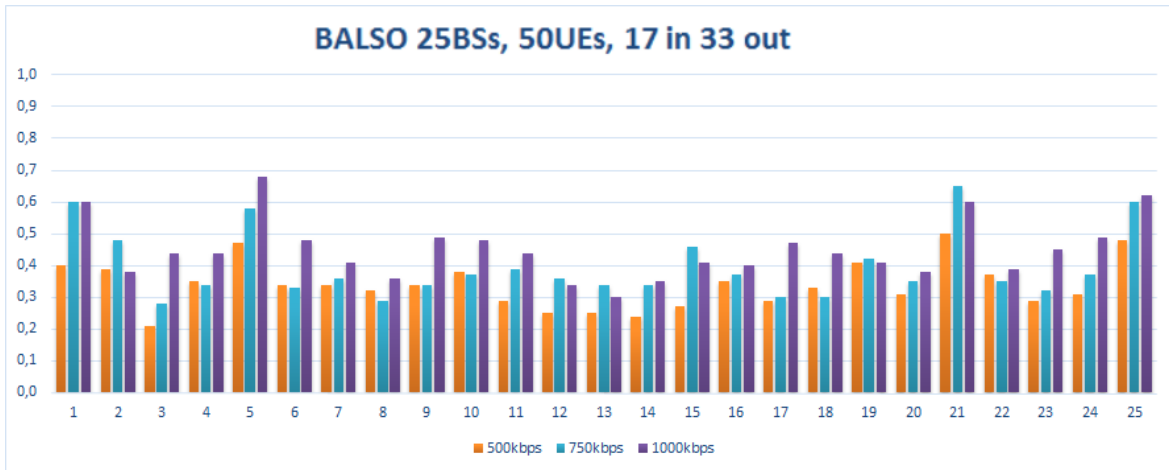
Σχήμα 3.5.32 Ενεργειακή απαίτηση των αλγορίθμων για το σενάριο 3.2



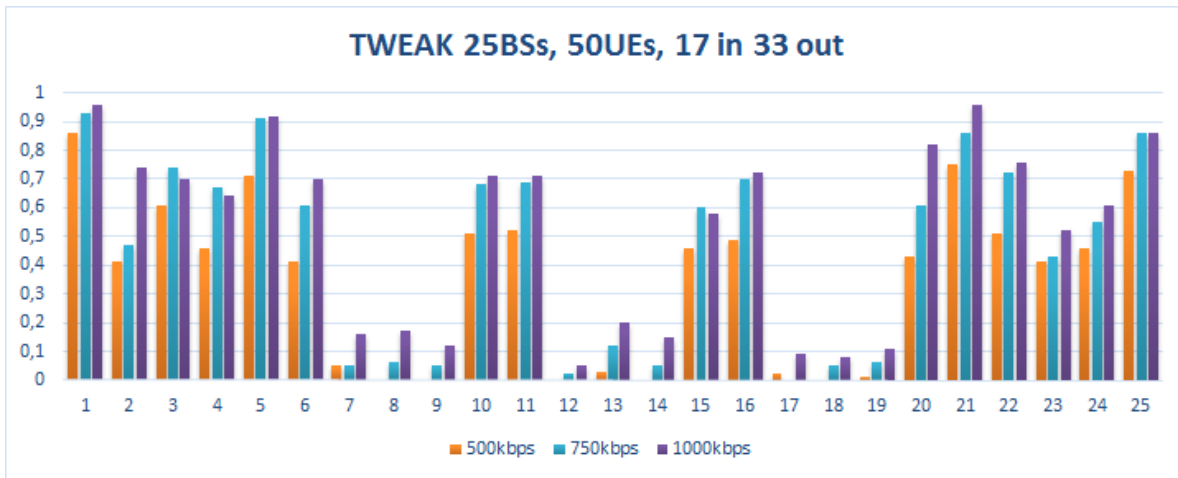
Σχήμα 3.5.33 Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων για το σενάριο 3.2

Για το σενάριο 3.2, το φαινόμενο της περίπτωσης 3.1 ενισχύεται υπέρ του BALS0, καθώς η φόρτωση της εσωτερικής περιοχής του πλέγματος αναγκάζει τους αλγόριθμους να βασίζονται περισσότερο στους εσωτερικούς σταθμούς. Μάλιστα, στις περιπτώσεις bitrate 750kbps, 1000kbps παρατηρείται και το υψηλότερο επίπεδο ενεργοποίησής τους για τον TWEAK (σχήμα 3.5.37), κάτι που δηλώνει ότι το σενάριο με τους 50 χρήστες είναι αρκετά βαρύ και δε μπορεί να εξυπηρετηθεί με τους ακριανούς μόνο σταθμούς.

Στον τομέα της χρησιμοποίησης των πόρων, ο BALSΟ χρησιμοποιεί όλους τους σταθμούς σε μεγάλο ποσοστό, αλλά παρατηρείται μια ξεκάθαρη υπεροχή των τεσσάρων γωνιακών σταθμών. Αυτή η συμπεριφορά συμβαίνει μόνο στα δυο βαρύτερα σενάρια, όπου η εξωτερική περιοχή περιέχει 33 χρήστες, πολλοί εκ των οποίων μπορεί να βρεθούν σε χώρο εξυπηρέτησης των γωνιακών σταθμών. Ο TWEAK αντιθέτως χρησιμοποιεί κυρίως τους ακριανούς σταθμούς (1,5,21,25) και λιγότερο τους υπόλοιπους σταθμούς της εξωτερικής περιοχής του πλέγματος (10,11,15,16,20,22), ενώ χρησιμοποιεί ελάχιστα τους σταθμούς βάσης που βρίσκονται στην εσωτερική περιοχή του grid.



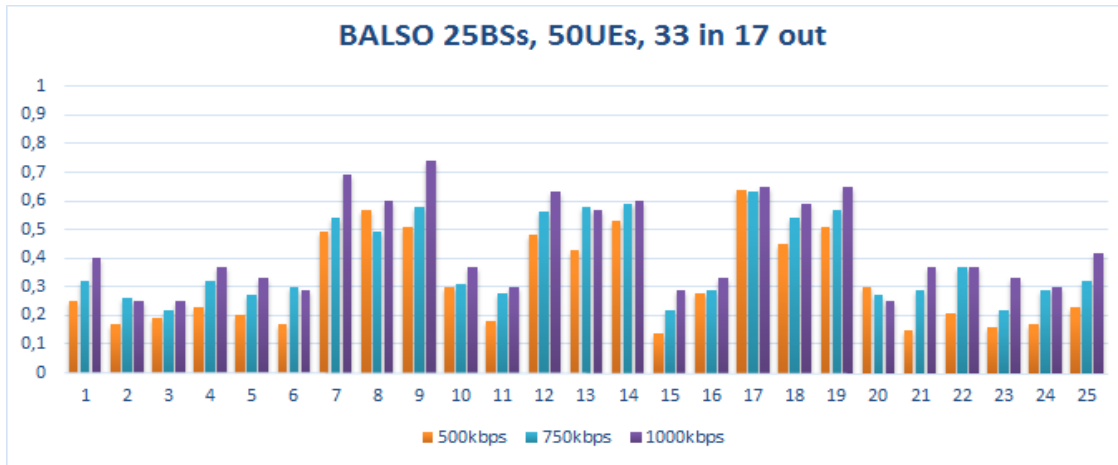
Σχήμα 3.5.34 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSΟ για το σενάριο 3.1



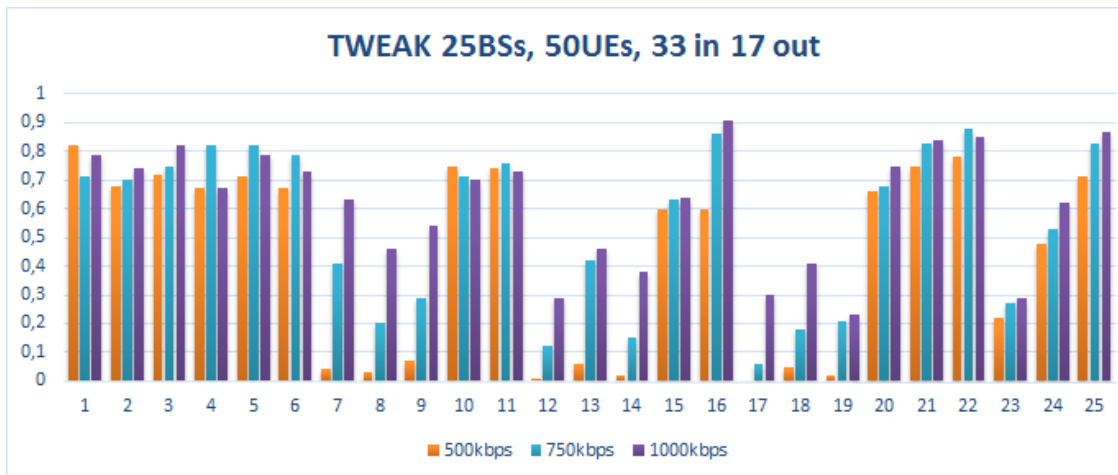
Σχήμα 3.5.35 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 3.1

Για το υποσενάριο 2, η αύξηση των χρηστών στην εσωτερική περιοχή του πλέγματος αλλάζει το διάγραμμα ενεργοποίησης του BALSΟ, καθώς μεγαλώνει αρκετά το ποσοστό ενεργοποίησης των 9 εσωτερικών σταθμών. Για τον TWEAK, συνεχίζεται η χρησιμοποίηση των εξωτερικών σταθμών, ενώ λόγω του αυξημένου φορτίου στην εσωτερική περιοχή ανεβαίνει και η ενεργοποίηση των εσωτερικών σταθμών, οι οποίοι ενεργοποιούνται προκειμένου να εξυπηρετηθεί η κίνηση και στην εσωτερική περιοχή.





Σχήμα 3.5.36 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον BALSO για το σενάριο 3.2



Σχήμα 3.5.37 Ποσοστό ενεργοποίησης των σταθμών βάσης για τον TWEAK για το σενάριο 3.2

Κατά τη σύγκριση των σχημάτων BALSO, παρατηρείται σε γενικές γραμμές παρόμοια συμπεριφορά με τα δυο προηγούμενα σενάρια, με τη διαφορά της αυξημένης χρησιμοποίησης των γωνιακών σταθμών για το υποσενάριο 1. Για τα σχήματα του TWEAK, στη πρώτη περίπτωση παρατηρείται μεγάλη χρησιμοποίηση των γωνιακών σταθμών η οποία φτάνει στο 90%, ενώ η χρησιμοποίηση των εσωτερικών περιορίζεται στο διάστημα 0% - 20%. Για τη δεύτερη περίπτωση όπου φορτώνεται η εσωτερική περιοχή, είναι εμφανές ότι οι εξωτερικοί σταθμοί δε μπορούν να εξυπηρετήσουν τα δυο βαρύτερα σετ bitrate και έτσι παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση στη χρησιμοποίηση των εσωτερικών σταθμών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. The Wireless Network Evolution, *C.-K. Toh*, Apr 12, 2002  
<http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=26330&seqNum=1>
2. 4G LTE: Architecture and Security Concerns  
<http://www.secforce.com/blog/2014/03/4g-lte-architecture-and-security-concerns>
3. Mobile WiMAX, *Jarno Pinola, Kostas Pentikousis*, VTT Technical Research Centre of Finland  
[http://www.cisco.com/web/about/ac123/ac147/archived\\_issues/ipj\\_11-2/112\\_wimax.html](http://www.cisco.com/web/about/ac123/ac147/archived_issues/ipj_11-2/112_wimax.html)
4. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2009–2014  
[http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/abdul-kafi1/docs/white\\_paper\\_c11-481360.pdf](http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/abdul-kafi1/docs/white_paper_c11-481360.pdf)
5. Economic and ecological impact of ICT, *Earth Project, Deliverable 2.1*  
[https://bscw.ict-earth.eu/pub/bscw.cgi/d38532/EARTH\\_WP2\\_D2.1\\_v2.pdf](https://bscw.ict-earth.eu/pub/bscw.cgi/d38532/EARTH_WP2_D2.1_v2.pdf)
6. Energy Aware Radio and network technologies Deliverables  
<https://www.ict-earth.eu/publications/deliverables/deliverables.html>
7. Green Communications: An Emerging Challenge for Mobile Broadband Communication Networks, *E. Calvanese Strinati, A. De Domenico, L. Herault*, March 2011  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.6321&rep=rep1&type=pdf>
8. Towards green wireless access networks, *Tao Chen, Honggang Zhang, Zhifeng Zhao, Xianfu Chen*, *IEEE Wireless Communications*, August 2010  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5684737&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fexpl%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D5684737](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5684737&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fexpl%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5684737)
9. EARTH Project: Final report on green radio technologies D4.3  
[https://bscw.ict-earth.eu/pub/bscw.cgi/d70472/EARTH\\_WP4\\_D4.3.pdf](https://bscw.ict-earth.eu/pub/bscw.cgi/d70472/EARTH_WP4_D4.3.pdf)
10. A scalable low-power digital communication network architecture and an automated design path for controlling the analog/RF part of SDR transceivers, *W. Eberle and M. Goffioul*  
*Conference on Design, Automation and Test in Europe*, Nov. 2008  
<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1403548>
11. LTE-Advanced, *Jeanette Wannstrom 3GPP*, June 2013  
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>

12. WINNER Phase II Model Deliverables  
[http://www.ist-winner.org/phase\\_2\\_model.html](http://www.ist-winner.org/phase_2_model.html)
13. WINNER II Channel Models, Part1, *September 2007*  
<http://www.signal.uu.se/Publications/WINNER/WIN2D112.pdf>
14. Energy Efficient Base Station Placement and Operation in Mobile Networks, *Dimitris Komnakos, Aggelos Rouskas and Antonis Gotsis, Department of Digital Systems University of Piraeus*  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6582788&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F6582749%2F6582750%2F06582788.pdf%3Farnumber%3D6582788>
15. Mobile Networks Planning for Minimum Power Consumption, *Dimitris Komnakos, Aggelos Rouskas and Revekka Trigka, Department of Digital Systems University of Piraeus*  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6582788&15.%20Mobile%20Networks%20Planning%20for%20Minimum%20Power%20Consumptionurl=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F6582749%2F6582750%2F06582788.pdf%3Farnumber%3D6582788>
16. Energy efficiency definition, *Green Communication in 4g Wireless Systems, Shahid Mumtaz (Editor), Jonathan Rodriguez (Editor)*  
<https://books.google.gr/books?id=tjWYWsKNwLoC&pg=PA12#v=onepage&q&f=false>
17. Network energy saving technologies for green wireless access networks, *Tao Chen, Yang Yang, Honggang Zhang, Haesik Kim, Kari Horneman, IEEE Wireless Communications, October 2011*  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6056690&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F7742%2F6056680%2F06056690.pdf%3Farnumber%3D6056690>