



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Διαχείριση Σταθμών Βάσης για Εξοικονόμηση Ενέργειας σε Κινητά Δίκτυα Πρόσβασης

Κοκκινογένης Στέφανος, Α.Ε.Μ.: 71

Υπεύθυνοι καθηγητές:
Δρ. Κουτίτας Γεώργιος
Δρ. Λούτα Μαλαματή

Κοζάνη, Ιούνιος 2011

Περίληψη

Αυτή η διπλωματική εργασία μελετάει την ελαχιστοποίηση της σπαταλούμενης κατανάλωσης ενέργειας που παράγεται από ένα κινητό δίκτυο πρόσβασης κατά την διάρκεια μιας ημέρας. Τη σημερινή εποχή έχει διαπιστωθεί ότι τα κινητά δίκτυα πρόσβασης σπαταλούν ενέργεια κατά την λειτουργία τους σε χαμηλό έως μέτριο φορτίο κίνησης. Αυτό συμβαίνει διότι οι φορείς που παρέχουν κινητές υπηρεσίες αναπτύσσουν ένα δίκτυο έτσι ώστε να εξυπηρετεί την κίνηση στις ώρες αιχμής. Γι' αυτό το λόγο τώρα οι φορείς αυτοί ψάχνουν τρόπους για την βέλτιστη λειτουργία του εξοπλισμού τους. Για την μελέτη της διπλωματικής εργασίας αναπτύξαμε ένα αλγοριθμικό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει τα κινητά δίκτυα πρόσβασης με βάση την τεχνολογία UMTS. Σε αυτό το μοντέλο εισάγαμε μια μέθοδο που προσαρμόζει την ισχύ εκπομπής ενός σταθμού βάσης σύμφωνα με το φορτίο κίνησης που εξυπηρετεί, περιορισμούς που αποφασίζουν την δέσμευση ενός χρήστη σε ένα σταθμό βάσης ή όχι, και μαθηματικά μοντέλα εξισώσεων για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα σταθμό βάσης. Για την επίτευξη του αντικειμενικού στόχου της διπλωματικής έγινε διαχείριση των Micro σταθμών βάσης ενός κινητού δικτύου πρόσβασης. Για την διαχείριση τους χρησιμοποιήσαμε τους σταθμούς βάσης δυναμικά και στατικά. Η δυναμική μέθοδος αποφασίζει ποιος θα παραμείνει ενεργός, αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής του, ή σε κατάσταση ύπνου ανάλογα με το φορτίο κίνησης του. Από την άλλη μεριά η στατική μέθοδος θεωρεί ότι ένας προκαθορισμένος αριθμός σταθμών βάσης παραμένει ενεργός, αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής τους, με στόχο την κάλυψη όλης της περιοχής. Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει χώρος για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας χωρίς να περιορίζονται οι απαιτήσεις των χρηστών. Η εξοικονόμηση ενέργειας που σημειώθηκε είναι της τάξης των 20% καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Αυτό που καταφέραμε όμως σε αυτή τη διπλωματική εργασία είναι ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων για την επιπλέον μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την διάρκεια μιας ημέρας. Το συμπέρασμα που πάρθηκε είναι ότι, χρησιμοποιώντας την στατική διαχείριση σε ορισμένους σταθμούς βάσης για πλήρη κάλυψη της περιοχής και την δυναμική στους υπόλοιπους, χωρίς την αύξηση της ισχύς εκπομπής τους, είναι δυνατόν να ενισχύσουμε την χωρητικότητα της πρώτης σε χρονικές περιόδους που αυτή δεν έχει την δυνατότητα να επιτύχει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης 30% κατά την διάρκεια μιας ημέρας με την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών να παραμένει κάτω από το 1%.

Λέξεις κλειδιά

UMTS δίκτυο πρόσβασης, Σταθμός βάσης, Κατανάλωση ενέργειας, Μέθοδος διαχείρισης σταθμών βάσης, Εξοικονόμηση ενέργειας, Διακοπή λειτουργίας χρηστών

Ευχαριστίες

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κο. Γεώργιο Κουτίτα, για την καθοδήγηση του σε κάθε φάση της δημιουργίας της, και για τις συζητήσεις πάνω σε θέματα που την αφορούν για την ανάπτυξή και εκπόνησή της. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Μαλαματή Λούτα, υπεύθυνη για την ανάληψη της εργασίας, για την συνδρομή της στην εκπόνηση της. Θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου για την διαρκή υποστήριξή τους, που επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου. Θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κοπέλα μου την Samantha που έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη ζωή μου αλλά και στις σπουδές μου, με την αγάπη, την συμπαράσταση και το κουράγιο με τα οποία με έχει γεμίσει. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους μου, τους οποίους είχα την τύχη να γνωρίσω κατά την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων, για τα όμορφα χρόνια που περάσαμε μαζί. Τέλος, θέλω να πω ευχαριστώ σε όλους τους καθηγητές που γνώρισα κατά την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων, για την εκπαίδευση και τις συμβουλές με τις οποίες με παρείχαν.

Κοκκινογένης Στέφανος του Γεωργίου

Κοζάνη, 30η Ιουνίου 2011

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Ευχαριστίες.....	5
Περιεχόμενα.....	7
Λίστα σχημάτων.....	10
Λίστα πινάκων.....	13
Λίστα συντομογραφιών.....	14
1. Εισαγωγή.....	16
1.1. Κίνητρο για εξοικονόμηση ενέργειας.....	16
1.2. Πλάνο εργασίας.....	17
2. Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών.....	19
2.1. Εισαγωγή στα κυψελωτά δίκτυα.....	19
2.1.1. Αρχιτεκτονική κυψελωτών δικτυακών συστημάτων.....	20
2.1.2. Κάλυψη και χωρητικότητα.....	23
2.1.2.1. Υπολογισμός χωρητικότητας σε CDMA.....	24
2.1.2.2. Υπολογισμός χωρητικότητας σε OFDMA.....	25
2.2. Παρεμβολές στα κυψελωτά δίκτυα.....	26
2.2.1. Μοντελοποίηση παρεμβολών.....	29
2.2.1.1. CDMA σύστημα.....	30
2.2.1.2. OFDMA σύστημα.....	30
3. Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών.....	32
3.1. Κατάσταση ύπνου σε σταθμό βάσης & Προσαρμογή φυσικών παραμέτρων.....	32
3.1.1. Στατική διαχείριση σταθμών βάσης.....	32
3.1.2. Δυναμική διαχείριση σταθμών βάσης.....	33
3.2. Υβριδικές διατάξεις δικτύων για ενεργειακή αποδοτικότητα.....	34
3.3. Πράσινες τεχνολογίες υλικού για κινητά δίκτυα πρόσβασης.....	35
3.4. Συνεργασία παροχέων κινητών δικτύων πρόσβασης.....	36
3.5. Πράσινα κέντρα δεδομένων.....	37
3.6. Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε σταθμούς βάσης.....	39
3.6.1. Ηλιακή ενέργεια για σταθμούς βάσης.....	39
3.6.2. Αιολική ενέργεια για σταθμούς βάσης.....	39
3.6.3. Περιγραφή συστήματος.....	40
3.7. Άλλες τεχνικές.....	40

3.7.1.	Συνεργασία σταθμών βάσης.....	40
3.7.2.	Σταθμοί αναμετάδοσης.....	41
3.7.3.	Beamforming.....	42
3.7.4.	Εξάρτηση της κατανάλωσης ενέργειας από το φορτίο κίνησης.....	42
4.	Μαθηματικό και Θεωρητικό Υπόβαθρο του Αλγοριθμικού Μοντέλου.....	43
4.1.	Εισαγωγή.....	43
4.2.	Διάταξη δικτύου.....	43
4.3.	Εξίσωση ποιότητας της ζεύξης.....	44
4.4.	Δέσμευση ισχύος στο Downlink.....	45
4.5.	Εκτίμηση χωρητικότητας.....	46
4.6.	Ευαισθησία του δέκτη.....	46
4.7.	Μέγιστο μονοπάτι απωλειών.....	47
4.8.	Μοντέλο διάδοσης.....	47
4.9.	Μέγιστη κάλυψη κυψέλης.....	51
4.10.	Αριθμητική εκτίμηση μέγιστης χωρητικότητας κυψέλης.....	52
4.10.1.	Συμπεράσματα.....	54
4.11.	Διεργασίες μοντέλου.....	55
4.11.1.	Σύστημα σερβιρίσματος Best server.....	55
4.11.2.	Περιορισμός των ράδιο-πόρων του συστήματος.....	55
4.11.3.	Επαναληπτικός αλγόριθμος προσαρμογής ισχύος.....	56
4.12.	Λειτουργία και περιγραφή μοντέλου με poisson αφίξεις.....	58
5.	Κατανάλωση Ενέργειας Σταθμών Βάσης.....	60
5.1.	Εξοπλισμός & περιεχόμενα σταθμών βάσης.....	60
5.2.	Αναλυτικά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας.....	62
5.3.	Απλά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας.....	64
5.4.	Σύγκριση μοντέλων.....	66
6.	Ζητήματα Κατανάλωσης Ενέργειας σε Διάφορες Τοπολογίες Κινητών Δικτύων Πρόσβασης.....	69
6.1.	Μεθοδολογία και υποθέσεις.....	69
6.2.	Υβριδικές τοπολογίες.....	69
6.2.1.	Μέτρο ενεργειακής αποδοτικότητας.....	71
6.2.2.	Κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της χωρητικότητας του δικτύου.....	72
6.2.2.1.	Κατανομή κινητών χρηστών με χωρική διακύμανση.....	72
6.2.2.2.	Κατανομή κινητών χρηστών με χωρική και χρονική διακύμανση.....	74
6.3.	Ομοιογενής τοπολογίες σταθμών βάσης τύπου Micro cell.....	76

6.3.1.	Μέτρο ενεργειακής αποδοτικότητας.....	77
6.3.2.	Κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της χωρητικότητας του δικτύου.....	79
6.3.2.1.	Κατανομή κινητών χρηστών με χωρική διακύμανση.....	79
6.3.2.2.	Κατανομή κινητών χρηστών με χωρική και χρονική διακύμανση.....	82
6.4.	Σύνοψη αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.....	83
7.	Εξοικονόμηση Ενέργειας σε Κινητά Δίκτυα Πρόσβασης.....	85
7.1.	Διεργασία διαχείρισης των σταθμών βάσης για εξοικονόμησης ενέργειας.....	85
7.2.	Δυναμική διαχείριση των σταθμών βάσης.....	87
7.2.1.	Υβριδική τοπολογία με Macro και Micro BSs.....	87
7.2.1.1.	Λειτουργία των σταθμών βάσης.....	87
7.2.1.2.	Αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας.....	88
7.2.2.	Ομοιογενής τοπολογία με Micro BSs.....	90
7.2.2.1.	Λειτουργία των σταθμών βάσης.....	90
7.2.2.2.	Αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας.....	91
7.3.	Στατική διαχείριση σταθμών βάσης ομοιογενούς τοπολογίας με Micro BSs.....	94
7.3.1.	Το σχήμα απενεργοποίησης των σταθμών βάσης.....	94
7.3.2.	Επιδόσεις του δικτύου και εξοικονόμηση ενέργειας.....	95
7.4.	Υβριδική μέθοδος για την διαχείριση σταθμών βάσης ομοιογενούς τοπολογίας με Micro BSs.....	97
7.4.1.	Λειτουργία και χαρακτηριστικά του δικτύου.....	97
7.4.1.	Εξοικονόμηση ενέργειας και επιδόσεις.....	98
7.5.	Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και λειτουργικό κόστος των σταθμών βάσης.....	101
7.6.	Σύνοψη αποτελεσμάτων και συγκρίσεις.....	102
8.	Σύνοψη, συμπεράσματα και αποτελέσματα.....	104
9.	Αναφορές.....	107

Λίστα σχημάτων

Σχ. 2.1.	Απλοποιημένη αρχιτεκτονική του τηλεπικοινωνιακού συστήματος GSM.....	21
Σχ. 2.2.	Απλοποιημένη αρχιτεκτονική του τηλεπικοινωνιακού συστήματος UMTS.....	22
Σχ. 2.3.	Απλοποιημένη αρχιτεκτονική του τηλεπικοινωνιακού συστήματος LTE.....	22
Σχ. 2.4.	Υπολογισμός χωρητικότητας OFDMA.....	26
Σχ. 2.5.	Παρεμβολές στο DL. Με διακεκομμένες γραμμές φαίνονται οι εξωτερικές παρεμβολές και με συνεχής οι εσωτερικές.....	27
Σχ. 2.6.	Παράγοντας επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας σε FDMA/TDMA και CDMA συστήματα.....	28
Σχ. 2.7.	Καθυστέρηση διάδοσης και περιοχή ISI.....	29
Σχ. 3.1.	Στατική απενεργοποίηση σταθμών βάσης σε εξαγωνική διάταξη δικτύου.....	32
Σχ. 3.2.	Σχέση μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και διακοπής λειτουργίας.....	34
Σχ. 3.3.	Αποδοτικότητα φάσματος ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ως συνάρτηση της απόστασης δυο γειτονικών Macro cell για διάφορες τοπολογίες.....	35
Σχ. 3.4.	Συμπαγής σταθμός βάσης LTE με ψήξη χωρίς κλιματισμό (fanless).....	36
Σχ. 3.5.	Πρότυπο ημερήσιας κίνησης ενός δικτύου A, $f_A(t)$, και περίοδοι κατά τις οποίες είναι δυνατόν να απενεργοποιηθούν τα δίκτυα A και B (μόνο ένα δίκτυο μπορεί να απενεργοποιηθεί κάθε φορά). $\alpha = f_B(t) / f_A(t)$	37
Σχ. 3.6.	Δομή ενός τυπικού κέντρου δεδομένων.....	38
Σχ. 3.7.	Διάγραμμα των σχετικών στοιχείων ενός σταθμού βάσης που τροφοδοτείται με ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Φαίνεται μια περίπτωση εφεύρεσης η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σήμερα.....	40
Σχ. 3.8.	Επέκταση κάλυψης με συνεργαζόμενες μεταδόσεις.....	41
Σχ. 3.9.	Παραδείγματα σεναρίων για εγκατάσταση RSs.....	42
Σχ. 4.1.	Εξαγωνική κυψελωτή διάταξη.....	44
Σχ. 4.2.a.	PL συναρτήσεως της απόστασης μεταξύ MS και BS για Macro cells.....	48
Σχ. 4.2.b.	PL συναρτήσεως της απόστασης μεταξύ MS και BS για Micro cells.....	48
Σχ. 4.3.	Παράμετροι του “COST W-I model”.....	50
Σχ. 4.4. A)	Ομοιόμορφη κατανομή MSs στην κεντρική κυψέλη, B) Κανονική κατανομή MSs στην κεντρική κυψέλη.....	52
Σχ. 4.5.	Ισχύς εκπομπής στα TCH συναρτήσεως του συνόλου των MSs στην κεντρική κυψέλη όταν η κατανομή είναι ομοιόμορφη.....	53
Σχ. 4.6.	Ισχύς εκπομπής στα TCH συναρτήσεως του συνόλου των MSs στην κεντρική κυψέλη όταν η κατανομή είναι κανονική.....	54
Σχ. 4.7.	Τοπολογία δικτύου και κατανομή χρηστών για τα οποία εφαρμόζεται ο επαναληπτικός αλγόριθμος προσαρμογής ισχύος.....	58
Σχ. 4.8.	Προσαρμογή της ισχύος εκπομπής του κάθε σταθμού βάσης στο τρέχων φορτίο κίνησης που εξυπηρετεί ο καθένας μετά από 50 επαναλήψεις.....	58
Σχ. 5.1.	Κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα σταθμό βάσης.....	60
Σχ. 5.2.	Block διάγραμμα της κατανάλωσης ενέργειας και των περιεχομένων ενός BS.....	62
Σχ. 5.3.	Σύγκριση μοντέλων κατανάλωσης ενέργειας για Macro και Micro BSs. Για τους Micro BS έχουμε μέγιστο φορτίο κίνησης (Full Load).....	67
Σχ. 5.4.	Κατανάλωση ενέργειας σε Micro BS για διάφορες τιμές του φορτίου κίνησης.....	68

Σχ. 6.1.	Υβριδικές τοπολογίες με Macro και Micro BSs.....	71
Σχ. 6.2.	Το μέτρο ενεργειακής αποδοτικότητας στα υβριδικά δίκτυα. Χωρική κατανάλωση ενέργειας και ισχύς εκπομπής σε σχέση με την απόσταση δυο γειτονικών Macro BSs.....	72
Σχ. 6.3.	Κατανομή κινητών χρηστών στις υβριδικές τοπολογίες δικτύων.....	73
Σχ. 6.4.	Κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το πλήθος των κινητών χρηστών στις διάφορες τοπολογίες υβριδικών δικτύων.....	74
Σχ. 6.5.	Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ανάλογα με την διάταξη του δικτύου και το πλήθος των κινητών χρηστών.....	74
Σχ. 6.6.	Πρότυπο κίνησης κατά την διάρκεια μιας ημέρας.....	75
Σχ. 6.7.	Συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου και πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών στα δίκτυα υβριδικών τοπολογιών πάνω από το ημερήσιο πρότυπο κίνησης.....	76
Σχ. 6.8.	Τοπολογίες δικτύων με Micro BSs: Α) εξαγωνική διάταξη δικτύου και Β) τετραγωνική διάταξη δικτύου.....	77
Σχ. 6.9.	Ενεργειακή αποδοτικότητα σε δυο διατάξεις δικτύων με Micro BSs: την εξαγωνική και τετραγωνική διάταξη. Χωρική κατανάλωση ενέργειας και ισχύς εκπομπής σε σχέση με την απόσταση δυο γειτονικών BSs.....	79
Σχ. 6.10.	Κατανομή κινητών χρηστών με χωρική διακύμανση σε τοπολογίες δικτύων με Micro BSs: την εξαγωνική και τετραγωνική διάταξη.....	80
Σχ. 6.11.	Κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με το πλήθος των κινητών χρηστών για την κάθε διάταξη δικτύου.....	81
Σχ. 6.12.	Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας κινητών χρηστών για τις διάφορες διατάξεις των Micro BS ανάλογα με το πλήθος των κινητών χρηστών στη κάθε διάταξη.....	82
Σχ. 6.13.	Κατανάλωση ενέργειας των ομοιογενών δικτύων Micro BSs πάνω από το πρότυπο ημερήσιας κίνησης μαζί με την διακοπή λειτουργίας των χρηστών για ίδιο ρυθμό άφιξης και στα δυο δίκτυα.....	83
Σχ. 6.14.	Κατανάλωση ενέργειας των δικτύων με Micro BS τοπολογίες πάνω από το πρότυπο ημερήσιας κίνησης μαζί με την διακοπή λειτουργίας των χρηστών για ίδιο ρυθμό άφιξης και στα δυο δίκτυα.....	83
Σχ. 7.1.	Μελέτη περίπτωσης και απεικόνιση της διεργασίας εξοικονόμησης ενέργειας. Αφορά την λειτουργία των σταθμών βάσης με δυναμική διαχείριση.....	87
Σχ. 7.2.	Δίκτυο υβριδικής τοπολογίας με Micro BSs που μπορούν να λειτουργήσουν σε κατάσταση ύπνου.....	88
Σχ. 7.3.	Κατανάλωση ενέργειας και επίδοση δικτύου όσον αφορά την διακοπή λειτουργίας των χρηστών μετά την εφαρμογή της διεργασίας για εξοικονόμηση ενέργειας.....	90
Σχ. 7.4.	Εξαγωνική τοπολογία δικτύου με Micro BSs που έχουν την δυνατότητα να λειτουργήσουν σε κατάσταση ύπνου αλλά και να αυξήσουν την ακτίνα κάλυψής τους από R σε $2 * R$	91
Σχ. 7.5.	Κατανάλωση ενέργειας και πιθανότητα διακοπής λειτουργίας μετά την εφαρμογή της δυναμικής διαχείρισης των σταθμών βάσης σε ομοιογενή τοπολογία με Micro cells.....	93
Σχ. 7.6.	Αριθμός σταθμών βάσης που παραμένουν σε ενεργή κατάσταση και επίδοση του δικτύου μετά την εφαρμογή της δυναμικής μεθόδου για την εξυπηρέτηση των χρηστών.....	93
Σχ. 7.7.	Στιγμιότυπο του δικτύου μετά από την εφαρμογή της δυναμικής διαχείρισης των σταθμών βάσης.....	94
Σχ. 7.8.	Εξαγωνική τοπολογία δικτύου με Micro BSs με στατική διαχείριση των σταθμών βάσης, όπου ορισμένοι σταθμοί βάσης έχουν την δυνατότητα να αυξήσουν την ακτίνα κάλυψής τους από R σε $2 * R$ ενώ οι υπόλοιποι απενεργοποιούνται τελείως.....	95

Σχ. 7.9.	Δοκιμαστική περίπτωση της στατικής διαχείρισης των σταθμών βάσης για τον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας και την επίδοση του δικτύου.....	96
Σχ. 7.10.	Κατανάλωση ενέργειας και πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών μετά την εφαρμογή της στατικής διαχείρισης των σταθμών βάσης σε ομοιογενές δίκτυο με Micro BSs.....	96
Σχ. 7.11.	Εξαγωνική διάταξη δικτύου με υβριδική διαχείριση των σταθμών βάσης. Ένας καθορισμένος αριθμός σταθμών βάσης μπορεί να λειτουργήσει με αύξηση της ακτίνας κάλυψής του, και οι υπόλοιποι σταθμοί βάσης διαθέτουν δυναμική λειτουργία.....	98
Σχ. 7.12.	Κατανάλωση ενέργειας και πιθανότητα διακοπής λειτουργίας χρηστών μετά την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου για την διαχείριση των σταθμών βάσης σε ομοιογενές δίκτυο με Micro BSs.....	99
Σχ. 7.13.	Αριθμός σταθμών βάσης που παραμένουν σε ενεργή κατάσταση και επίδοση του δικτύου μετά την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου για την εξυπηρέτηση των χρηστών.....	100
Σχ. 7.14.	Στιγμιότυπο δικτύου μετά την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου κατά την διάρκεια φορτίου κίνηση μέτριο-προς-υψηλό.....	100

Λίστα πινάκων

Πιν. 2.1.	Λίστα συντομογραφιών για το GSM.....	21
Πιν. 2.2.	Λίστα συντομογραφιών για το UMTS.....	22
Πιν. 2.3.	Λίστα συντομογραφιών για το LTE.....	23
Πιν. 3.1.	Κατανομή απώλειας ισχύος σε ένα τυπικό κέντρο δεδομένων.....	38
Πιν. 5.1.	Τυπικές τιμές παραμέτρων ενός Macro BS.....	63
Πιν. 5.2.	Τυπικές τιμές παραμέτρων ενός Micro BS.....	64
Πιν. 5.3.	Τιμές παραμέτρων των απλών μοντέλων στην απλούστερη μορφή τους.....	65
Πιν. 5.4.	Τιμές παραμέτρων των απλών μοντέλων στην ειδικευμένη μορφή τους.....	66
Πιν. 5.5.	Τιμές παραμέτρων ενός Micro BS για το απλό μοντέλο στην απλούστερη μορφή...67	
Πιν 6.1.	Παράμετροι καναλιού που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της υβριδικής τοπολογίας δικτύου.....	70
Πιν 6.2.	Παράμετροι καναλιού που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της ομοιογενούς τοπολογίας δικτύου.....	76
Πιν. 7.1.	Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, διάφορα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν και ημερήσια κατανάλωση ενέργειας για τις δυο περιπτώσεις της δυναμικής διαχείρισης των σταθμών βάσης σε υβριδική τοπολογία δικτύου με Macro BSs και Micro BSs.....	89
Πιν. 7.2.	Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, διάφορα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν και ημερήσια κατανάλωση ενέργειας για τις δυο περιπτώσεις της δυναμικής διαχείρισης των σταθμών βάσης ομοιογενούς τοπολογίας Micro BS.....	94
Πιν. 7.3.	Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας και ημερήσια κατανάλωση ενέργειας της στατικής διαχείρισης των σταθμών βάσης ομοιογενούς τοπολογίας Micro BS.....	95
Πιν. 7.4.	Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, διάφορα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν και ημερήσια κατανάλωση ενέργειας για τις δυο περιπτώσεις της υβριδικής διαχείρισης των σταθμών βάσης ομοιογενούς τοπολογίας Micro BS.....	101
Πιν. 7.5.	Συνοπτικός πίνακας με την κατανάλωση ενέργειας, τα λειτουργικά κόστη, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας ανά χρόνο για όλα τα σενάρια.....	101

Λίστα συντομογραφιών

ICT	Information and Communication Technology
OPEX	Operational Expenditure
FDMA	Frequency Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
W-CDMA	Wideband CDMA
LTE	Long Term Evolution
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SD-FDMA	Single Carrier FDMA
SINR	Signal to Interference Noise Ratio
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ISI	InerSymbol Interference
NCPI	Non Critical Physical Infrastructure
CoMP	Coordinated Multi-Point transmission
DL	DownLink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
BS(s)	Base Station(s)
MS(s)	Mobile stations(s)
CCCH	Common Control Channels
DPCH	Dedicated Physical Channels
TCH	Traffic Channels
NF	Noise Figure
PL	Path Loss
PM(s)	Propagation Model(s)
FSPL	Free Space Path Loss
NLoS	Non Line of Site
LoS	Line of Site
MC	Multi Cell
SC	Single Cell
PA(s)	Power Amplifier(s)
DSP	Digital Signal Processing
PSBB	Power Supply and Battery Backup

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Κίνητρο για εξοικονόμηση ενέργειας

Τη σημερινή εποχή μια από τις μεγαλύτερες ανησυχίες παγκοσμίως είναι η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας που συμβαίνει αυτή τη στιγμή και έχει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission, EC) έχει φτάσει σε μια συμφωνία η οποία θέλει την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% μέχρι το 2020 και την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 20% [33]. Μια από τις βιομηχανίες που παρουσιάζει την μεγαλύτερη ανάπτυξη σε σχέση με άλλες είναι η ICT (Information and Communication Technology) βιομηχανία, και συγκεκριμένα στις αναπτυσσόμενες οικονομίες όπως της Κίνας, της Ινδίας, της Βραζιλίας. Παρόλο που η ICT βιομηχανία έχει βοηθήσει στην μείωση της ανθρώπινης επιβάρυνσης - για παράδειγμα, έχει παρατηρηθεί μείωση των ταξιδιών που κάνουν οι άνθρωποι σε παγκόσμιο επίπεδο, χάρη στην τηλεδιάσκεψη ή τηλεργασία, έχει βοηθήσει στην παρακολούθηση παραμέτρων με μεγαλύτερη ακρίβεια όπως θερμοκρασία, ηλιακό φως και υγρασία χρησιμοποιώντας τοπολογίες δικτύων ασύρματων αισθητήρων για την βελτιστοποίηση της ενεργειακής διαχείρισης μέσα σε κτήρια - είναι υπεύθυνη για την αύξηση του ποσοστού της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας.

Σύμφωνα με την μελέτη SMART 2020 [34], η ICT βιομηχανία ήταν υπεύθυνη για το 530 Megatons CO₂ το 2002 και 830 Megatons CO₂ το 2007. Και επίσης έχει εκτιμηθεί ότι η ICT βιομηχανία είναι υπεύθυνη, περίπου, για το 3% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας και, περίπου για το 2% των εκπομπών CO₂ [35],[36] και συγκριτικά παράγει περισσότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την αεροπορική βιομηχανία [37]. Ακόμη έχει εκτιμηθεί ότι η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται κατά 15 - 20% ανά χρόνο, και διπλασιάζεται κάθε πέντε χρόνια [40]. Σύμφωνα με μια εκτίμηση, περίπου το ένα δέκατο αυτού μπορεί να αποδοθεί στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Το 2008 αυτό αντιστοιχούσε σε 60 δις KWh χρησιμοποίησης ηλεκτρικής ενέργειας και περίπου 40 δις tons CO₂ το χρόνο. Για να το θέσουμε με προοπτική, αυτό είναι ισοδύναμο με ετήσιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από 8 δισεκατομμύρια αυτοκίνητα.

Πιο συγκεκριμένα η Telecom Italia κατανάλωσε περισσότερο από 2 TWh το 2007, δηλαδή, το 1% της εθνικής ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος [38] και στην Κίνα υπήρχαν εγκατεστημένοι περίπου 600.000 BSs το 2007 οι οποίοι κατανάλωναν 20 δις KWh [39]. Εντός της ICT βιομηχανίας, η συμβολή των δικτύων κινητών επικοινωνιών ήταν 64 Megatons CO₂ το 2002 και αναμένεται να αυξηθεί στις 178 Megatons το 2020.

Από την προοπτική των παρόχων κινητών δικτύων, η μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας δεν είναι μόνο ένα θέμα για να θεωρούνται πράσινοι και υπεύθυνοι ως προς τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, αλλά είναι επίσης ένα σημαντικό οικονομικό θέμα. Ένα αρκετά σημαντικό μερίδιο των λειτουργικών εξόδων (Operational Expenditure, OPEX) ενός κυψελωτού δικτύου πηγαίνει προς την πληρωμή των ηλεκτρικών λογαριασμών. Από όλα τα παραπάνω, μπορεί να εκτιμηθεί στο περίπου ότι τα OPEX για ηλεκτρικό ρεύμα παγκοσμίως, σήμερα, είναι περισσότερα από 10 δισεκατομμύρια δολάρια.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, οι πάροχοι κυψελωτών δικτύων διερευνούν τρόπους για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας σε όλα τα μέρη των δικτύων, συμπεριλαμβάνοντας τις κινητές συσκευές, τους σταθμούς βάσης, και κεντρικό δίκτυο (Core Network, CN). Έχει γίνει σημαντική δουλειά όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα των κινητών συσκευών με αντικειμενικό στόχο την παράταση του χρόνου διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Παρομοίως, η

πράσινη λειτουργία του διαδικτύου έχει προοπτικές γι' αυτό και μερικές τεχνικές μπορούν να επεκταθούν στα κυψελωτά δίκτυα πυρήνα. Παρόλα αυτά, η βασική πηγή κατανάλωσης ενέργειας σε ένα κυψελωτό δίκτυο είναι λειτουργία του εξοπλισμού των σταθμών βάσης. Έχει εκτιμηθεί ότι οι σταθμοί βάσης συμβάλουν στο 60 - 80% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, [31]. Επομένως είναι σημαντικό να χαρακτηρίζονται από ενεργειακή αποδοτικότητα, έτσι ώστε να εξοικονομείται ενέργεια κατά την λειτουργία τους

Η ενεργειακή αποδοτικότητα από την άποψη των σταθμών βάσης έχει αποτελέσει κίνητρο για όλα τα στάδια ενός κυψελωτού δικτύου, συμπεριλαμβάνοντας της σχεδίαση υλικού, στην διάταξη του δικτύου, και την λειτουργία. Σημαντικός αριθμός αυτών των προσπαθειών έχει επικεντρωθεί στην βελτίωση του υλικού. Για παράδειγμα, επόμενης γενιάς σταθμοί βάσης έχουν σχεδιαστεί να είναι ουσιαστικά πολύ πιο αποδοτικοί ενεργειακά, πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας περισσότερο ενεργειακά αποδοτικούς ενισχυτές ισχύος και χρησιμοποιώντας φυσικούς πόρους για ψύξη. Άλλες προσπάθειες έχουν θεωρήσει την συνεγκατάσταση κυψελωτών σταθμών βάσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως αιολική και ηλιακή ενέργεια. Ακόμη, φορείς κυψελωτών δικτύων έχουν αξιολογήσει στρατηγικές ανάπτυξης που ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας ανά εμβαδόν κάλυψης του χώρου στους σταθμούς βάσης [23]. Σε αυτήν την διπλωματική εργασία επικεντρωνόμαστε στην λειτουργία των σταθμών βάσης, με προοπτική την κίνηση κατά την διάρκεια μιας ημέρας θέτοντας για τους σταθμούς βάσης διάφορες δυνατότητας με στόχο την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Τέτοιες δυνατότητες μπορεί να είναι η κατάσταση ύπνου ή η αύξηση της ισχύς εκπομπής για την επέκταση της κάλυψης ενός σταθμού βάσης.

Υπάρχει δυνατότητα για σημαντική βελτίωση της λειτουργίας των κυψελωτών δικτύων. Ακόμα και αν ένας σταθμός βάσης αισθάνεται λίγη η καθόλου δραστηριότητα κατά την διάρκεια χαμηλής κίνησης, αυτός θα συνεχίσει να καταναλώνει περισσότερο από το 90% της ενέργειας που καταναλώνει τις ώρες αιχμής. Επομένως, αυτό σημαίνει ότι σταθμοί βάσης θα λειτουργούν χωρίς να εξυπηρετούν σημαντικό φορτίο μέσα στο δίκτυο. Για να σημειωθεί σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας πρέπει κάποιοι σταθμοί βάσης να απενεργοποιηθούν τελείως ή να μεταβούν σε κατάσταση ύπνου.

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία, χρησιμοποιούμε μεθόδους για την διαχείριση της λειτουργίας των σταθμών βάσης με τις οποίες είναι δυνατόν να υπάρξει σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε κινητά δίκτυα πρόσβασης. Θεωρώντας ότι μερικοί σταθμοί βάσης σε ένα δίκτυο μεταβαίνουν σε κατάσταση ύπνου, η περιοχή που εξυπηρετούσαν μένει ακάλυπτη, αυτό θα έχει σημαντικό αντίκτυπο στην διακοπή λειτουργίας νέων χρηστών που εισέρχονται στο δίκτυο, γι' αυτό το λόγο διερευνούμε την καλύτερη επιλογή για την διαχείριση των σταθμών βάσης, συγκρίνοντας μια δυναμική μέθοδο διαχείρισης με μια στατική. Επιπλέον, αναπτύσσουμε μια νέα λειτουργία για την διαχείριση των σταθμών βάσης η οποία αναφέρεται ως υβριδική μέθοδος διαχείρισης και χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά από την στατική και την δυναμική μέθοδο διαχείρισης.

1.2. Πλάνο εργασίας

Η διπλωματική εργασία είναι οργανωμένη με την εξής σειρά, αρχικά, στο Κεφάλαιο 2 αναφερόμαστε στα κινητά δίκτυα τηλεπικοινωνιών με σκοπό να αναπτυχθεί μια βάση για τις διάφορες τεχνολογίες που υπάρχουν στο τομέα αυτό, στην συνέχεια στο Κεφάλαιο 3 μελετάμε αναλυτικά διάφορες τεχνικές για εξοικονόμηση ενέργειας που εφαρμόζονται ή μπορούν εφαρμοστούν (στο μέλλον) σε κινητά δίκτυα σταθμών βάσης. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η ανάπτυξη του μοντέλου που αποτελεί την βάση των προσομοιώσεων που εκτελούμε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της διπλωματικής. Εδώ αναφέρουμε το μαθηματικό και θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για να συγκροτηθεί ο αλγόριθμος του μοντέλου του συστήματος. Στο Κεφάλαιο 5

γίνεται εισαγωγή στην κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης, συγκεκριμένα αναλύονται τα περιεχόμενα ενός σταθμού βάσης και παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα (μαθηματικές εξισώσεις) κατανάλωσης ενέργειας τα οποία προστίθενται στον αλγόριθμο του μοντέλου του συστήματος για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας των σταθμών βάσης. Έπειτα στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας, πιο συγκεκριμένα το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται σε ζητήματα κατανάλωσης ενέργειας, σε κινητά δίκτυα πρόσβασης, όπως είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα των διατάξεων των δικτύων, ακόμη συνδέουμε την κατανάλωση ενέργειας και το πλήθος των χρηστών μέσα στο δίκτυο με την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών. Το Κεφάλαιο 7 εισάγει τις λειτουργίες που ακολουθούν οι σταθμοί βάσης έτσι ώστε να υπάρχει ενδεχόμενη διαχείριση ενός συνολικού δικτύου σταθμών βάσης, παράλληλα με κάθε λειτουργία που εισάγουμε, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της σε ένα δίκτυο. Τέλος, συνοψίζουμε την διπλωματική και τα αποτελέσματα που βρέθηκαν στο Κεφάλαιο 8.

Κεφάλαιο 2

Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών

2.1. Εισαγωγή στα κυψελωτά δίκτυα

Τα κυψελωτά δίκτυα είναι δίκτυα ραδιοεπικοινωνιών που αποτελούνται από μια σειρά από μη-επικαλυπτόμενες κυψέλες - κάθε μια ή ομάδα αυτών εξυπηρετούνται από έναν τουλάχιστον σταθμό βάσης - που καλύπτουν μια αρκετά μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Μερικές συχνότητες αντιστοιχίζονται σε κάθε κυψέλη, οι οποίες μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε άλλες κυψέλες σε κοντινή περιοχή. Διάφορες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης (διαμοίραση φάσματος) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να είναι δυνατή η διάκριση των σημάτων από διαφορετικές συσκευές, το οποίο επιτυγχάνεται χωρίζοντας τις διαστάσεις του σήματος κατά μήκος του άξονα του χρόνου, της συχνότητας, και/ή του χωρικού κώδικα. Στα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access) FDMA το συνολικό εύρος ζώνης διαιρείται σε συχνότητες ορθογωνικών καναλιών. Στα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access) TDMA, ο χρόνος διαιρείται ορθογωνικά και κάθε κανάλι καταλαμβάνει όλη την μπάντα συχνοτήτων στη δεσμευμένη χρονοθυρίδα. Τα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access) CDMA τυπικά εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας απευθείας-ακολουθίες (direct-sequence) ή μεταπήδηση-συχνοτήτων (frequency-hopping) εξάπλωσης φάσματος με ορθογωνικούς ή μη κώδικες. Στις απευθείας-ακολουθίες κάθε χρήστης διαμορφώνει την ακολουθία δεδομένων του με διαφορετικό chip sequence το οποίο είναι σημαντικά γρηγορότερο από την ακολουθία δεδομένων. Στο πεδίο της συχνότητας, το σήμα δεδομένων στενής ζώνης συμψηφίζεται μαζί με το ευρυζωνικό chip σήμα, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός σήματος με αρκετά ευρύτερο εύρος ζώνης από αυτό του αρχικού σήματος δεδομένων. Στην μεταπήδηση-συχνοτήτων η συχνότητα φέροντος που χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει το σήμα δεδομένων στενής ζώνης διαφέρει από την ακολουθία chip η οποία μπορεί να είναι γρηγορότερη ή πιο αργή από την ακολουθία δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα διαμορφωμένο σήμα που πηδάει πάνω σε διαφορετικές συχνότητες φέροντος. Τυπικά σήματα εξαπλωμένου φάσματος προστίθενται το ένα πάνω στο άλλο μέσα στο ίδιο εύρος ζώνης. Ένας δέκτης εξάπλωσης φάσματος διαχωρίζει κάθε ένα από τα διακριτά σήματα, αποκωδικοποιώντας χωριστά κάθε εξαπλωμένη ακολουθία.

Τα κυψελωτά δίκτυα έκαναν την πρώτη τους εμφάνιση στην δεκαετία του 60' και χρησιμοποιούσαν αναλογικές επικοινωνίες. Τα συστήματα δεύτερης γενιάς προχώρησαν από την αναλογική τους φύση στην ψηφιακή λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η δεύτερη. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι ότι τα εξαρτήματα είναι φτηνότερα, γρηγορότερα σε επιδόσεις, έχουν μικρότερο σε μέγεθος, και απαιτούν λιγότερη ενέργεια. Η ποιότητα της φωνής έχει βελτιωθεί σημαντικά λόγω της κωδικοποίησης για διόρθωση σφαλμάτων. Επίσης, τα ψηφιακά συστήματα παρουσιάζουν υψηλότερη χωρητικότητα σε σχέση με τα αναλογικά συστήματα αφού μπορούν να χρησιμοποιήσουν πιο αποδοτικές φασματικά ψηφιακές διαμορφώσεις και ακόμη πιο αποδοτικές τεχνικές για να διαμοιράσουν το κυψελωτό φάσμα. Μπορούν επίσης να εκμεταλλευτούν προηγμένες τεχνικές συμπίεσης και παράγοντες δραστηριότητας της φωνής. Επιπλέον, τα ψηφιακά συστήματα χρησιμοποιούν τεχνικές κρυπτογράφησης ώστε να διασφαλίσουν τα ψηφιακά σήματα από υποκλοπές. Και τέλος τα ψηφιακά συστήματα μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες δεδομένων, παράλληλα με υπηρεσίες φωνής, όπως αποστολή σύντομων μηνυμάτων, e-mail, πρόσβαση στο διαδίκτυο, και δυνατότητες πολυμέσων, κ.α.

Σήμερα, οι τεχνολογίες κινητών δικτύων που χρησιμοποιούνται είναι η GSM/EDGE (2G) και η UMTS/HSxPA (3G) και είναι υπεύθυνες για το 85% του συνόλου των κινητών χρηστών. Η

τεχνολογία GSM χρησιμοποιεί συστήματα TDMA με παράγοντα επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας ίσον με 4, ενώ η τεχνολογία UMTS χρησιμοποιεί συστήματα W-CDMA (Wideband CDMA) και ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας είναι ίσος με 1. Η επόμενη γενιά (4G) κυψελωτών δικτύων θα βασίζεται στην τεχνολογία LTE (Long Term Evolution), η οποία χρησιμοποιεί το σύστημα OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) για την κάτω ζεύξη (Down Link) και το σύστημα SD-FDMA (Single Carrier FDMA, μια προ-κωδικοποιημένη έκδοση του OFDM για να αποφεύγονται υψηλοί ρυθμοί peak-to-average (peak-to-average ratios) στους κινητούς χρήστες) για τη άνω ζεύξη (Up Link). Το σύστημα OFDMA υλοποιεί μια τεχνική που αυτή χωρίζει το εύρος ζώνης σε αρκετά στενής ζώνης υποφέροντα (subcarriers) τα οποία είναι ορθογωνικά μεταξύ τους. Επίσης, και σε αυτήν την τεχνολογία δικτύων LTE ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας είναι ίσος με 1, παρόλα αυτά αυτή η τεχνολογία θα χρησιμοποιήσει ένα κλασματικό παράγοντα επαναχρησιμοποίησης, δηλαδή, οι χρήστες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης επαναχρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες (ή subcarriers) ενώ οι χρήστες στο σύνορο της κυψέλης κατανέμονται σε άλλες συχνότητες (ή subcarriers) με συνεργατικό τρόπο μεταξύ των σταθμών βάσης έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή.

Διάφορα σημαντικά χαρακτηριστικά στα μελλοντικά δίκτυα LTE είναι τα εξής:

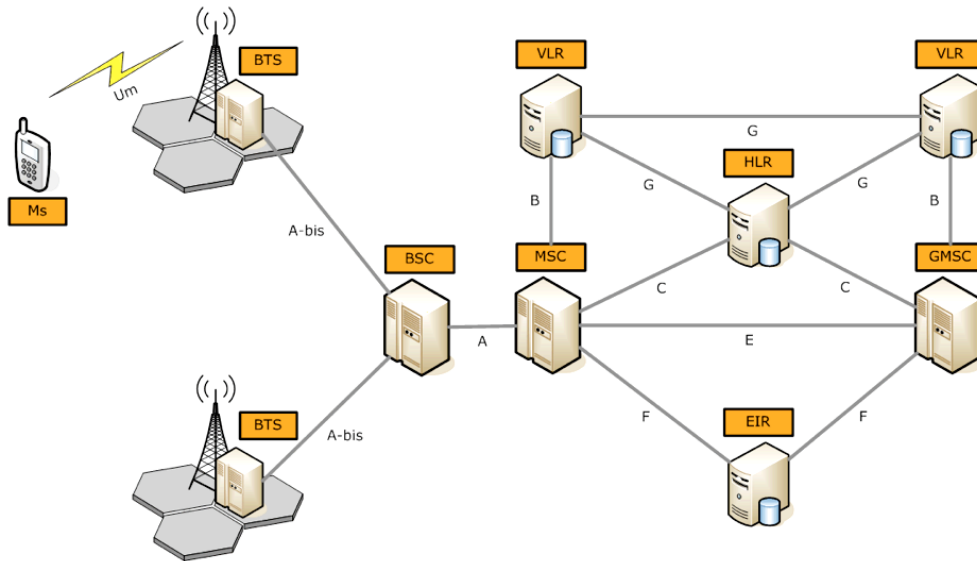
- Τα φάσμα θα είναι ευέλικτο, δηλαδή, είναι δυνατόν να υπάρχουν 12 subcarriers ανά θυρίδα για ένα block πόρων (resource block) μεγέθους 180 kHz. Το ελάχιστο φάσμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι αυτό που αποτελείται από φέρον με εύρος ζώνης 1.4 MHz και περιλαμβάνει 6 block πόρους, ενώ το μέγιστο αποτελείται από φέρον με εύρος ζώνης 20 MHz και περιλαμβάνει 100 block πόρους - στην αντίθετη περίπτωση τα συστήματα W-CDMA στα 3G δίκτυα χρησιμοποιούν σταθερό φέρον με εύρος ζώνης 5 MHz.
- Τα μελλοντικά δίκτυα LTE θα μπορούν να εξυπηρετήσουν τουλάχιστον 200 ενεργούς χρήστες σε κάθε κυψέλη των 5 MHz εύρους ζώνης.
- Επίσης θα υποστηρίζει κυψέλες από 5 km μέχρι 100 km σε μάντες συχνοτήτων των 900 MHz για αγροτικές περιοχές, και κυψέλες μικρότερες από 1 km σε αστικές περιοχές με υψηλότερες μάντες συχνοτήτων, περίπου στα 2500 MHz ώστε να μπορεί να υποστηρίξει υψηλής ταχύτητας κινητούς χρήστες.
- Θα υποστηρίζει ακόμη και FDD αλλά και TDD λειτουργίες.

Ένας από τους στόχους του LTE είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας, καθώς θα παρέχεται η συμβατότητα με - και η μετάβαση με αποδοτικότητα κόστους από - τα σημερινά δικτυακά συστήματα UMTS. Η φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency) στα μελλοντικά συστήματα LTE θα είναι 2 με 4 φορές από αυτήν της σημερινής τεχνολογίας Release 6 του HSxPA. Τέλος, η China Telecom/China Unicom έχει επιλέξει την τεχνολογία LTE για την επόμενη γενιά (4G) κινητών δικτυακών συστημάτων.

2.1.1. Αρχιτεκτονική κυψελωτών δικτυακών συστημάτων

Τα κυψελωτά δίκτυα αποτελούνται από δυο βασικά μέρη: από το δίκτυο πρόσβασης ή υποσύστημα σταθμών βάσης (Base Station Subsystem) BSS και το κεντρικό δίκτυο (Core Network) CN, τα οποία συνδέονται με backhaul σύνδεση. Το δίκτυο πρόσβασης είναι υπεύθυνο για την διαχείριση της κίνησης και την σηματοδότηση μεταξύ του κεντρικού δικτύου και των κινητών χρηστών. Αυτό αποτελείται από ένα δίκτυο σταθμών βάσης πομποδεκτών (Base Transceiver Station) BTS που ονομάζονται Node B και eNode B στα UMTS και LTE, αντίστοιχα, αυτοί οι σταθμοί βάσης ομαδοποιούνται κάτω από την επίβλεψη μερικών σταθμών βάσης ελέγχου (Base Station Controllers) BSC, ενώ ονομάζονται (Radio Network Controllers) RNC στα UMTS και LTE, και συνδέονται με το κεντρικό δίκτυο. Ένας και μόνο BSC/RNC μπορεί να ελέγχει δεκάδες ή και εκατοντάδες σταθμούς βάσης. Ένας BSC/RNC διαχειρίζεται την δέσμευση των ασύρματων

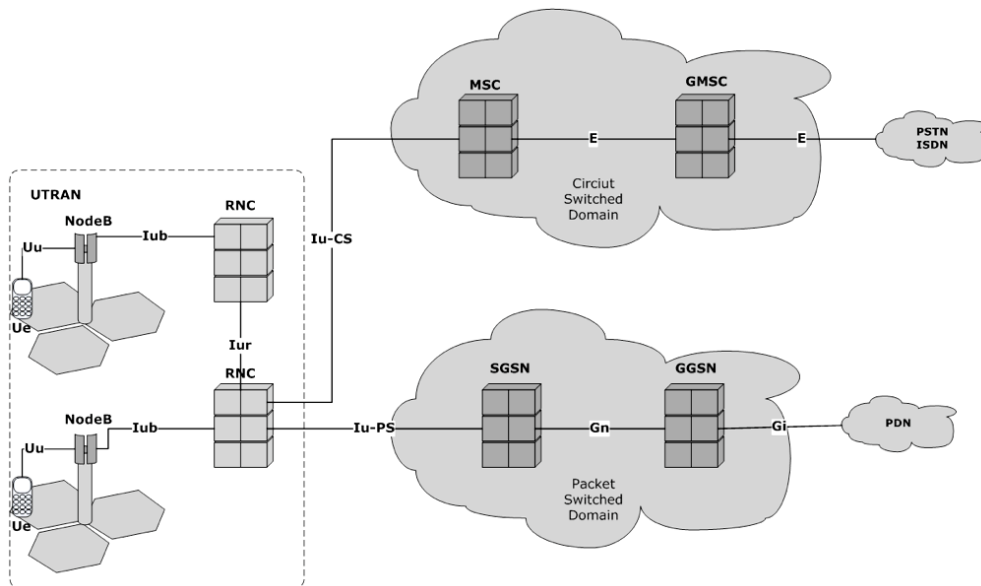
καναλιών, είναι υπεύθυνος στο να ελέγχει οτιδήποτε εισερχόμενο στο δίκτυο, λαμβάνει μετρήσεις από τα κινητά τηλέφωνα, διαχειρίζεται τις παραπομπές (handovers) μεταξύ των σταθμών βάσης, κ.α. Επίσης, ο BSC/RNC μπορεί να δρομολογεί τηλεφωνικές κλήσεις μέσω του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου (Public Switched Telephone Network) PSTN ή να παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο. Λειτουργεί επίσης ως συγκεντρωτής των χαμηλής χωρητικότητας συνδέσεων από και προς τους σταθμούς βάσης σε υψηλής χωρητικότητας συνδέσεις από και προς το κεντρικό δίκτυο. Οι σταθμοί βάσης με την σειρά τους είναι υπεύθυνοι για την ασύρματη διεπαφή, δηλαδή, περιλαμβάνουν λειτουργίες όπως, διαμόρφωση, χρονοπρογραμματισμό, adaptive coding, scrambling, μετρήσεις για ποιότητα της ζεύξης, soft handovers κ.α.



Σχ. 2.1. Απλοποιημένη αρχιτεκτονική του τηλεπικοινωνιακού συστήματος GSM, [41].

Πιν. 2.1. Λίστα συντομογραφιών για το GSM

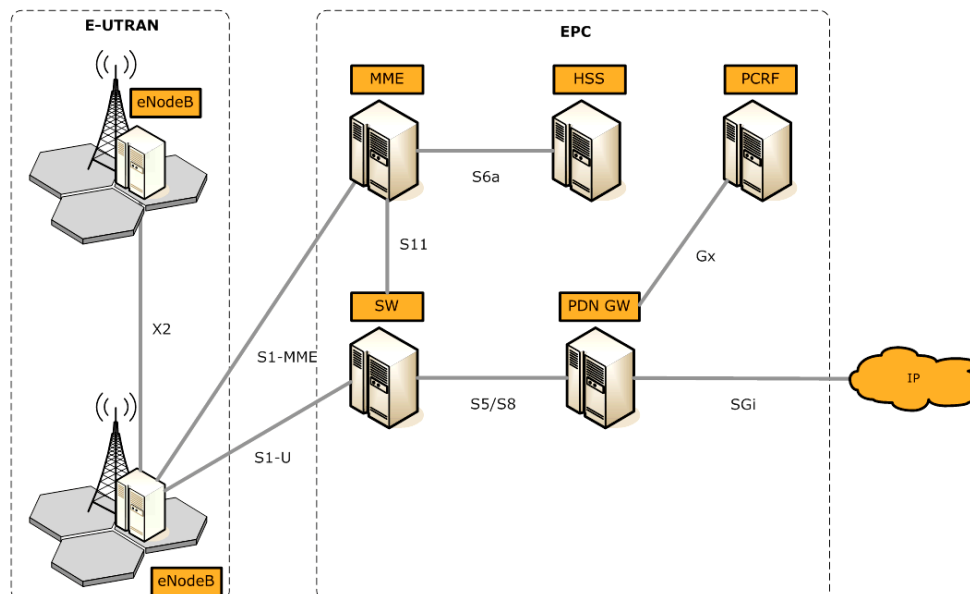
Ms	Mobile Station
BTS	Base Transceiver Station
MSC	Mobile Switching Center
HLR	Home Location Register
VLR	Visitor Location Register
EIR	Equipment Identity Register
G-MSC	Gateway MSC



Σχ. 2.2. Απλοποιημένη αρχιτεκτονική του τηλεπικοινωνιακού συστήματος UMTS, [41].

Πιν. 2.2. Λίστα συντομογραφιών για το UMTS

RNC	Radio Network Controller
MSC	Mobile Switching Center
Ue	User Equipment
SGSN	Serving GPRS Support Node
PDN	Packet Data Network
PSTN	Public Switched Telephony Network



Σχ. 2.3. Απλοποιημένη αρχιτεκτονική του τηλεπικοινωνιακού συστήματος LTE, [41].

Πιν. 2.3. Λίστα συντομογραφιών για το LTE

MME	Mobility Management Entity
SW	Serving Gateway
HSS	Home Subscriber Server
PCRF	Policy Control and Changing Rules Function
EPC	Evolved Packet Core

Το κεντρικό δίκτυο είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση και την προώθηση των δεδομένων των κινητών χρηστών, για τις παραπομπές μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών, για την διαχείριση των βάσεων δεδομένων με τις πληροφορίες των τερματικών και των κινητών χρηστών, για θέματα ασφαλείας, κ.α. Επιπλέον το κεντρικό δίκτυο έχει υποστεί αρκετές αλλαγές τις τελευταίες δεκαετίες. Για παράδειγμα, στα κινητά συστήματα 2ης γενιάς GSM ένα νέο δίκτυο ανταλλαγής πακέτων προστέθηκε αργότερα ώστε να υποστηριχθεί να τεχνολογία GPRS η οποία περιλαμβάνει gateways σε εξωτερικό δίκτυα IP. Αργότερα με την τρίτη γενιά δικτύων όπως η UMTS και τις αρκετές εκδόσεις της, το κεντρικό δίκτυο επεκτάθηκε ώστε να υποστηρίζει soft switching (Release 4) ή μεταδόσεις πολυμεσικών δεδομένων (Release 5 με το πολυμεσικό υποσύστημα). Τέλος, το σημερινό κεντρικό δίκτυο εξελίσσεται σε ένα εξολοκλήρου δίκτυο IP το οποίο θα υποστηρίζουν οι μελλοντικές γενιές κινητών δικτύων.

2.1.2. Κάλυψη και χωρητικότητα

Η περιοχή κάλυψης μιας κυψέλης είναι το προσδόκιμο ποσοστό της κυψελωτής περιοχής όπου η λαμβανόμενη ισχύς σε ένα κινητό χρήστη είναι μεγαλύτερη από ένα ορισμένο ελάχιστο κατώφλι, γνωρίζοντας ότι οι χρήστες απαιτούν ένα ελάχιστο λαμβανόμενο σηματοθορυθικό λόγο (Signal to Noise Ratio) SNR για μια αποδεκτή επίδοση. Ένας σταθμός βάσης εκπέμπει σε συγκεκριμένη ισχύ έτσι ώστε η μέση λαμβανόμενη ισχύς στα σύνορα της κυψέλης να είναι πάνω από το ελάχιστο δυνατό που μπορεί να λάβει ένας κινητός χρήστης, έχοντας υπόψη τις επιπτώσεις από το μονοπάτι απωλειών όπως την σκίαση (shadowing) διαφόρων εμποδίων, δηλαδή, την μεταβλητότητα του λαμβανόμενου σήματος λόγω της κίνησης του χρήστη και της μορφολογίας του περιβάλλοντος στο οποίο εκπέμπεται το σήμα. Το μονοπάτι απωλειών προκαλείται από τον διασκορπισμό της εκπεμπόμενης ισχύς και κατάσταση του καναλιού διάδοσης. Η απόσταση μεταξύ του δέκτη και του πομπού και η συχνότητα που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία είναι οι κύριοι παράγοντες στο μονοπάτι απωλειών, όπως φαίνεται και από την εξ. 2.1.

$$FSPL(dB) = 32.4 + 20 \cdot \log_{10}(d / km) + 20 \cdot \log_{10}(f / MHz) \quad (2.1)$$

Όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα f τόσο μεγαλύτερες θα είναι απώλειες και η εξασθένηση του σήματος του πομπού. Η σκίαση προκαλείται από το εμπόδια μεταξύ του μονοπατιού που συνδέει το πομπό και τον δέκτη. Τα εμπόδια αυτά είναι δυνατόν να προκαλέσουν ανάκλαση (reflection), σκέδαση (scattering), διάθλαση (refraction), περίθλαση (diffraction), απορρόφηση (absorption) του σήματος, επομένως γι' αυτό το λόγω προκαλείται η εξασθένηση. Η σκίαση συχνά έχει ως αποτέλεσμα κάποιοι κινητοί χρήστες μέσα στην κυψέλη να λαμβάνουν την ισχύ κάτω από το μέση λαμβανόμενη ισχύ στα σύνορα της κυψέλης και κάποιους άλλους χρήστες να την λαμβάνουν πάνω από τη μέση τιμή της. Υποθέτοντας το μονοπάτι απωλειών και την μέση τιμή της σκίασης, η κάλυψη δίνεται από έναν κύκλο γύρω από τον BS.

Η χωρητικότητα αναφέρεται στο μέγιστο θεωρητικό ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί σε ένα ασύρματο κανάλι. Σε ένα Gaussian κανάλι με ένα χρήστη, ο Claude Shannon όρισε την χωρητικότητα χρησιμοποιώντας την μαθηματική θεωρία της θεωρίας της πληροφορίας βασιζόμενος στην έννοια της αμοιβαίας πληροφορίας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του καναλιού.

Στα κυψελωτά δίκτυα συστήματος CDMA με ανιχνευτές ενός χρήστη η κάλυψη μιας κυψέλης περιορίζεται από την παρεμβολή που προκαλείται από τους κινητούς χρήστες που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη, αυτό σημαίνει ότι για συγκεκριμένη ισχύ εκπομπής η κάλυψη μιας κυψέλης είναι αντιστρόφως ανάλογη ως προς τον αριθμό των χρηστών μέσα σε αυτή. Μια αύξηση στον αριθμό των ενεργών χρηστών μέσα στην κυψέλη προκαλεί αύξηση στην συνολική παρεμβολή η οποία φαίνεται στον δέκτη. Αυτό με την σειρά του προκαλεί αύξηση στην απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύ για κάθε χρήστη, λόγω του ότι κάθε χρήστης πρέπει να διατηρήσει ένα συγκεκριμένο λόγο σήματος προς θόρυβο παρεμβολής (Signal to Interference Noise Ratio) SINR στο δέκτη για μια αποδεκτή επίδοση. Η αύξηση της απαιτούμενης λαμβανόμενης ισχύς έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της κάλυψης. Όσο περισσότεροι χρήστες καταφτάνουν στην κυψέλη, τόσο η περιοχή κάλυψης μειώνεται. Επομένως, υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ κάλυψης και χωρητικότητας μέσα στην κυψέλη. Οι υψηλές συχνότητες θεωρούνται μειονέκτημα όσον αφορά την κάλυψη, αλλά από την άλλη μεριά θεωρούνται πλεονέκτημα όσον αφορά την χωρητικότητα. Οι pico κυψέλες είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, και η ίδια μπάντα συχνοτήτων μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί από γειτονικούς σταθμούς βάσης. Επί του παρόντος, η ποσότητα ελεύθερου/μη-δεσμευμένου φάσματος μειώνεται, αυτό σημαίνει ότι τα μελλοντικά δίκτυα θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν τις διαθέσιμες μπάντες στις υψηλότερες συχνότητες, το οποίο όμως θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της περιοχής κάλυψης και την αύξηση στην πυκνότητα των σταθμών βάσης. Επιπλέον, οι επόμενες γενιές κυψελωτών δικτύων αναμένεται να υποστηρίζουν ποικίλους τύπους υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένου των, web browsing FTP, video streaming, VoIP, online gaming, real time video, κ.α., που σημαίνει ότι θα απαιτούν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Τεχνολογίες φυσικού επιπέδου (Physical Layer) όπως η OFDM, έξυπνες κεραίες και MIMO (Multiple Input Multiple Output) συστήματα σχεδιάζονται ώστε να καταφέρουν αυτόν τον στόχο. Μια τεχνική για την αύξηση της κάλυψης και της χωρητικότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα μελλοντικά δίκτυα είναι οι σταθμοί αναμεταδοτών (Relay Stations).

2.1.2.1. Υπολογισμός χωρητικότητας σε CDMA

Με τον όρο χωρητικότητα σε ένα σύστημα CDMA αναφερόμαστε στον αριθμό κινητών χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει μια κυψέλη. Είναι γνωστό ότι τα συστήματα TDMA και FDMA περιορίζονται από την μπάντα συχνοτήτων στην οποία λειτουργούν, ενώ το σύστημα CDMA περιορίζεται μόνο από τις παρεμβολές που δημιουργούνται από τους χρήστες μέσα στην κυψέλη [1].

Για N χρήστες, ο αποδιαμορφωτής κάθε κυψέλης επεξεργάζεται μια σύνθετη λαμβανόμενη κυματομορφή η οποία περιέχει το επιθυμητό σήμα με ισχύ S και $N - 1$ σήματα που το παρεμβάλουν, και τα οποία έχουν και αυτά ισχύ S . Επομένως η SNR είναι

$$SNR = \frac{S}{(N - 1) \cdot S} = 1 / (N - 1) \quad (2.2)$$

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για ένα αξιόπιστο σύστημα είναι ο λόγος bit energy-to-noise density, του οποίου ο αριθμητής προκύπτει διαιρώντας το επιθυμητό σήμα με τον ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας, R , και ο παρονομαστής διαιρώντας την παρεμβολή με το συνολικό εύρος ζώνης, W . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το εξής:

$$E_b / N_0 = \frac{S / R}{(N - 1) \cdot S / W} = \frac{W / R}{N - 1} \quad (2.3)$$

Η εξίσωση 2.3 δεν περιλαμβάνει τον εξωτερικό θόρυβο, n , που προέρχεται από τις λοιπές παρεμβολές και το θερμικό θόρυβο που βρίσκεται στο εξαπλωμένο εύρος ζώνης. Εισάγοντας τον επιπλέον όρο στην εξίσωση 2.3 έχουμε το εξής αποτέλεσμα:

$$E_b / N_0 = \frac{W / R}{(N - 1) + (n / S)} \quad (2.4)$$

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι η χωρητικότητα που μπορεί να υποστηριχθεί σε όρους αριθμού χρηστών είναι:

$$N = 1 + \frac{W / R}{E_b / N_0} - \frac{n}{S} \quad (2.5)$$

όπου ο όρος W/R αναφέρεται ως ‘processing gain’ και ο E_b/N_0 είναι η τιμή που απαιτείται για επαρκείς επίδοση του modem και του αποκωδικοποιητή, που για μετάδοση ψηφιακή φωνής συνεπάγεται το BER να είναι 0.001 ή καλύτερο.

2.1.2.2. Υπολογισμός χωρητικότητας σε OFDMA

Το σύστημα OFDMA είναι η σημαντικότερη τεχνολογία πρόσβασης και μετάδοσης στα μελλοντικά κινητά συστήματα όπως το Mobile WiMAX και το 3GPP LTE. Η χωρητικότητα ενός OFDMA πλαισίου μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας κάθε OFDMA Resource Element (RE) ως μια μονάδα χωρητικότητας [2].

Έστω ότι δίνεται ο συνολικός αριθμός των subcarriers N_{total} και των συμβόλων S_{total} για ένα πλαίσιο OFDMA, τότε μπορούμε απλούστατα να υπολογίσουμε την μέγιστη χωρητικότητα του OFDMA πλαισίου είτε για το DL είτε για το UL σε αριθμό REs. Έτσι μπορούμε να παράγουμε τη συνολική και την χρησιμοποιημένη χωρητικότητα ενός OFDMA πλαισίου ως εξής:

$$CAP_{total} = N_{total} \cdot S_{total} \quad (2.6)$$

και

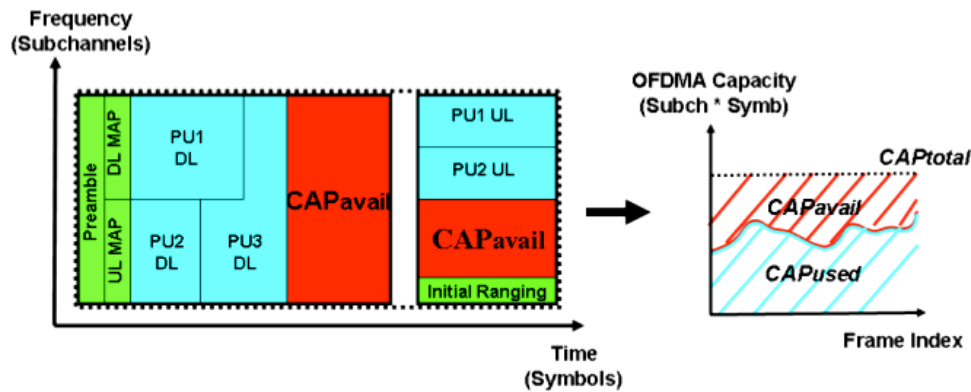
$$CAP_{used} = \sum_{k=1}^{RE_{used}} RE \quad (2.7)$$

αντίστοιχα. Ενώ το μέγιστο διαθέσιμο χωρητικότητα του OFDMA πλαισίου μπορεί εύκολα να υπολογισθεί από:

$$CAP_{avail} = CAP_{total} - CAP_{used} \quad (2.8)$$

Το Σχ. 2.5 παρουσιάζει τη μέθοδο για τον υπολογισμό της χωρητικότητας ενός πλαισίου OFDMA. Οι καμπύλες στο δεξιό γράφημα αναπαριστούν το τρόπο με τον οποίο δεσμεύεται η

χωρητικότητα του OFDMA πλαισίου, όσον αφορά την ακολουθία των διαδοχικών πλαισίων OFDMA.



Σχ. 2.4. Υπολογισμός χωρητικότητας OFDMA, [2].

Για να εκτιμήσουμε τον αριθμό των απαιτούμενων θυρίδων (Requested Slots) RS_i σε $kbps$ για κάθε χρήστη i , ακολουθούμε την εξής προσέγγιση:

$$RS_i = \frac{RC_i}{C_{RE}} \quad (2.9)$$

όπου RC_i είναι η απαιτούμενη χωρητικότητα (Requested Capacity) ανά χρήστη i σε bps . Η μέση χωρητικότητα ανά RE, C_{RE} , σε bps/RE εκτιμάται με τον εξής τρόπο:

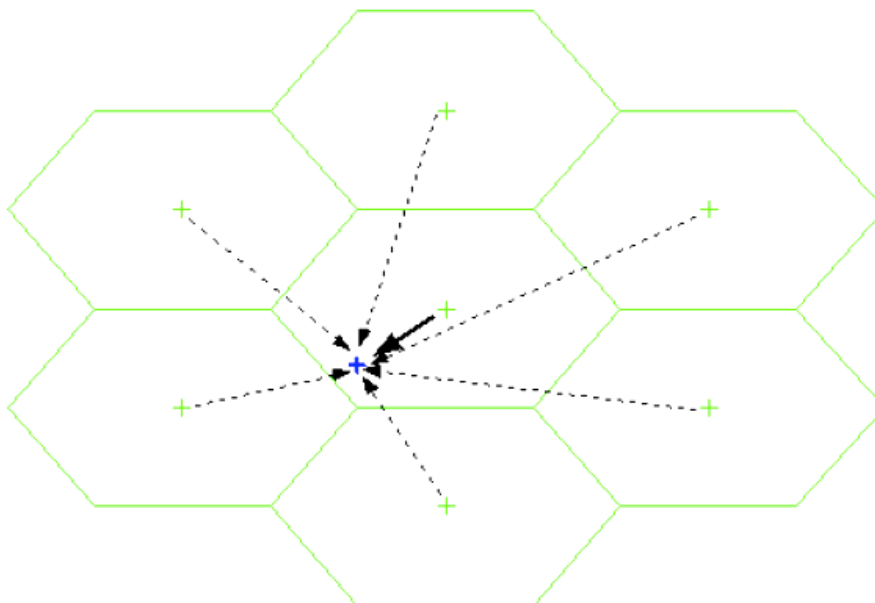
$$C_{RE} = \frac{\frac{bits}{subcarrier} \cdot \frac{subcarriers}{RE}}{T_{frame}} \quad (2.10)$$

όπου T_{frame} είναι η διάρκεια του πλαισίου OFDMA. Ο όρος $\frac{bits}{subcarrier}$ αντιπροσωπεύει την μέση αποδοτικότητα ως προς την ασύρματη πρόσβαση του φορέα σε bits ανά subcarrier (διαμόρφωση και κωδικοποίηση), ενώ ο όρος $\frac{subcarriers}{RE}$ είναι ο αριθμός των subcarriers ανά subchannel.

2.2. Παρεμβολές στα κυψελωτά δίκτυα

Αναφέρθηκε και προηγουμένως ότι η χωρητικότητα ενός συστήματος CDMA είναι περιορισμένη. Ένας παράγοντας στον οποίο οφείλεται αυτό είναι η απόσταση του χρήστη από τον σταθμό βάσης. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός CDMA συστήματος είναι ότι η χωρητικότητα του εξαρτάται από τις συνολικές παρεμβολές (interferences) που προκαλούνται από το δίκτυο, και περιορίζεται όταν στην κυψέλη προκαλείται η μέγιστη δυνατή ποσότητα παρεμβολής. Έτσι, η εσωτερική παρεμβολή (intra-cell interference) που παρατηρείται σε μια κυψέλη έχει άμεση σχέση με την κατανομή των χρηστών στο υπόλοιπο δίκτυο, πράγμα που καθορίζει την χωρητικότητα στην εν λόγω κυψέλη. Παραδοσιακά, η συνολική παρεμβολή που προκαλείται από μια κυψέλη, έχει θεωρηθεί ως προσέγγιση, που καθορίζεται από έναν απλό πολλαπλασιασμό των χρηστών μέσα σε αυτήν την κυψέλη με την μέση τιμή της παρεμβολής που

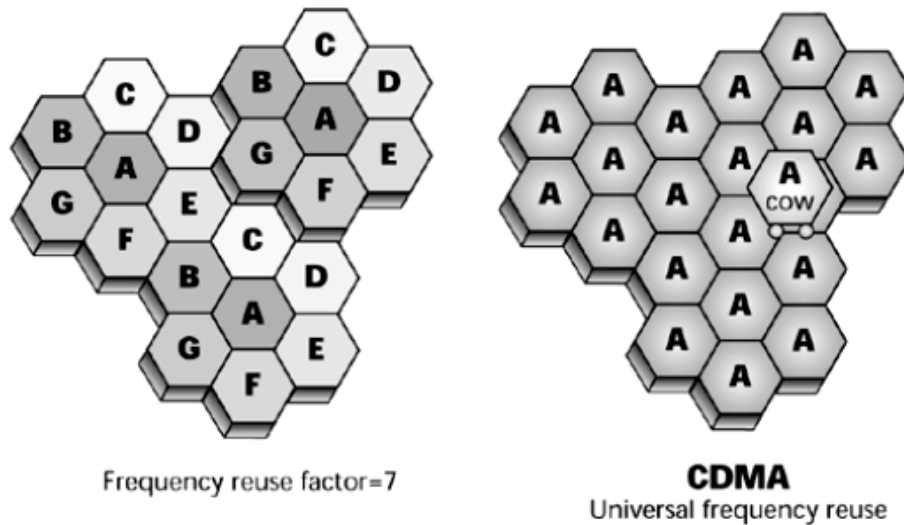
υπάρχει σε αυτήν. Με άλλα λόγια, η ίδια ποσότητα παρεμβολής παράγεται άσχετα από την θέση του χρήστη μέσα στην κυψέλη. Είναι σαφές ότι σε ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο η παρεμβολή που θα προκαλείται θα είναι συναρτήσεως της απόστασης του χρήστη από τον σταθμό βάσης. Η εσωτερική παρεμβολή εκτός από την απόσταση μεταξύ του δέκτη σε σχέση με τον πομπό εξαρτάται επίσης και από την ορθογωνικότητα των κωδικών του CDMA, όσο λιγότερο ορθογωνικοί είναι οι κώδικες τόσο πιο αυξημένη είναι η παρεμβολή, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος που πρέπει να δεσμεύσει ένας χρήστης από τον σταθμό βάσης που εξυπηρετείται. Επιπλέον υπάρχει και η εξωτερική παρεμβολή της κυψέλης (inter-cell interference), η οποία προκαλείται από τις ισχύς εκπομπής των γειτονικών κυψελών. Ένας χρήστης μέσα σε μια κυψέλη λαμβάνει/αισθάνεται εκτός από το ωφέλιμο σήμα του σταθμού βάσης από τον οποίο εξυπηρετείται και σήματα που προέρχονται από γειτονικούς σταθμούς βάσης, αυτά τα εξωτερικά σήματα εκλαμβάνονται ως παρεμβολή για τον συγκεκριμένο χρήστη. Όσο περισσότερο εκπέμπουν οι γειτονικοί σταθμοί βάσης τόσο μεγαλύτερη θα είναι η παρεμβολή σε για τον εν λόγω χρήστη, που σημαίνει ότι θα απαιτεί ακόμη περισσότερη ισχύ εκπομπής από τον σταθμό βάσης που εξυπηρετείται.



Σχ. 2.5. Παρεμβολές στο DL. Με διακεκομμένες γραμμές φαίνονται οι εξωτερικές παρεμβολές και με συνεχής οι εσωτερικές [14].

Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται σε ένα δίκτυο καθορίζει τον παράγοντα επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας (frequency re-use factor), δηλαδή, το ρυθμό στον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια συχνότητα φέροντος, δηλαδή, ο ίδιος διάυλος. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα FDMA οι γειτονικές κυψέλες δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ίδια συχνότητα αφού αυτό θα προκαλούσε διακαναλική παρεμβολή (co-channel interference) ή αλλιώς ομοδιαυλική παρεμβολή. Ομοδιαυλική παρεμβολή είναι η παρεμβολή που προκαλείται μεταξύ των σημάτων που προέρχονται από ομοδιαυλικές κυψέλες. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ομοδιαυλική παρεμβολή δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με απλή αύξηση της ισχύος εκπομπής των αντίστοιχων σταθμών βάσης. Μια τέτοια αύξηση θα αύξανε την παρεμβολή αυτή ακόμη περισσότερο. Από την άλλη μεριά, στο σύστημα CDMA ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας φέροντος μπορεί να είναι ο χαμηλότερος δυνατός, δηλαδή, 1, αυτό σημαίνει ότι οι

γειτονικές κυψέλες μπορούν να λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες άρα όλο το εύρος ζώνης μπορεί είναι διαθέσιμο σε κάθε κυψέλη.



Σχ. 2.6. Παράγοντας επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας σε FDMA/TDMA και CDMA συστήματα.

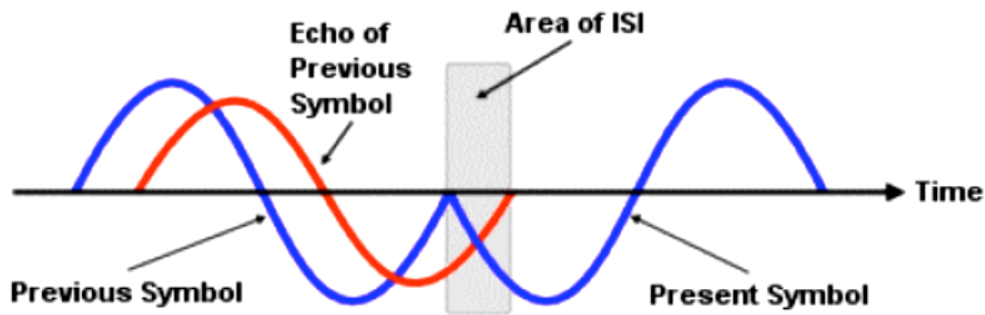
Τα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης OFDMA χρησιμοποιούν την τεχνική πολυπλεξίας OFDM που είναι μια μορφή διαμόρφωσης με την οποία μεταδίδονται περισσότερα του ενός φέροντα σε συχνότητες ορθογωνικές μεταξύ τους. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της OFDM είναι ότι εμφανίζει μεγάλη αντοχή στο θόρυβο και σε λοιπές παρεμβολές καθώς και ότι αντιμετωπίζει ικανοποιητικά το φαινόμενο των πολλαπλών διοδεύσεων (Multipath Effect). Γενικά, το σήμα πριν φτάσει στο δέκτη ανακλάται σε φυσικά εμπόδια γι' αυτό το λόγο οι ανακλάσεις φτάνουν με χρονική καθυστέρηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενδοσυμβολικής παρεμβολής (IntraSymbol Interference) ISI. Η τεχνική OFDM όμως μειώνει την ISI σε σχέση με την διαμόρφωση ενός μόνο φέροντος. Η περιοχή ISI εκφράζει την καθυστέρηση διάδοσης (Delay Spread), και ισχύει προσεγγιστικά,

$$ISI = \frac{t_{\max}}{T_{s,sc}} \quad (2.11)$$

όπου t_{\max} είναι η μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης και $T_{s,sc}$ είναι η περίοδος συμβόλου για διαμόρφωση με ένα φέρον. Στην ISI που έχουμε N φέροντα η περίοδος του συμβόλου γράφεται, $T_s = N \cdot T_{s,sc}$. Άρα η ενδοσυμβολική παρεμβολή γίνεται:

$$ISI = \frac{t_{\max}}{T_s} = \frac{t_{\max}}{N \cdot T_{s,sc}} \quad (2.12)$$

Συγκρίνοντας επομένως τις σχέσεις 2.11 και 2.12 βλέπουμε την μείωση στην ISI λόγω της τεχνικής OFDM.



Σχ. 2.7. Καθυστέρηση διάδοσης και περιοχή ISI.

Χρησιμοποιώντας την τεχνική OFDMA μέσα σε περιβάλλον που περιορίζεται από τις παρεμβολές είναι σχετικά καινούριο, αφού μέχρι προσφάτως το σύστημα OFDMA εφαρμοζόταν κυρίως σε μη-κυψελωτές εφαρμογές οι οποίες περιορίζονταν από τους πόρους της εν λόγω τεχνολογίας τους (εύρος ζώνης). Γι' αυτό και είναι επιθυμητό να αποκτήσουμε καλύτερη γνώση για το πως ένα σύστημα OFDMA αποδίδει με την παρουσία παρεμβολών. Στο σύστημα CDMA, οι παρεμβολές που προκαλούνται από ένα χρήστη είναι ομοιογενείς ως προς το χρόνο, αυτό ισχύει εφόσον κανένας νέος χρήστης δεν εισέρχεται στο σύστημα ή φεύγει από αυτό. Οι παρεμβολές οφείλονται στο cross-correlation μεταξύ των κωδικών εξάπλωσης και μπορούν να θεωρηθούν ως θόρυβος. Η παρεμβολή από την άλλη μεριά που προκαλείται σε ένα OFDMA σύστημα είναι διαφορετική από αυτήν ενός συστήματος CDMA. Το σημαντικότερο είναι ότι δεν υπάρχει παρεμβολή στο εσωτερικό της κυψέλης αφού οι χρήστες παραμένουν ορθογωνικοί μεταξύ τους ακόμα και όταν το σήμα περνάει από πολλαπλή διαδρομή (οι δεσμεύσεις των πόρων πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να σέβονται την ορθογωνικότητα). Ωστόσο, όταν χρήστες από διαφορετικές κυψέλες βρίσκονται στο ίδιο υπο-φέρον κατά την διάρκεια ενός συγκεκριμένου διαστήματος ενός συμβόλου OFDM, τα QPSK ή QAM διαμορφωμένα σήματα καταλαμβάνονται από ανεξήγητες εξασθενήσεις κερδών. Επίσης, όχι μόνο δεν γνωρίζουμε τα σύμβολα και τις εξασθενήσεις των χρηστών που παρεμβάλλονται, αλλά δεν είμαστε σίγουροι σε ποιες μονάδες χρόνου-συχνότητας βρίσκονται οι χρήστες που παρεμβάλλονται.

2.2.1. Μοντελοποίηση παρεμβολών

Στην συνέχεια αναφέρονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιηθούν οι παρεμβολές των CDMA και OFDMA συστημάτων στο DL [3]. Έστω ότι ένας χρήστης u δεσμεύεται σε ένα σταθμό βάσης b , τότε οι διάφορες ποσότητες ισχύων έχουν ως εξής:

- $P_{b,u}$ είναι η ισχύς εκπομπής από τον σταθμό βάσης b προς τον χρήστη u (για το φορτίο κίνησης του χρήστη),
- $P_b = P_{ch} + \sum_u P_{b,u}$ είναι η συνολική ισχύς εκπομπής από τον BS b . Στα CDMA συστήματα, η P_{ch} αναπαριστά την ποσότητα ισχύος που χρησιμοποιείται ώστε να υποστηρίξει τα broadcast και κοινά κανάλια ελέγχου.
- $P_{b,u}$ είναι λαμβανόμενη ισχύς στο χρήστη u από του BS b , μπορούμε να γράψουμε $p_{b,u} = P_{b,u} \cdot g_{b,u}$, όπου η $g_{b,u}$ είναι το μονοπάτι απωλειών μεταξύ του BS b και του MS u ,
- $S_{b,u} = P_{b,u} \cdot g_{b,u}$ είναι η χρήσιμη ισχύς εκπομπής στο MS u από τον BS b (για τα δεδομένα κίνησης) - λόγω του ότι δεν λαμβάνονται υπόψη οι soft παραπομπές μπορούμε να γράψουμε $S_u = S_{b,u}$.

Η συνολική ποσότητα ισχύς που προκαλείται από έναν MS u σε ένα κυψελωτό δίκτυο μπορεί να χωριστεί σε αρκετά μέρη: το χρήσιμο σήμα S_u , τις παρεμβολές και το θόρυβο N_{th} . Μια κοινή μέθοδος είναι να χωρίζονται οι παρεμβολές του συστήματος σε δύο μέρη: $I_u = P_{int,u} + P_{ext,u}$, όπου $P_{int,u}$ είναι η εσωτερική λαμβανόμενη παρεμβολή (της ίδιας της κυψέλης) και $P_{ext,u}$ είναι η εξωτερική παρεμβολή (από τις γειτονικές κυψέλες). Σε αυτό το στάδιο θεωρούμε ότι το χρήσιμο σήμα περιλαμβάνεται στο $P_{int,u}$, γι' αυτό και πρέπει να διαχωριστεί από την εσωτερική παρεμβολή.

Με τις παραπάνω παραδοχές μπορούμε να ορίσουμε τον παράγοντα παρεμβολής για κάθε MS u , ως το λόγο της συνολικής παρεμβολής που προκαλείται από άλλους BSs προς την συνολική παρεμβολή που προκαλείται στο εσωτερικό του BS b που βρίσκεται ο u - οι ποσότητες αυτές θεωρούμε ότι εξαρτώνται από την θέση του χρήστη ως προς τον σταθμό βάσης στον οποίο βρίσκεται:

$$f_u = P_{ext,u} / P_{int,u} . \quad (2.13)$$

Ο συντελεστής a εισάγεται στο μοντέλο έτσι ώστε να μοντελοποιηθεί η έλλειψη τέλει ορθογωνικότητας μεταξύ των κωδίκων και των υπο-φερόντων, στο CDMA και το OFDMA αντίστοιχα.

Στο μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί το SINR ως κριτήριο της ασύρματης ζεύξης. Το γ_u είναι το SINR που υπολογίζεται για στον MS u και γ_u^* είναι το κατώφλι για υπηρεσία που ζητάει ο MS u . Θεωρούμε ότι έχουμε τέλει power control, επομένως το $SINR = \gamma_u^*$ για όλους του χρήστες.

2.2.1.1. CDMA σύστημα

Με βάση τα παραπάνω το SINR που προκαλείται από κάθε χρήστη u , δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\gamma_u^* = \frac{S_u}{a(P_{int,u} - S_u) + P_{ext,u} + N_{th}} \quad (2.14)$$

Από αυτή την σχέση προκύπτει ότι μπορούμε γράψουμε την ισχύ εκπομπής που απαιτείται για έναν MS u , χρησιμοποιώντας την $P_{b,u} = S_b / g_{b,u}$, την $P_{int,u} = P_b \cdot g_{b,u}$ και την εξίσωση 2.13, ως εξής:

$$P_{b,u} = \frac{\gamma_u^*}{1 + a \cdot \gamma_u^*} (a \cdot P_b + f_u \cdot P_b + N_{th} / g_{b,u}) . \quad (2.15)$$

2.2.1.2. OFDMA σύστημα

Στο OFDMA σύστημα, τα δεδομένα πολυπλέκονται πάνω από μεγάλο αριθμό υπο-φερόντων. Εδώ δεν υπάρχει εσωτερική παρεμβολή, αφού στις το σύστημα OFDMA παράγει όλες τις υπο-φέρον συχνότητες έτσι ώστε να είναι ορθογωνικές μεταξύ τους, άρα θεωρούμε τον όρο $a(P_{int,u} - S_u) = 0$. Εφόσον η $P_{ext,u} = \sum_{j \neq b} P_j \cdot g_{j,u}$ η εξίσωση δύο για την περίπτωση του OFDMA μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\gamma_u^* = \frac{P_{b,u} \cdot g_{b,u}}{\sum_j P_{j,u} \cdot g_{j,u} + N_{th}} \quad (2.16)$$

επομένως έχουμε

$$\gamma_u^* = \frac{1}{f_u + \frac{N_{th}}{P_{b,u} \cdot g_{b,u}}} \quad (2.17)$$

Τα μελλοντικά συστήματα κινητών δικτύων θα έχουν ακτίνα κάλυψης μικρότερη του 1 km σε αστικές περιοχές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ισχύει ότι $\frac{N_{th}}{P_{b,u} \cdot g_{b,u}} \ll f_u$, επομένως μπορούμε να παραλείψουμε αυτόν τον όρο και να γράψουμε την σχέση 2.17 ως εξής:

$$\gamma_u^* = \frac{1}{f_u}. \quad (2.18)$$

Κεφάλαιο 3

Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

3.1. Κατάσταση ύπνου σε σταθμό βάσης & Προσαρμογή φυσικών παραμέτρων

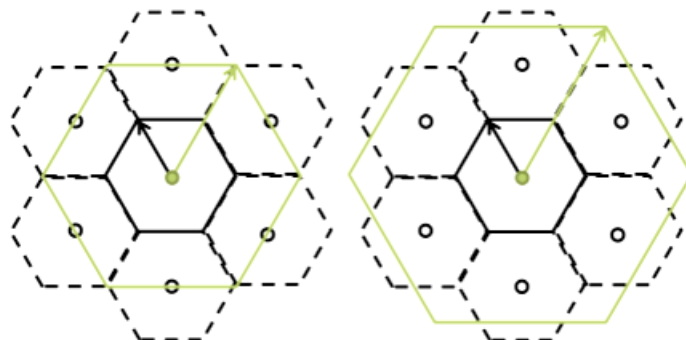
BS sleeping (βλ. [4], [6] και [5]) είναι μια από τις σημαντικότερες τεχνικές για εξοικονόμηση ενέργειας στο σύνολο ενός κινητού δικτύου πρόσβασης. Όταν ένας BS λειτουργεί σε κατάσταση *sleep*, ο εξοπλισμός (σύστημα ψύξης, ενισχυτής ισχύος, κ.α.) απενεργοποιείται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε σημαντικό βαθμό. Αυτή η τεχνική συνεργάζεται τις περισσότερες φορές (αν όχι όλες) με την προσαρμογή φυσικών παραμέτρων του BS, όπως για παράδειγμα την αύξηση της ισχύς εκπομπής του και το ύψος και την κλίση της κεραίας, αντίστοιχα. Οι τελευταίες δυο τεχνικές απαιτούν την προσάρτηση μηχανολογικού εξοπλισμού στο BS γι' αυτό και δεν είναι ευρέως εφαρμόσιμες.

Για την σχεδίαση δικτύων που λειτουργούν με *BS sleeping* απαιτείται η ανάπτυξη αλγορίθμων διαχείρισης των BSs. Αυτοί οι αλγόριθμοι αποφασίζουν πότε ορισμένοι BSs μπορούν να λειτουργούν σε λειτουργία *sleep* και οι υπόλοιποι σε ενεργή λειτουργία αλλά με αυξημένη την ισχύ εκπομπής τους έτσι ώστε να καλύπτουν την περιοχή των απενεργοποιημένων BSs. Τέτοιοι αλγόριθμοι και σχήματα διαχείρισης των BSs έχουν παρουσιαστεί λεπτομερώς στις εργασίες [5] και [6].

3.1.1. Στατική διαχείριση σταθμών βάσης

Στην [6] παρουσιάζεται ένα σύστημα διαχείρισης Micro BSs το οποίο απενεργοποιεί προκαθορισμένο αριθμό του συνόλου των BSs και αυξάνει την ισχύ εκπομπής των υπόλοιπων ώστε να παρέχεται ακτίνας κάλυψης διπλάσια της αρχικής ώστε να διατηρηθεί η κάλυψη σε όλο το δίκτυο. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε εδώ έχει ως στόχο να διατηρήσει το επίπεδο της πιθανότητας μπλοκαρίσματος σε αυτό που ορίζεται αρχικά, όπως για παράδειγμα το 1%, που είναι η πιθανότητα μπλοκαρίσματος για υπηρεσία φωνής.

Ο στόχος σε αυτήν την εργασία είναι η απενεργοποίηση μερικών BSs όταν το φορτίο στους αντίστοιχους BSs είναι χαμηλό. Αποφασίζεται ο αριθμός των BSs που απενεργοποιείται και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες μια απενεργοποίηση είναι δυνατή. Στον αλγόριθμο λαμβάνονται υπόψη ότι, πρώτον, οι κυψέλες που δεν είναι απενεργοποιημένες πρέπει να παρέχουν κάλυψη σε όλη την περιοχή, και για να γίνει αυτό απαιτείται η αύξηση της ισχύς εκπομπής, και δεύτερον, όταν αυξάνεται η ακτίνα κάλυψης αυξάνεται επίσης και η κίνηση, επομένως πρέπει να εγγυάται η ποιότητα υπηρεσίας στους χρήστες.



3.1.2. Δυναμική διαχείριση σταθμών βάσης

Η εργασία [5] αναφέρεται επίσης στο πρόβλημα εξοικονόμησης ενέργειας όταν η κίνηση είναι χαμηλή, το οποίο και αντιμετωπίζει με την απενεργοποίηση μερικών Micro BSs. Στην εργασία εισάγεται η μελέτη του cell zooming το οποίο εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό στην εξισορρόπηση του φορτίου κίνησης σε κατάσταση υψηλής κίνησης. Με αυτόν τον τρόπο δίνονται δυναμικά χαρακτηριστικά για τον έλεγχο των πόρων.

Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας των σταθμών βάσης ενώ εγγυάται η μέγιστη δυνατή κάλυψη και η ποιότητα υπηρεσιών ως προς τους κινητούς χρήστες. Οι περιορισμοί για τη μοντελοποίηση του προβλήματος είναι δυο: κάθε MS εξυπηρετείται μόνο από ένα BS και το εύρος ζώνης που δεσμεύεται σε ένα BS από τους χρήστες δεν μπορεί να ξεπεράσει το μέγιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Θεωρούν ότι οι εσωτερικές παρεμβολές είναι μηδενικές. Λόγω του ότι το πρόβλημα είναι αρκετά δύσκολο για να λυθεί, προτείνουν δύο τρόπους λύσης, τον κεντρικοποιημένο και τον κατανεμημένο αλγόριθμο. Οι αλγόριθμοι εκτελούνται ανά μια περίοδο (1 ώρα), η οποία αποτελείται από τρία στάδια, το στάδιο συλλογής πληροφοριών, το στάδιο προσαρμογής φυσικών παραμέτρων των BSs και το στάδιο εξυπηρέτησης κινητών χρηστών - το δυο πρώτα στάδια θεωρούν ότι διαρκούν ελάχιστα σε σχέση με το τρίτο, επομένως η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος προκύπτει αποκλειστικά από αυτό.

Στον κεντρικοποιημένο αλγόριθμο οι MSs στέλνουν δεδομένα για την κατάσταση του καναλιού προς τους BSs. Αυτά συλλέγονται και συνοψίζονται μαζί με το διαθέσιμο εύρος ζώνης του κάθε BS από ένα φορέα που διαχειρίζεται το δίκτυο. Η κεντρική ιδέα του αλγορίθμου είναι να θέτει σε κατάσταση ύπνου τους BSs που διαθέτουν το μικρότερο φορτίο κίνησης στο δίκτυο. Και οι σταθμοί βάσης που παραμένουν σε ενεργή κατάσταση έχουν την ευθύνη για την εξυπηρέτηση του δικτύου. Λόγω του ότι αρκετοί κινητοί χρήστες φτάνουν στο δίκτυο κατά την περίοδο εξυπηρέτησης, οι BSs δεσμεύουν εύρος ζώνης έτσι ώστε να αποφευχθεί μεγάλη διακοπή λειτουργίας των χρηστών, με βάση το παρακάτω τύπο:

$$\tilde{B}_j = (1 - a_j)B_j \quad (3.1)$$

όπου $a_j \in [0,1]$ είναι το ποσοστό του εύρους ζώνης B_j που δεσμεύει ένας BS j για το στάδιο σερβιρίσματος. Γνωρίζοντας το σύνολο των χρηστών M που δεσμεύονται σε ένα σταθμό βάσης j τότε είναι δυνατόν να προσδιορισθεί το φορτίο κίνησης από τον εξής τύπο:

$$L_j = \sum_{M_j} \frac{b_{ij}}{B_j} \quad (3.2)$$

όπου b_{ij} είναι εύρος ζώνης που χρειάζεται να δεσμεύσει ένας χρήστης. Κάθε χρήστης i στο δίκτυο δεσμεύεται σε ένα BS j αν ισχύει ο περιορισμός $L_j B_j + b_{ij} \leq \tilde{B}_j$, αν δεν υπάρχει αρκετό εύρος ζώνης ή ο χρήστης βρίσκεται εκτός κάλυψης τότε ο χρήστης μπλοκάρεται και δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί.

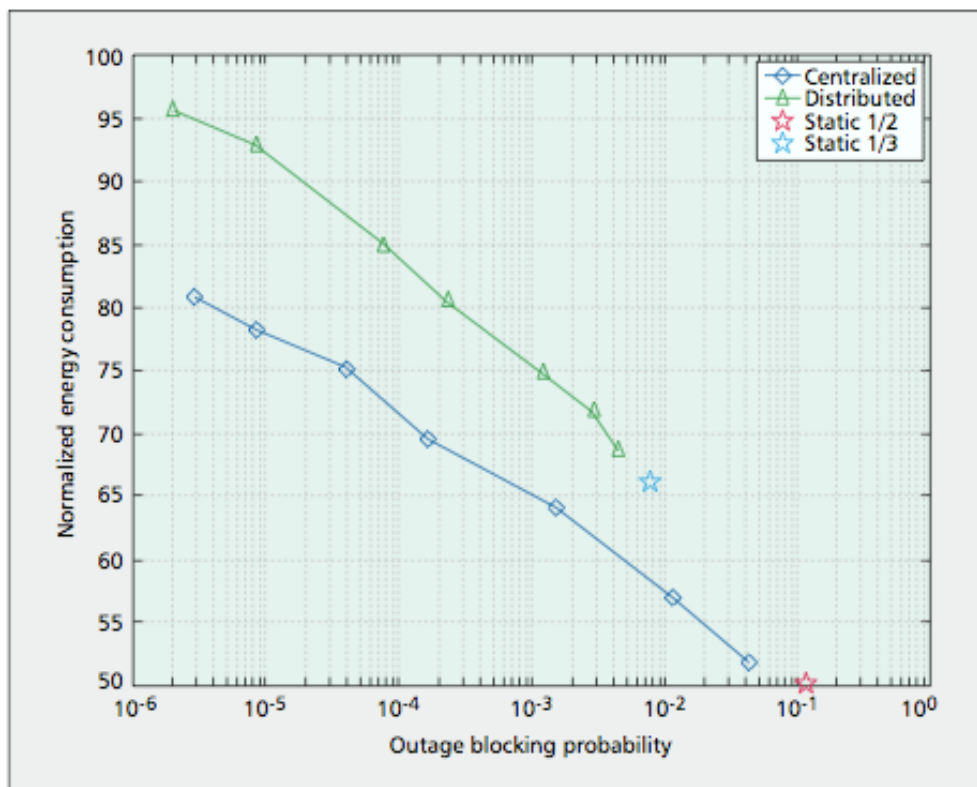
Από την άλλη μεριά ο κατανεμημένος αλγόριθμος δεν απαιτεί οι πληροφορίες που συλλέγονται για την κατάσταση του καναλιού να είναι γνωστές από το δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση ο

κινητός χρήστης επιλέγει τον BS που θα τον εξυπηρετήσει σε σχέση με την μεγιστοποίηση μιας συνάρτησης ωφέλειας (utility function), η οποία συνάρτηση δίνεται από τον εξής τύπο:

$$U(\omega_{ij}, L_j, a_j) = \begin{cases} \frac{\omega_{ij}(L_j B_j + b_{ij})}{\tilde{B}_j} & L_j B_j + b_{ij} \leq \tilde{B}_j \\ 0 & L_j B_j + b_{ij} > \tilde{B}_j \end{cases} \quad (3.3)$$

Με αυτόν τον τρόπο όσοι σταθμοί βάσης δεν εξυπηρετούν αρκετούς κινητούς χρήστες θα απενεργοποιηθούν.

Τέλος, θεωρώντας ότι ένας σταθμός βάσης σε ενεργή κατάσταση καταναλώνει 400 *Watts* και σε κατάσταση ύπνου 10 *Watts* τρέχουν μερικές προσομοιώσεις και συγκρίνουν την κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των κινητών χρηστών στο δίκτυο. Επιπλέον συγκρίνουν διάφορες στατικές διατάξεις απενεργοποίησης σταθμών βάσης σε σχέση με τις αποδόσεις των προτεινομένων αλγορίθμων.



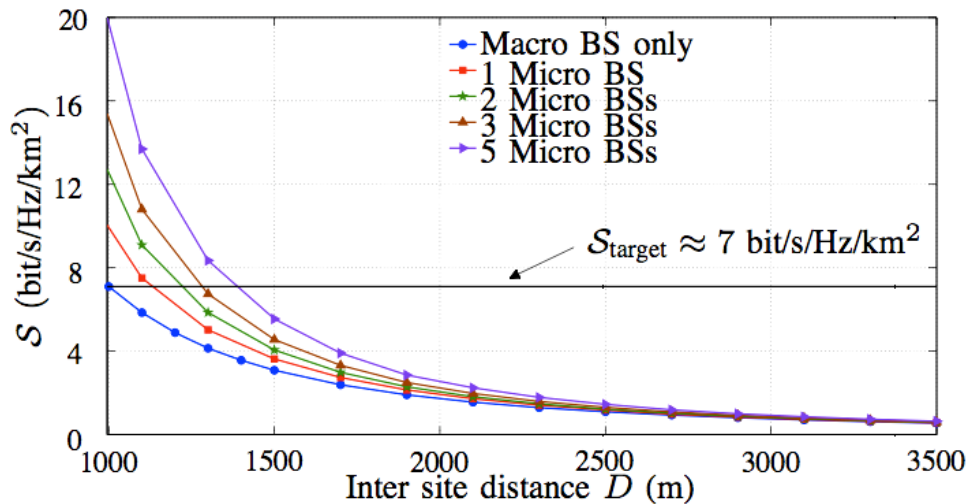
Σχ. 3.2. Σχέση μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και διακοπής λειτουργίας, [5].

3.2. Υβριδικές διατάξεις δικτύων για ενεργειακή αποδοτικότητα

Η [7] ερευνά τις επιπτώσεις των τοπολογιών κινητών δικτύων πρόσβασης σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειάς τους. Η εργασία εισάγει την κατανάλωση ενέργειας ανά εμβαδόν κάλυψης ως μέτρο επίδοσης του συστήματος. Αναπτύσσονται γραμμικά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας για συμβατικούς σταθμούς βάσης Macro cell και σταθμούς βάσης χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας Micro cell και αξιοποιούνται για την εύρεση της κατανάλωσης ενέργειας ανά εμβαδόν κάλυψης. Για τα μοντέλα αυτά ισχύει ότι η κατανάλωση ενέργειας των Micro cell έχουν άμεση εξάρτηση με

το φορτίο κίνησης, το οποίο σημαίνει ότι έχουν δυναμικά χαρακτηριστικά, ενώ η κατανάλωση ενέργειας στα Macro cell καθορίζεται μόνο από στατικά χαρακτηριστικά.

Για την επίδοση των διαφόρων τοπολογιών που αποτελούνται από Macro cell και Micro cell ταυτόχρονα μελετάται πόση ενέργεια καταναλώνεται ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο για κάθε τοπολογία σε σχέση με την απόσταση που είναι τοποθετημένα δυο γειτονικά Macro cell. Επιπλέον ελέγχεται ακόμη ένα μέτρο επίδοσης ενός δικτύου, η αποδοτικότητα φάσματος ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο για κάθε τοπολογία σε σχέση με την απόσταση δυο γειτονικών Macro cell.



Σχ. 3.3. Αποδοτικότητα φάσματος ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ως συνάρτηση της απόστασης δυο γειτονικών Macro cell για διάφορες τοπολογίες, [7].

3.3. Πράσινες τεχνολογίες υλικού για κινητά δίκτυα πρόσβασης

Στην [8] γίνεται αναφορά στην ανάπτυξη ενός ενεργειακά αποδοτικού σταθμού βάσης. Η NEC ανέπτυξε έναν όλα-σε-ένα συμπαγή σταθμό βάσης LTE ο οποίος περιλαμβάνει μονάδα RF, μονάδα baseband και μονάδα εκπομπής (κεραία), που μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε, για παράδειγμα, σε τοίχους και σε ιστούς κεραιών.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας ενός σταθμού βάσης είναι ο ενισχυτής ισχύς και ο κλιματισμός. Σε περιόδους με μέτριο προς υψηλό φορτίο κίνησης η αποδοτικότητα του ενισχυτή ισχύς είναι κρίσιμη. Ενώ σε περιόδους χαμηλού φορτίο κίνησης η κατανάλωση ενέργειας προκαλείται κυρίως από το κλιματισμό. Γι' αυτό το λόγο η NEC εισάγει την τεχνολογία ψύξης χωρίς κλιματισμό (fanless) για την εξοικονόμηση ενέργειας.



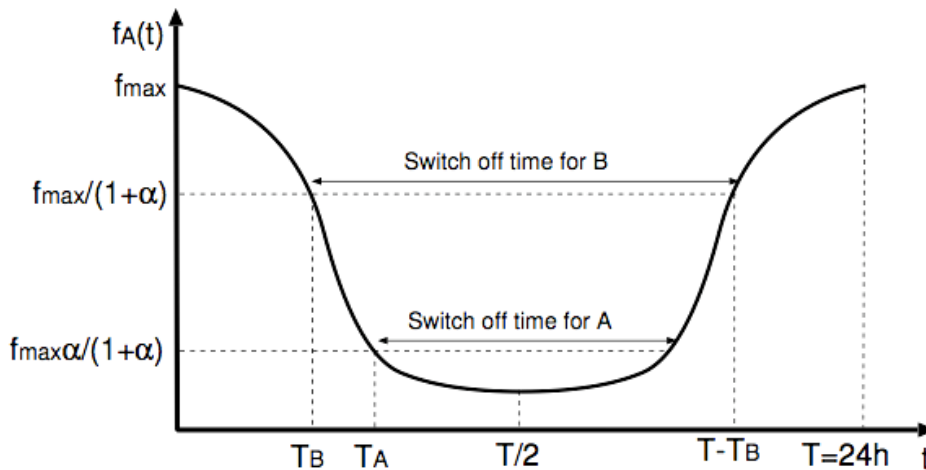
Σχ. 3.4. Συμπαγής σταθμός βάσης LTE με ψύξη χωρίς κλιματισμό (fanless), [8].

Η NEC ανέπτυξε ένα από τους πιο αποδοτικούς ενισχυτές ισχύς στον κόσμο για σταθμούς βάσης. Εκπέμπει στα 2.1 GHz και παράγει στην έξοδο 45 *Watts* ισχύς εκπομπής με είσοδο 100 *Watts* κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ενισχυτές αυτοί προέκυψαν από την υιοθέτηση τεχνολογίας υψηλών επιδόσεων και υψηλής ακρίβειας RF transistor, και επιπλέον από την χρήση των βελτιστοποιημένων RF κυκλωμάτων Doherty. Το αποτέλεσμα είναι η ανάπτυξη ενισχυτών ισχύς με αποδοτικότητα 45%. Στο μέλλον η NEC στοχεύει να αναπτύξει ενισχυτές ισχύς με αποδοτικότητα 55-60%, υιοθετώντας ψηφιακές τεχνολογίες ενισχυτών.

Σε έναν συμβατικό σταθμό βάσης, ο κλιματισμός καταναλώνει περίπου το 10-20% της συνολικής ενέργειας. Η NEC χρησιμοποιώντας ένα σύστημα μεταφοράς ψύξης κατάφερε να παρέχει ψύξη σε ένα σταθμό βάσης χωρίς κλιματισμό. Το σύστημα λειτουργεί με τον εξής τρόπο: η θερμότητα ακτινοβολείται μέσω της εμπρόσθιας ψύκτρας χωρίς την συμβολή ανεμιστήρα ψύξης. Εκτός από εξοικονόμηση ενέργειας, η αρχιτεκτονική ψύξης χωρίς κλιματισμό μειώνει επίσης την ηχορύπανση και ενισχύει την αξιοπιστία και συντηρητικότητα με την αφαίρεση του μηχανολογικού εξοπλισμού από τον σταθμό βάσης.

3.4. Συνεργασία παρόχων κινητών δικτύων πρόσβασης

Στην εργασία [9] γίνεται αξιολόγηση της εξοικονόμησης ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί με ένα σύστημα διαχείρισης των κινητών δικτύων πρόσβασης με συνεργασία δυο παρόχων που εξυπηρετούν την ίδια περιοχή. Αξιολογείται η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να εξοικονομηθεί χρησιμοποιώντας και τα δυο δίκτυα σε κατάσταση που η κίνηση είναι υψηλή, αλλά απενεργοποιείται το ένα από τα δύο κατά την περίοδο που η κίνηση είναι χαμηλή, και η ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να ικανοποιηθεί από το ένα δίκτυο και μόνο. Οπότε όταν το ένα από τα δύο δίκτυα είναι απενεργοποιημένο, πρέπει να επιτρέπεται στους χρήστες η περιαγωγή στο δίκτυο που παραμένει ενεργό.



Σχ. 3.5. Πρότυπο ημερήσιας κίνησης ενός δικτύου A, $f_A(t)$, και περίοδοι κατά τις οποίες είναι δυνατόν να απενεργοποιηθούν τα δίκτυα A και B (μόνο ένα δίκτυο μπορεί να απενεργοποιηθεί κάθε φορά) $\alpha = f_B(t) / f_A(t)$, [9].

Διάφορες παραλλαγές έχουν μελετηθεί όσον αφορά το πρότυπο απενεργοποίησης, αυτές είναι, a) η ισορρόπηση της συχνότητας απενεργοποίησης των δυο παροχέων (balanced switch-off frequencies), δηλαδή, ορίζεται ένα ποσοστό για κάθε δίκτυο που αναφέρεται αν ένα δίκτυο παραμένει ενεργοποιημένο κατά την διάρκεια χαμηλής κίνησης της μιας ημέρας ή όχι, b) η ισορρόπηση του κόστους περιαγωγής, όπου εκτιμάται η κίνηση που εξυπηρετεί το δίκτυο A όταν το δίκτυο B είναι απενεργοποιημένο - τα κόστη θεωρούνται ίσα έτσι ώστε να μην απαιτείται η μεταφορά χρημάτων από τον ένα πάροχο στον άλλο για την κίνηση που εξυπηρετεί, c) η ισορρόπηση της εξοικονόμησης ενέργειας, και τέλος, d) η μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας.

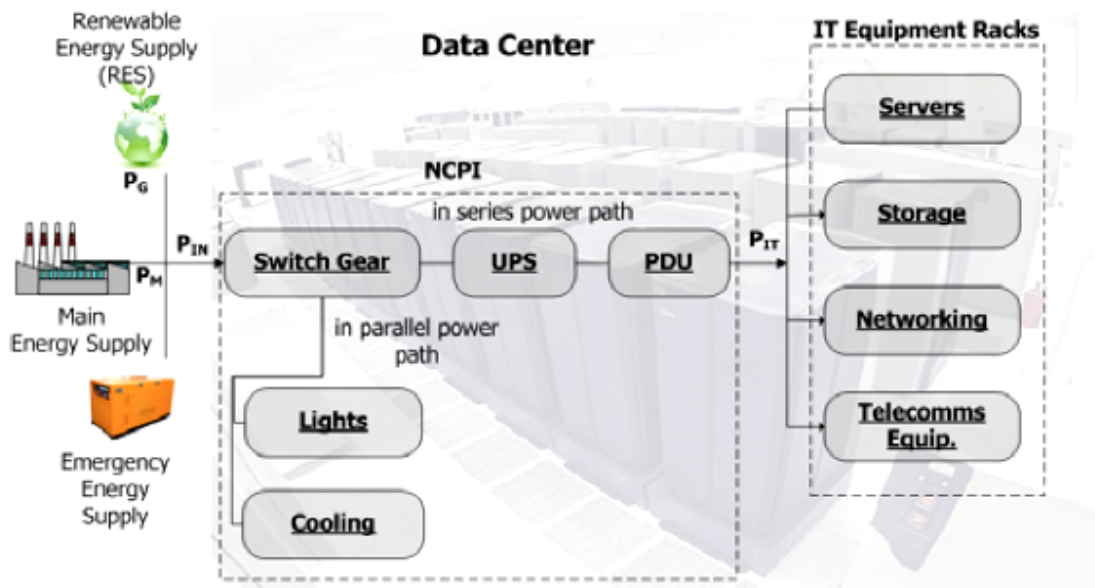
Η πιο ενδιαφέρουσα παρατήρηση που προκύπτει από τα αποτελέσματα είναι ότι η συνύπαρξη δυο παρόχων κινητών δικτύων πρόσβασης στην σημερινή αγορά δεν είναι ενεργειακά αποδοτική, γι' αυτό και νέες πράσινες προσεγγίσεις στα δίκτυα, απαιτούν νέες συμπεριφορές συνεργασίας μεταξύ των παρόχων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ποσότητα εξοικονόμησης ενέργειας είναι ουσιαστική - της τάξης του 20% και πάνω. Επίσης τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μια ενεργειακά αποδοτική προσέγγιση μεταξύ παρόχων κινητών δικτύων πρόσβασης συμβαδίζει με την παρούσα τάση, η οποία έχει να κάνει με την χρήση ενός κινητού δικτύου πρόσβασης από μερικούς εικονικούς παρόχους.

3.5. Πράσινα κέντρα δεδομένων

Στην εργασία [10] αναφέρονται ζητήματα κατανάλωσης ενέργειας σε ένα κέντρο δεδομένων (data center) και πως αυτό μπορεί να γίνει πιο πράσινο. Η αποδοτικότητα σε μεμονωμένα μέρη ενός κέντρου δεδομένων είναι σημαντικό βήμα για να γίνει πιο πράσινο αλλά η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται όταν η αποδοτικότητα στοχεύει στη σχεδίαση του κέντρου δεδομένων συνολικά.

Ένα τυπικό κέντρο δεδομένων αποτελείται από τα τμήματα NCPI (Non Critical Physical Infrastructure) και IT. Η ηλεκτρική ενέργεια εισέρχεται στο τμήμα NCPI και καταναλώνεται από δυο μονοπάτια, το σε σειρά και το παράλληλο μονοπάτι έτσι ώστε να τροφοδοτήσουν το switchgear και το σύστημα ψύξης, αντίστοιχα. Στο switchgear η απώλεια ενέργειας συμβαίνει σε μορφή θερμότητας και προέρχεται από τα UPS και PDU λόγω των μετατροπέων AC/DC/AC αυτά περιέχουν. Συμβατικά UPS εμφανίζουν αποδοτικότητα 80%. Το παράλληλο μονοπάτι τροφοδοτεί

το σύστημα ψύξης το οποίο είναι υπεύθυνο για την προστασία από την υψηλή θερμοκρασία σε ένα κέντρο δεδομένων και χρησιμοποιεί υγρές ψύκτρες και ανεμιστήρες. Παρατηρήθηκε ότι η συνολική ενέργεια σε ένα κέντρο δεδομένων κατανέμεται σε 70 και 30% στα τμήματα NCPI και IT, αντίστοιχα.



Σχ. 3.6. Δομή ενός τυπικού κέντρου δεδομένων, [10].

Η κατανάλωση ενέργειας σε ένα κέντρο δεδομένων μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του χρόνου και διάφορων άλλων παραμέτρων όπως ο φόρτος εργασίας - που αντιστοιχεί στο φορτίο κίνησης - και στα χαρακτηριστικά του περιβάλλον χώρου που βρίσκεται το κέντρο. Ο εξοπλισμός IT παρουσιάζει μεταβαλλόμενες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας και μεταβλητή ενεργειακή αποδοτικότητα, και οι δυο παράγοντες εξαρτώνται από το εισερχόμενο φορτίο κίνησης. Η κύρια πηγή απώλειας ενέργειας οφείλονται στις μονάδες ισχύος, όπως τα UPS, οι μετατροπείς κ.α., τα οποία UPS λειτουργούν σε κατάσταση μεγαλύτερη από τις απαιτήσεις της κίνησης σε ώρες αιχμής έτσι ώστε να αποφεύγεται η λειτουργία τους κοντά στο όριο των δυνατοτήτων τους κατά τη διάρκεια αυτών των ωρών, επιπλέον και ο εξοπλισμός ψύξης καταναλώνει επιπλέον ενέργεια έτσι ώστε να μεταφέρει ψυχρό αέρα σε όλες τις διαστάσεις του κέντρου δεδομένων.

Πιν. 3.1. Κατανομή απώλειας ισχύος σε ένα τυπικό κέντρο δεδομένων, [10].

NCPI equipments	Percentage of Power Consumption [Total 70%]	IT equipments	Percentage of Power Consumption relative to [Total 30%]
Chiller	33	System	25
CRAC	9	Discs	5
UPS	19	Power Supply	13
PDU	5	Networking	9
Switchgear, Lights	4	CPU	40
		Memory	8

3.6. Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε σταθμούς βάσης

3.6.1. Ηλιακή ενέργεια για σταθμούς βάσης

Η εργασία [11] αναφέρει τη χρησιμότητα των εναλλακτικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορούν εφαρμοστούν σε κυψελωτούς σταθμούς βάσης. Σε αυτό το σημείο γίνεται συζήτηση για την ηλιακή ενέργεια που εισέρχεται σε ένα σταθμό βάσης. Η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων εξαρτάται κυρίως από το περιβάλλον που είναι εγκατεστημένος ο σταθμός βάσης και είναι αποδοτικότερη συνήθως σε νότιες περιοχές όπου η διάρκεια της ηλιοφάνειας είναι αυξημένη σε σχέση με περιοχές του βορρά.

Η υψηλότερη απαίτηση ισχύος από έναν τυπικό σταθμό βάσης είναι στα 48Vdc τάση. Γι' αυτό το λόγω είναι πιο αποδοτικό να χρησιμοποιήσει κανείς μετατροπέα DC/DC ο οποίος μπορεί να μετατρέψει απευθείας την μη-ρυθμιζόμενη DC τάση και το ρεύμα ενός ηλιακού συλλέκτη σε ρυθμιζόμενη τάση εξόδου για το εξοπλισμό του BS. Για να επιτραπεί η απευθείας παράλληλη τροφοδοσία σε κοινό κανάλι ισχύος από ηλιακούς μετατροπείς και ανορθωτές ή τεχνολογίες μετατροπέων DC/DC, απαιτείται μια έξυπνη μονάδα ρύθμισης και ελέγχου. Όσο υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, οι ηλιακοί μετατροπείς συνεισφέρουν στον BS τροφοδοσία και αν είναι δυνατόν μπορούν ακόμη να φορτίσουν την μπαταρία.

Από την άλλη μεριά όμως υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα στη χρήση ηλιακής ενέργειας που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι ηλιακοί μετατροπείς μπορούν μεταφέρουν ενέργεια μόνο κατά την διάρκεια ωρών ηλιοφάνειας, γι' αυτό κατά την διάρκεια της νύκτας ή συννεφιασμένων ημερών άλλες πηγές πρέπει να φροντίσουν την λειτουργία του σταθμού βάσης. Ακόμη, μεγάλοι σε μέγεθος ηλιακοί συλλέκτες είναι ακριβοί και απαιτούν σημαντικό χώρο, γι' αυτό τον λόγο η ηλιακή ενέργεια είναι χρήσιμη μόνο για εφαρμογές με χαμηλή ζήτηση DC ισχύ της τάξης μικρότερης των 2000 *Watts*. Επίσης είναι σημαντικό ο ηλιακός συλλέκτης να μην καλύπτεται από σκίαση ή ρύπανση. Εκτός όμως από τους τεχνικούς περιορισμούς είναι σημαντικό οι ηλιακοί συλλέκτες να προστατεύονται από πιθανή κλοπή σε αραιοκατοικημένες περιοχές.

Συνοψίζοντας, στην εργασία αναφέρεται ότι η ηλιακή ενέργεια είναι ένα καλό μέσο για εξοικονόμηση ενέργειας αλλά δεν είναι αξιόπιστο για να εφαρμοστεί ευρέως σε χώρες του βορρά.

3.6.2. Αιολική ενέργεια για σταθμούς βάσης

Η εργασία [11] αναφέρεται και στην αιολική ενέργεια επίσης. Για την παραγωγή σημαντικού ποσοστού ενέργειας από τις αιολικές γεννήτριες, σημαντικός παράγοντας είναι η τοποθεσία του BS. Οι αποδοτικότερες τοποθεσίες για αιολικές γεννήτριες είναι αυτές κοντά στην ακτή, στο βουνό ή σε νησιά.

Υπάρχουν δυο είδη ανεμόμυλων, ο οριζόντιος και ο κάθετος τύπος. Ο κάθετος τύπος εμφανίζει καλά αποτελέσματα σε μικρού μεγέθους ανεμόμυλους, ενώ ο οριζόντιος αποσκοπεί στην παραγωγή μεγάλης κλίμακας ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι για ένα σταθμό βάσης με κατανάλωση ενέργειας μερικών *kWatts* ο κάθετος τύπος ανεμόμυλου παρουσιάζει σημαντικά οφέλη αφού αυτός λειτουργεί ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του ανέμου, παράγει χαμηλό ηχητικό θόρυβο, και απαιτεί ελάχιστη συντήρηση.

Για πράσινους BSs είναι σημαντικό η αιολική ενέργεια να μετατρέπεται σε ρυθμιζόμενη έτσι ώστε με αυτό τον τρόπο να μπορεί να συνδεθεί στο ίδιο κανάλι DC ισχύος με αυτό που εισέρχεται και η ενέργεια από άλλες πηγές, όπως η ηλιακή κ.α.

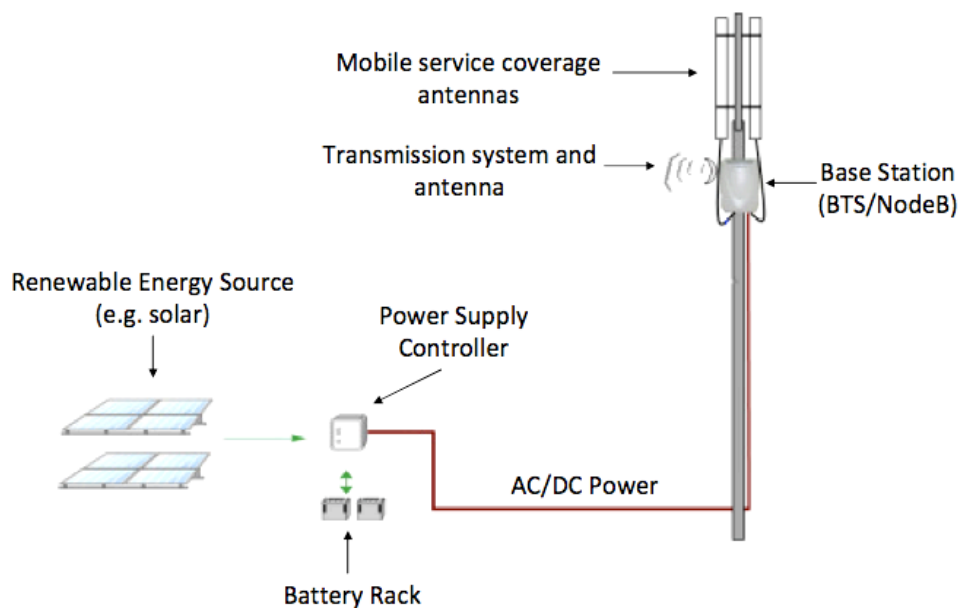
Σε σχέση με την ηλιακή ενέργεια, η αιολική δεν είναι τόσο αξιόπιστη στους σταθμούς βάσης, επομένως εναλλακτικές πηγές ενέργειας απαιτούνται έτσι ώστε να τροφοδοτήσουν τον σταθμό

βάσης εάν δεν υπάρχουν αρκετός άνεμος. Στην εργασία επισημαίνεται ότι πρέπει να γίνει μελέτη του ανέμου στην περιοχή κατά την φάση του σχεδιασμού διότι λανθασμένα δεδομένα ή υψηλές προσδοκίες μπορεί να οδηγήσουν σε μη επιθυμητά αποτελέσματα και σε σπατάλη επενδύμενου χρήματος.

3.6.3. Περιγραφή συστήματος

Στην [12] περιγράφεται το σύστημα που χρησιμοποιείται σήμερα στους σταθμούς βάσης έτσι ώστε να υποστηρίξουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ο σταθμός βάσης τροφοδοτείται με ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακούς συλλέκτες. Παρόλα αυτά μπορεί να συνδυαστεί και ανεμογεννήτρια, κ.α. Σε περίπτωση που η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας δεν παράγει αρκετή ισχύ ώστε να καλύψει την ζήτηση του σταθμού βάσης, αυτός τροφοδοτείται επιπλέον από την εφεδρική μπαταρία, είτε σε συνδυασμό αυτών των δυο, είτε αποκλειστικά από την μπαταρία. Από την άλλη μεριά όταν η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας παράγει περισσότερη ενέργεια από αυτήν που χρειάζεται ο BS, αυτή αποθηκεύεται στην εφεδρική μπαταρία. Στην είσοδο ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού βάσης τοποθετείται ο ελεγκτής της τροφοδοσίας του, ο οποίος διαχειρίζεται ποια πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του BS και για το αν η εφεδρική μπαταρία επαναφορτίζεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή όχι.



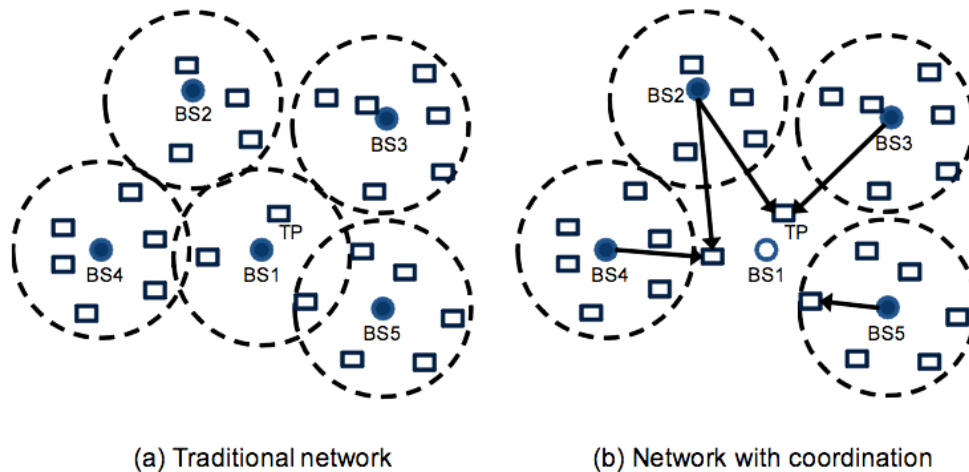
Σχ. 3.7. Διάγραμμα των σχετικών στοιχείων ενός σταθμού βάσης που τροφοδοτείται με ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Φαίνεται μια περίπτωση εφεύρεσης η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σήμερα, [12].

3.7. Άλλες τεχνικές

3.7.1. Συνεργασία σταθμών βάσης

Μια τεχνική η οποία μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην επέκταση την κάλυψης είναι η συνεργαζόμενη πολλαπλή μετάδοση (Coordinated Multi-Point transmission) CoMP, που σχεδιάζεται για τα κινητά δίκτυα LTE-Advanced. Η βασική ιδέα στο CoMP είναι ότι οι γειτονικοί σταθμοί συντονίζονται στην από κοινού μετάδοση. Στο Σχ. 3.8. φαίνονται οι χρήστες (τετράγωνο)

και οι BSs (κύκλος), η κάλυψη των BSs ορίζεται από την διακεκομμένη γραμμή. Αν οι BSs λειτουργούν χωρίς συνεργασία τότε όλοι οι σταθμοί βάσης πρέπει να λειτουργούν έτσι ώστε να καλύψουν την περιοχή κάλυψής τους (Σχ. 3.8. (a)). Αλλιώς αν οι γειτονικοί BSs μπορούν να συνεργαστούν στην μετάδοση (για παράδειγμα ο BS2 με τον BS3 και ο BS4 με τον BS2) ώστε να αυξήσουν την κάλυψή τους, τότε οι 3 χρήστες του BS1 μπορούν να καλυφθούν από τους υπόλοιπους και αυτός να απενεργοποιηθεί (Σχ. 3.8. (b)), [13].

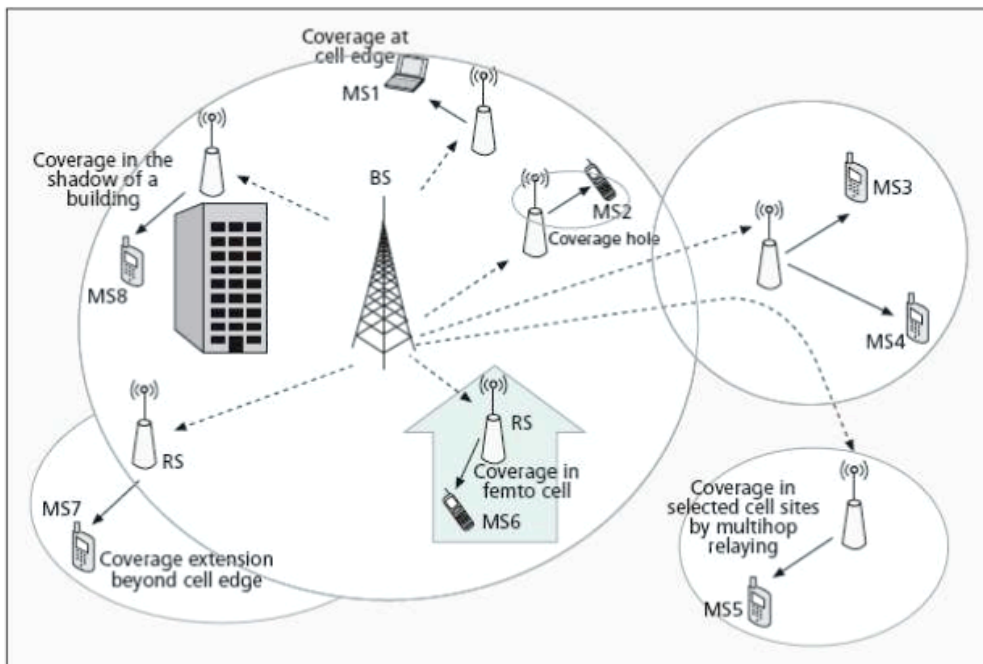


Σχ. 3.8. Επέκταση κάλυψης με συνεργαζόμενες μεταδόσεις, [13].

3.7.2. Σταθμοί αναμετάδοσης

Οι σταθμοί αναμετάδοσης (Relay Stations) RSs εγκαθίστανται σε κινητά δίκτυα έτσι ώστε να βελτιώσουν την επίδοση των χρηστών σε περιοχές όπως τα σύνορα ενός Macro BS, να επεκτείνουν την κάλυψη ενός BS, και να ισορροπήσουν το φορτίο μεταξύ δυο γειτονικών BSs, [5].

Οι RSs σχεδιάζονται έτσι ώστε να ικανοποιούν διάφορες ανάγκες των μελλοντικών δικτύων 3GPP LTE-A, όπως κάλυψη και χωρητικότητα, γι' αυτό και θα είναι μια σημαντική τεχνική τέτοιων δικτύων. Καταναλώνουν ελάχιστη ενέργεια λόγω του μικρού μεγέθους που έχουν και επίσης συνδέονται στο κεντρικό δίκτυο ασύρματα, γεγονός που τους κάνει φτηνούς και ευέλικτους στην ανάπτυξή τους, αφού η εγκατάσταση συμβατικών σταθμών βάσης είναι ακριβότερη και χρονοβόρα.



Σχ. 3.9. Παραδείγματα σεναρίων για εγκατάσταση RSs, [32].

Η επέκταση της κάλυψης αναφέρεται στην χρήση RSs ώστε να επεκτείνουν την κάλυψη ενός σταθμού βάσης. Αυτό είναι χρήσιμο στις μελλοντικές γενιές δικτύων - για να αποφεύγεται η επιπλέον τοποθέτηση σταθμών βάσης - ώστε να επεκταθεί η κάλυψη όπου η απευθείας σύνδεση του χρήστη με τον κεντρικό BS δεν είναι άριστη. Για παράδειγμα αυτό μπορεί να συμβεί στα σύνορα ενός κεντρικού σταθμού βάσης, σε σκίαση που προκαλείτε από ψηλά κτίρια, σε εσωτερικές περιοχές κτιρίων, σε υπόγειες περιοχές κ.α.

3.7.3. Beamforming

Η τεχνική beamforming μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ενός σταθμού βάσης. Για την τεχνική αυτή απαιτούνται έξυπνες προσαρμοστικές κεραιές (adaptive antennas) που μέρος της εκπεμπόμενης ισχύς της κεραιάς επικεντρώνεται στην κατεύθυνση και μόνο του δέκτη. Αυτό επιτρέπει χαμηλότερες απαιτήσεις από την ισχύ εκπομπής εξόδου του σταθμού βάσης.

3.7.4. Εξάρτηση κατανάλωση ενέργειας από το φορτίο κίνησης

Είναι σαφές ότι η κατανάλωση ενέργειας δεν εξαρτάται σημαντικά από το φορτίο κίνησης ενός BS. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι αρκετά περιεχόμενα του BS δεν σχεδιάζονται έτσι ώστε να προσαρμόζουν την κατανάλωση ενέργειάς τους. Το καλύτερο παράδειγμα είναι ο κλιματισμός ο οποίος σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί συνεχώς στο επίπεδο όπου η κατανάλωση ενέργειας των υπόλοιπων περιεχομένων του σταθμού βάσης είναι μέγιστη.

Κεφάλαιο 4

Μαθηματικό και Θεωρητικό Υπόβαθρο του Αλγοριθμικού Μοντέλου

4.1. Εισαγωγή

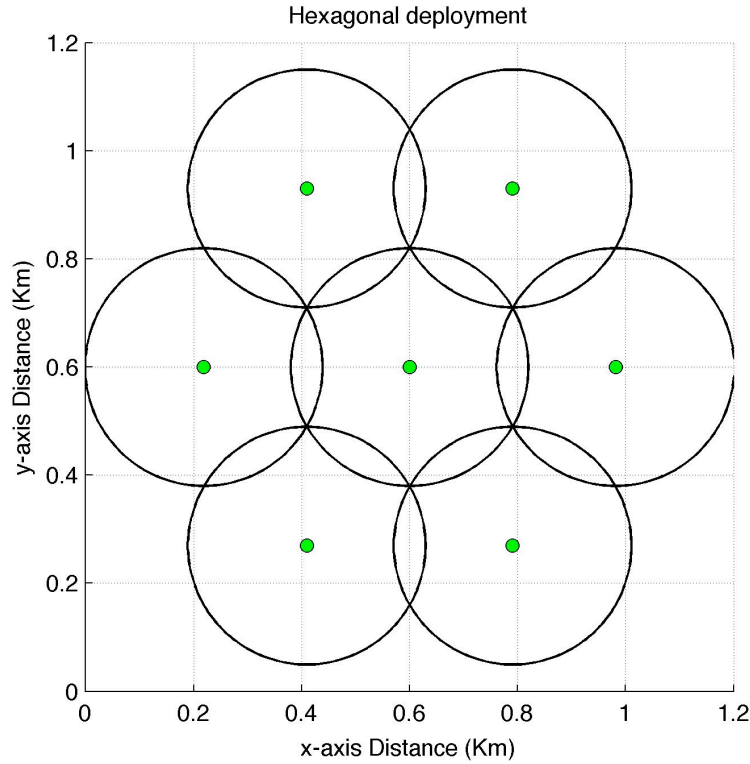
Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η ανάλυση της κάτω ζεύξης (DownLink, DL) των συστημάτων CDMA, των κυψελωτών δικτύων με τεχνολογία UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), για την εκτίμηση της χωρητικότητά τους και την δέσμευση ισχύος των σταθμών βάσης (Node B) από τους χρήστες.

Στην πραγματικότητα στα συστήματα UMTS η χωρητικότητα στο DL περιορίζεται από την μέγιστη διαθέσιμη ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης (Base Station, BS), αφού αυτή η ισχύς θεωρείται κοινός πόρος για όλους τους κινητούς χρήστες (Mobile stations, MSs) και μοιράζεται σ' αυτούς μέσα στην κυψέλη. Το όριο αυτό της χωρητικότητας DL είναι γνωστό ως “soft” όριο. Η χωρητικότητα στο DL της κυψέλης μπορεί να μειωθεί σημαντικά αν ένας χρήστης δεσμεύσει σημαντικό ποσοστό αυτής της ισχύος, [14], [15].

Σε ένα δίκτυο συστήματος CDMA, ένας χρήστης θα απαιτήσει περισσότερη ισχύ αν υφίσταται πολλαπλές παρεμβολές, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την θέση του στο δίκτυο. Επιπλέον, η υπηρεσία η οποία απαιτεί μεγάλη ποσότητα ρυθμού δεδομένων επηρεάζει αρνητικά την χωρητικότητα στο DL [14], αφού όπως θα δούμε σε επόμενο τμήμα της εργασίας, ο ρυθμός δεδομένων σχετίζεται με την απαιτούμενη ισχύ σε κάθε χρήστη ξεχωριστά.

4.2. Διάταξη δικτύου (Network layout)

Το Σχ. 4.1 παρουσιάζει το θεωρητικό πρότυπο διάταξης δικτύου που υιοθετούμε στην εργασία, το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελείται από B BSs, κάθε BS b , $b = 1, \dots, B$ με $B = 7$, θεωρούμε ότι αποτελείται από ένα τομέα και ένα PA ή κεραία. Θεωρούμε επίσης ότι οι BSs είναι Micro cells και ότι η κεραία που διαθέτουν είναι ομοιοκατευθυντική.



Σχ. 4.1. Εξαγωνική κυψελωτή διάταξη

4.3. Εξίσωση ποιότητας της ζεύξης

Έστω ότι ένας MS u βρίσκεται στην κεντρική κυψέλη b του Σχ. 4.1, αυτός ο χρήστης θα υφίσταται παρεμβολές από τις κεραιές των γειτονικών BSs, που στην βιβλιογραφία αναφέρονται ως “inter-cell interference”, I_{inter} (watts), αλλά και από την κεραιά της κυψέλης στην οποία βρίσκεται, που αναφέρεται ως “intra-cell interference”, I_{intra} (watts). Η ποιότητα στο DL επομένως επηρεάζεται από τους δυο αυτούς παράγοντες. Στο εσωτερικό της κεντρικής κυψέλης υποθέτουμε ότι οι μεταδόσεις στο DL δεν είναι τελείως ορθογωνικές με την εσωτερική παρεμβολή η οποία καθορίζεται από τον παράγοντα ορθογωνικότητας α (Orthogonality factor), όπου $\alpha \in [0,1]$, που με την σειρά του αυτός εξαρτάται από την “multipath” διάδοση κύματος, αν έχουμε $\alpha = 1$, τότε θεωρούμε ότι έχουμε τέλεια ορθογωνικότητα [14], [16], [17].

Όταν η κυψέλη πρέπει να εξυπηρετήσει N MSs ταυτόχρονα, με μετάδοση ρυθμού δεδομένων $R_u \in V$ με $u=1,2,\dots,N$, τότε η διαδικασία διαχείρισης των ραδιοεπικοινωνιακών πόρων που συνήθως καλείται ως έλεγχος ισχύος (Power control) πρέπει να δεσμεύσει αρκετή ισχύ, P_u , (watts), από την συνολική ισχύ, $P_{Txb} \in [0, P_{max}]$, (watts), που εκπέμπει ο BS b , έτσι ώστε να υποστηριχθεί η βέλτιστη ποιότητα της ζεύξης, [16]. Με άλλα λόγια η ισχύς P_u (watts) είναι η εκπεμπόμενη ισχύς ενός MS u όταν αυτός βρίσκεται μέσα στην περιοχή κάλυψης του BS b [14]. Το “power control” συνήθως εξηγείται από τον εξαναγκασμό του αντίστοιχου “energy-per bit to noise power density” $(E_b / N_0)_u$, να πετύχει μια τιμή μεγαλύτερη από τη δοθείσα ελάχιστη τιμή $(E_b / N_0)_{target}$, [16]. Το “energy-per bit to noise power density” σε ένα MS u εκφράζεται στις [14] και [15] ως εξής:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_u = \frac{W}{R_u} \cdot \frac{P_u \cdot PL_{b,u}}{(1-\alpha) \cdot P_{Txb} \cdot PL_{b,u} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq b}}^B P_{Txi} \cdot PL_{i,u} + N_0}, \quad (4.1)$$

όπου, $PL_{b,u}$ και $PL_{i,u}$ είναι η συνολική εξασθένηση της ζεύξης μεταξύ του MS u και BS b και i αντίστοιχα, όπου b είναι ο BS που εξυπηρετεί τον MS και i είναι το σύνολο των BSs που παρεμβάλουν το DL των δύο προηγούμενων, W είναι το chip rate, και N_0 το όριο της ισχύος θορύβου. Αντιστοιχίζουμε επίσης τις παρεμβολές I_{intra} και I_{inter} με τους εξής τύπους,

$$I_{intra} = P_{Txb} \cdot PL_{b,u}, \quad (4.2)$$

και

$$I_{inter} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq b}}^B P_{Txi} \cdot PL_{i,u}. \quad (4.3)$$

4.4. Δέσμευση ισχύος στο DownLink

Σε αυτό το τμήμα της εργασίας ορίζουμε τα μέρη από τα οποία αποτελείται η συνολική ισχύς εκπομπής ενός UMTS BS. Η συνολική ισχύς ενός UMTS BS b χωρίζεται σε δυο μέρη: το ένα μέρος, P_{CCCH} , είναι σχετικό με τα κοινά κανάλια ελέγχου (Common Control Channels, CCCH) και είναι ίσο με $P_{CPICH} + P_{otherCCH}$, ενώ το άλλο P_{TCH} έχει να κάνει με τα κανάλια κίνησης (Traffic Channels, TCH). Η ισχύς για τα CCCH είναι συνήθως ίση με το 18% της μέγιστης διαθέσιμης ισχύς ενός BS [14], [17]. Τα ποσοστά δέσμευσης ισχύος στα CPICH και otherCCH είναι 10% και 8% αντίστοιχα, [15]. Λόγω του ότι τα CCCH δεν ελέγχονται από την διαδικασία διαχείρισης ραδιοεπικοινωνιακών πόρων αυτά μοντελοποιούνται με μια σταθερά [14]. Έτσι, η συνολική ισχύς ενός BS b γράφεται στην [15] ως εξής:

$$\begin{aligned} P_{Txb} &= P_{TCH} + P_{CCCH} \\ &= P_{TCH} + P_{CPICH} + P_{otherCCH}, \\ &= \sum_{u=1}^N P_u + P_{CPICH} + P_{otherCCH} \end{aligned} \quad (4.4)$$

όπου N είναι οι MSs που εξυπηρετούνται από τον BS b και P_u είναι η δεσμευμένη ισχύς στον MS u .

Θεωρώντας ότι έχουμε τέλει έλεγχο ισχύος (perfect power control), όλοι οι MSs μπορούν να επιτύχουν το απαιτούμενο (target) (E_b / N_0) , που είναι ίσο με, $(E_b / N_0)_t$, δηλαδή ισχύει για κάθε MS ότι, $(E_b / N_0)_u \approx (E_b / N_0)_t$, [14]. Επιπλέον, υιοθετούμε τη μέση τιμή επιπέδου δραστηριότητας (mean Activity Level), ν , η οποία είναι ένα ποσοστό που δείχνει πόσο δραστήριοι είναι οι MSs μέσα στην κυψέλη. Τέλος, η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής P_u για τον MS u στο DL μπορεί να προκύψει από την εξίσωση ποιότητας της ζεύξης και να πάρει την εξής μορφή:

$$P_u = CIR_u \cdot \nu \cdot \left[(1 - \alpha) \cdot P_{Txb} \cdot PL_{b,u} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq b}}^B P_{Txi} \cdot PL_{i,u} + N_0 \right] \cdot \frac{1}{PL_{b,u}}, \quad (4.5)$$

όπου, $CIR_u = (E_b / N_0)_t \cdot R_u / W$, είναι ο λόγος λαμβανόμενου σήματος προς παρεμβολή. Έχοντας γράψει την εξίσωση 4.5 βλέπουμε ότι αυτή εξαρτάται από την μετάδοση του ρυθμού δεδομένων R_u (bps) με τέτοιο τρόπο ώστε μια αύξηση στο R_u θα αυξήσει την ισχύ του απαιτεί ο MS u από τον BS b . Επιπλέον παρατηρούμε ότι εξαρτάται και από την απόσταση του MS από τους BSs όλης της διάταξης του δικτύου αφού η συνολική εξασθένηση των ζεύξεων έχει άμεση σχέση με αυτήν όπως θα δούμε σε επόμενο τμήμα της εργασίας, στο οποίο περιγράφεται το μοντέλο διάδοσης που χρησιμοποιήθηκε. Στην [14] αναφέρεται ότι όσο πιο κοντά στο σύνορο της κυψέλης βρίσκεται ένας MS τόσο περισσότερη ισχύ θα απαιτήσει από τον BS που εξυπηρετείται.

4.5. Εκτίμηση χωρητικότητας

Ο μέγιστος αριθμός MSs που εξυπηρετούνται μέσα σε μια κυψέλη επιτυγχάνεται αν η απαιτούμενη ισχύς που προκύπτει από την κίνηση μέσα στην κυψέλη φτάσει το όριο της συνολικής διαθέσιμης ισχύς του BS. Από την [14] ο περιορισμός για την μέγιστη χωρητικότητα (Pole capacity) δίνεται ως εξής:

$$\sum_{u=1}^N P_u \leq loadMax \cdot P_{max}, \quad (4.6)$$

όπου το $loadMax$ είναι ίσο με το ποσοστό που δεσμεύεται για τα TCH. Το $loadMax$ είναι το μέγιστο φορτίο κίνησης μέσα σε μια κυψέλη. Με άλλα λόγια είναι το ποσοστό που δείχνει πόση από την μέγιστη ισχύ P_{max} του BS b θα χρησιμοποιηθεί για να εξυπηρετήσει τους εν δυνάμει ενεργούς MSs μέσα στο χώρο που καλύπτεται από την κυψέλη. Όταν η εξίσωση 4.6 γίνει ισότητα ή έστω το πρώτο μέλος της φτάσει σε μια τιμή που αν προστεθεί ακόμη ένας MS u αυτό θα υπερβεί το όριο που έχει τεθεί από το $loadMax$ τότε έχουμε ότι ισχύει η σχέση $N = N_{max}$, όπου η νέα παράμετρος N_{max} δηλώνει τον μέγιστο αριθμό των MSs που μπορεί να εξυπηρετηθεί μέσα σε μια κυψέλη. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε το “role capacity”.

Το φορτίο κίνησης της κυψέλης του BS b για το σύνολο N των MSs που βρίσκονται μέσα από αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$load_b = \frac{\sum_{u=1}^N P_u}{P_{max}} \leq \frac{loadMax \cdot P_{max}}{P_{max}} = loadMax, \quad (4.7)$$

και ισχύει ότι δεν μπορεί να ξεπεράσει το μέγιστο φορτίο κίνησης το οποίο προσδιορίζεται από την τιμή της μέγιστης ισχύς P_{max} .

4.6. Ευαισθησία του δέκτη

Η ευαισθησία του δέκτη ενός MS u περιορίζεται κυρίως από την ισχύ θερμικού θορύβου $N = kTW$, όπου k είναι η σταθερά Boltzman και T είναι η θερμοκρασία του αγωγού σε Kelvin που

συνήθως παίρνει την τιμή 290° ή 293° και W (*chps*) είναι το εύρος ζώνης που είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας στην ισχύ θορύβου του δέκτη, επομένως με την σειρά της η ισχύς θορύβου περιορίζει την ευαισθησία του δέκτη σε ένα επίπεδο. Επειδή τα τμήματα μέσα στον δέκτη από τα οποία αυτός αποτελείται προκαλούν επίσης κάποιο θόρυβο έχει ως αποτέλεσμα η ευαισθησία του δέκτη να περιορίζεται ακόμη περισσότερο, ο παράγοντας αυτός ονομάζεται παράγοντας θορύβου (*Noise Figure, NF*). Από την [15] γνωρίζουμε για την ποιότητα της ζεύξης ότι ισχύει:

$$E_b / N_0 = \frac{P_{R_{x_min}}}{N} \cdot \frac{W}{R}, \quad (4.8)$$

όπου $P_{R_{x_min}}$ είναι η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς του σήματος στον δέκτη, το W είναι το εύρος ζώνης, το οποίο σε συστήματα CDMA λέγεται και “chip rate”, και το R η μετάδοση ρυθμού δεδομένων, μπορούμε να γράψουμε για την εξίσωση της ευαισθησίας του δέκτη ότι:

$$P_{R_{x_min}}(dBW) = NF(dB) + E_b / N_0(dB) + N(dBW) - PG(dB) \quad (4.9)$$

όπου PG είναι το κέρδος επεξεργασίας (*Processing Gain*) και δίνεται ότι είναι ίσο με W/R , [18].

4.7. Μέγιστο μονοπάτι απωλειών

Το μονοπάτι απωλειών (*Path Loss, PL*) ανάμεσα σε δύο κεραιές είναι ο λόγος της εκπεμπόμενης ισχύος P_{Tx} προς την λαμβανόμενη ισχύ P_{Rx} , και συνήθως εκφράζεται σε *dB* με κατάλληλη αλλαγή των μεγεθών σε λογαριθμική κλίμακα. Για να περιγράψουμε το PL εύστοχα πρέπει να συμπεριλάβουμε επιπλέον παραμέτρους, όπως κέρδη κεραιών αλλά και επιμέρους απώλειες του συστήματος. Για το λόγο αυτό είναι καλύτερο αυτό να περιγραφεί από το “Link Budget”, το οποίο δίνεται ως εξής:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - PL, \quad (4.10)$$

από την [19], όπου οι παράμετροι G_{Rx} και G_{Tx} είναι τα κέρδη του δέκτη (MS) και του πομπού (BS) αντίστοιχα. Για την εκτίμηση του μέγιστου PL λαμβάνουμε υπόψη τη μέγιστη ισχύ εκπομπής που ο BS μπορεί να διαθέσει, την ευαισθησία του δέκτη και τα κέρδη των κεραιών, και γράφουμε την εξίσωση 4.10 ως εξής:

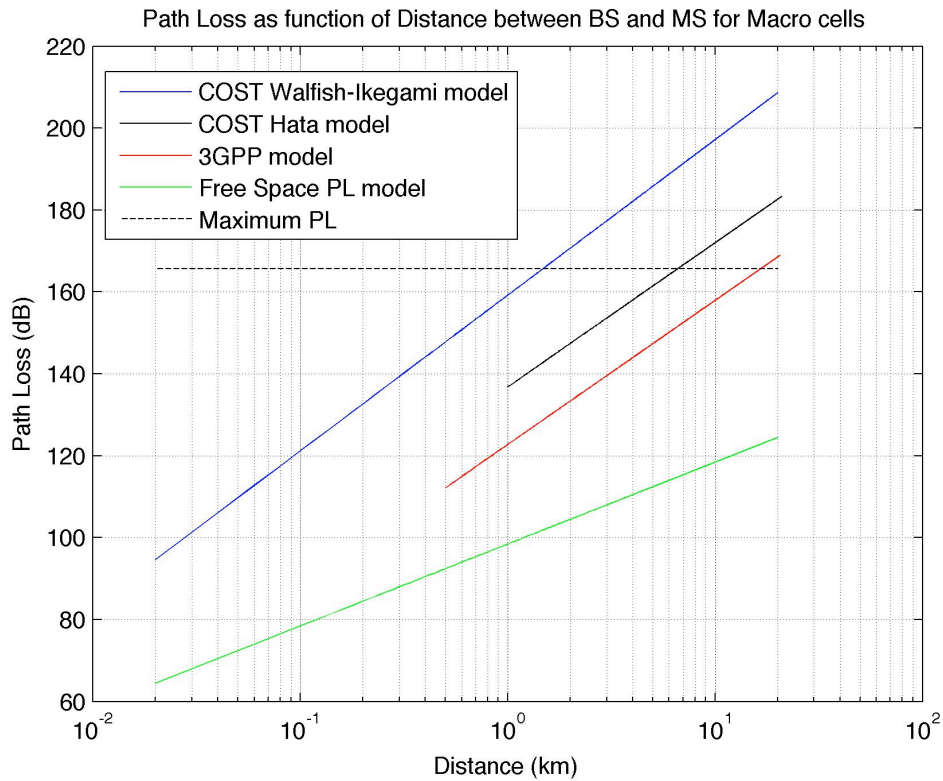
$$PL_{max} = P_{Tx_CPICH} - P_{R_{x_min}} + G_{Tx} + G_{Rx}, \quad (4.11)$$

όπου, P_{Tx_CPICH} είναι η ισχύς που δεσμεύεται από την συνολική εκπεμπόμενη ισχύ ενός BS για να παρέχει κάλυψη σε συγκεκριμένη περιοχή.

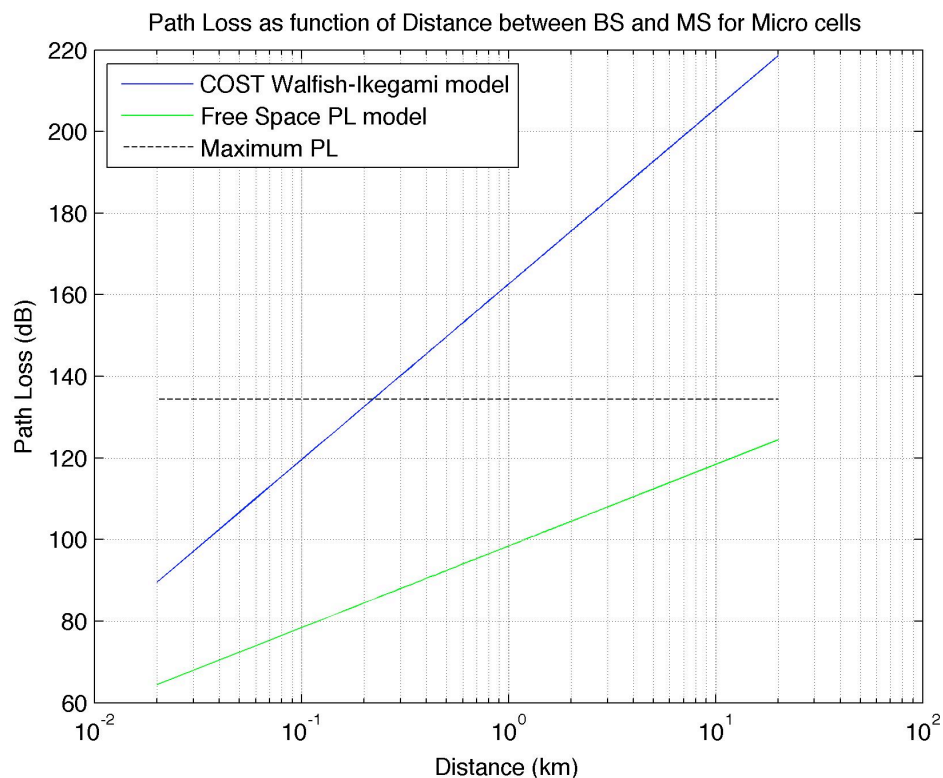
4.8. Μοντέλο διάδοσης

Στην εργασία μας θα επικεντρωθούμε σε αστικές περιοχές, με αυτό το σκεπτικό περιορίζομαστε αμέσως σε συγκεκριμένα μοντέλα διάδοσης (*Propagation Models, PMs*). Πριν περιγράψουμε το μοντέλο διάδοσης που επιλέχτηκε αναφέρουμε τρία PMs που μπορούν να περιγράψουν την

διάδοση κύματος σε αστική περιοχή, στο Σχ. 4.2.α παρατηρούμε το PL σε σχέση με την απόσταση, ενώ το “Free Space PL (FSPL) model” απεικονίζεται ώστε να υπάρχει μέτρο σύγκρισης με την διάδοση στον ελεύθερο χώρο. Τα τρία αυτά PMs είναι τα, “COST Hata model”, [20], [21], “COST W-I model”, [20], [21], [22], και “3GPP model”.



Σχ. 4.2.α. PL συναρτήσει της απόστασης μεταξύ MS και BS για Macro cells.



Σχ. 4.2.b. *PL* συναρτήσει της απόστασης μεταξύ MS και BS για Micro cells.

Το Σχ. 4.2.a δείχνει τα τέσσερα μοντέλα διάδοσης για Macro cells. Τα τρία από αυτά περιγράφουν την διάδοση κύματος σε αστική περιοχή, ενώ η γραφική παράσταση με το πράσινο χρώμα περιγράφει την διάδοση στον ελεύθερο χώρο. Η συχνότητα στην οποία γίνανε οι υπολογισμοί είναι τα 2000 MHz, το ύψος του BS θεωρήθηκε τα 27 m και η μέγιστη ισχύς εκπομπής είναι τα 20 Watts ενώ το ύψος του MS τα 1.5 m. Ισχύουν διάφοροι περιορισμοί, στο “COST Hata model” η κάλυψη της κυψέλης δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 1 km και μεγαλύτερη από 20 km, ενώ στο “3GPP model” πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.5 km, ενώ ο περιορισμός που ισχύει για την κάλυψη της κυψέλης στο “COST Walfish-Ikegami model” είναι ότι πρέπει να είναι μικρότερη από 5 km. Σημειώνουμε ότι με τα δύο πρώτα μοντέλα περιοριζόμαστε σε Macro cells, ενώ το τρίτο μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε κυψέλες με μικρή ακτίνα κάλυψης, στο Σχ. 4.2.b φαίνεται το *PL* σε σχέση με την απόσταση BS και MS για Micro cells, όταν δηλαδή η κεραία τοποθετείται σε ύψος 10 m και η μέγιστη ισχύς εκπομπής είναι τα 0.3 Watts

Το σημαντικό πλεονέκτημα του “COST W-I model” είναι ότι λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία της αστικής περιοχής, όπως, μέσο ύψος κτιρίων, μέση απόσταση μεταξύ κτιρίων, μέσο πλάτος δρόμου, αλλά και την γωνία πρόσπτωσης του κύματος σε σχέση με τον άξονα του δρόμου. Επίσης μπορεί να λειτουργήσει σε “Non Line of Site, NLoS” και σε “Line of Site, LoS” συνθήκες. Ενώ τα άλλα δύο μοντέλα, είναι σχεδιασμένα για καθορισμένες τιμές των παραπάνω παραμέτρων. Επιπλέον αναφέρουμε ότι το “COST W-I model” είναι ένα από τα πιο χρησιμοποιημένα μοντέλα για την εύρεση του *PL* στις κινητές επικοινωνίες, μαζί με το “COST Hata model”, [22]. Το “COST W-I model” θεωρεί τις κυψέλες σαν Micro cells όταν η κεραία του BS είναι τοποθετημένη πολύ χαμηλότερα από την στέγη των κτιρίων, συνήθως λιγότερο ή ίσο με 10 m από το έδαφος, οπότε και αυτή καλύπτει από 0.2 μέχρι 1 km, ενώ σαν Macro cells όταν είναι τοποθετημένη πάνω από τις στέγες των κτιρίων, οπότε και καλύπτει από 1 μέχρι 5 km, [22].

Λόγω της ακρίβειας των αποτελεσμάτων που παρέχει το “COST W-I model” σε αστικές περιοχές, για Micro και Macro cells επιλέγουμε το εν λόγω μοντέλο και περιγράφουμε το *PL* με τους επόμενους τύπους.

Η βασική εξίσωση εξασθένησης απαρτίζεται από τους όρους, “FSPL” L_0 , “Multiple Screen Diffraction Loss” L_{msd} και “Roof-top-to-Street diffraction and Scatter Loss” L_{rts} , και δίνεται από:

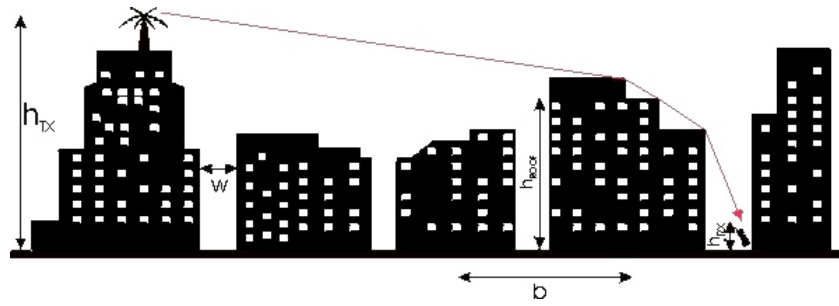
$$L_b = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd}, & \text{for } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0, & \text{for } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

ενώ οι παράμετροι που χρησιμοποιεί φαίνονται γραφικά στο Σχ. 4.3, όπου b είναι η απόσταση μεταξύ των κτιρίων, w είναι το πλάτος του δρόμου, h_{TX} είναι το ύψος του BS, το h_{RX} είναι το ύψος του MS και h_{roof} είναι το ύψος της στέγης και όταν αυτό δεν είναι γνωστό μπορεί να υπολογιστεί από την:

$$h_{roof} = 3 \text{ m} \times (n\text{floors}) + \text{roof_height} \quad , \quad (4.13)$$

όπου $n\text{floors}$ είναι ο αριθμός των ορόφων. Για τον υπολογισμό του *PL* στο Macro cell, στις παραμέτρους αυτές έχουν δοθεί οι εξής τιμές, $b = 20 \text{ m}$, $w = b/2$, $n\text{floors} = 7$, $\text{roof_height} = 3 \text{ m}$. Επίσης d είναι η απόσταση μεταξύ του BS b και του MS u και φ η γωνία πρόσπτωσης του κύματος σε σχέση με τον άξονα του δρόμου την οποία για το τη περίπτωση με Macro cell την θέσαμε 50° .

Οι αντίστοιχες παράμετροι για τον υπολογισμό του PL στο Micro cell έχουν τις εξής τιμές, $b = 30$ m, $w = b/2$, $nfloors = 5$, $roof_height = 0$ m και $\phi = 90^\circ$.



Σχ. 4.3. Παράμετροι του “COST W-I model”

Το FSPL είναι:

$$L_0(dB) = 32.4 + 20 \cdot \log_{10}(d / km) + 20 \cdot \log_{10}(f / MHz), \quad (4.14)$$

ο όρος L_{rts} γράφεται ως:

$$L_{rts}(dB) = -16.7 - 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{w}{m}\right) + 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{f}{MHz}\right) + 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{\Delta h_{MS}}{m}\right) + L_{ori}, \quad (4.15)$$

με

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354 \cdot \frac{\phi}{deg}, & \text{for } 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075 \cdot \left(\frac{\phi}{deg} - 35\right), & \text{for } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ, \\ 4 + 0.114 \cdot \left(\frac{\phi}{deg} - 55\right), & \text{for } 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases}, \quad (4.16)$$

και

$$\Delta h_{MS} = h_{roof} - h_{RX}. \quad (4.17)$$

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης 4.12 L_{msd} δίνεται από:

$$L_{msd}(dB) = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{km}\right) + k_f \cdot \log_{10}\left(\frac{f}{MHz}\right) - 9 \cdot \log_{10}\left(\frac{b}{m}\right), \quad (4.18)$$

όπου

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \cdot \log_{10}\left(1 + \frac{\Delta h_{BS}}{m}\right), & \text{for } h_{TX} > h_{roof} \\ 0, & \text{for } h_{TX} \leq h_{roof} \end{cases}, \quad (4.19)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & \text{for } h_{TX} > h_{roof} \\ 54 - 0.8 \cdot \frac{\Delta h_{BS}}{m}, & \text{for } h_{TX} \leq h_{roof} \text{ and } d \geq 0.5 \text{ km} , \\ 54 - 0.8 \cdot \frac{\Delta h_{BS}}{m} \cdot \frac{d / km}{0.5}, & \text{for } h_{TX} \leq h_{roof} \text{ and } d < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (4.20)$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & \text{for } h_{TX} > h_{roof} \\ 18 - 15 \cdot \frac{\Delta h_{BS}}{h_{roof}}, & \text{for } h_{TX} \leq h_{roof} \end{cases} , \quad (4.21)$$

$$\Delta h_{BS} = h_{TX} - h_{roof} , \quad (4.22)$$

και

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \cdot \left(\frac{f / MHz}{925} - 1 \right), & \text{for medium sized city and suburban} \\ & \text{centres with medium tree density} \\ 1.5 \cdot \left(\frac{f / MHz}{925} - 1 \right), & \text{for metropolitan centres} \end{cases} . \quad (4.23)$$

Αν δεν γνωρίζουμε τα δεδομένα της δομής των κτιρίων τότε οι προτεινόμενες τιμές είναι οι εξής:

$$roof_height = \begin{cases} 3 \text{ m}, & \text{for pitched} \\ 0 \text{ m}, & \text{for flat} \end{cases} ,$$

$$b = [20, 50] \text{ m},$$

$$w = b/2,$$

$$\varphi = 90^\circ,$$

ενώ το μοντέλο περιορίζεται από τις παρακάτω τιμές:

$$f = [800, 2000] \text{ MHz},$$

$$h_{TX} = [4, 50] \text{ m},$$

$$h_{RX} = [1, 3] \text{ m},$$

$$d = [0.02, 5] \text{ km}.$$

4.9. Μέγιστη κάλυψη κυψέλης

Η μέγιστη κάλυψη της κυψέλης ορίζεται κατά κύριο λόγο από την μέγιστη ακτίνα της. Γνωρίζοντας το μέγιστο μονοπάτι απωλειών, PL_{max} , το οποίο υπολογίζεται από την εξίσωση 4.11 μπορούμε να εκτιμήσουμε την μέγιστη κάλυψη της κυψέλης από την εξίσωση 4.12, αναπαριστώντας αρχικά το PL του “COST W-I model” με την εξίσωση $g(\cdot)$ η οποία έχει την εξής μορφή:

$$PL = g(d|f, h_{TX}, h_{RX}, b, w, nfloors, roof_height, \phi), \quad (4.24)$$

όπου η μεταβλητή d , που δηλώνει την απόσταση, πριν την $|$ παίρνει τιμές μέσα σε ένα συνεχές διάστημα, ενώ οι παράμετροι μετά την $|$ έχουν γνωστές τιμές.

Για να υπολογίσουμε την απόσταση πρέπει να πάρουμε την αντίστροφη συνάρτηση της εξίσωσης 4.24, η οποία μας δίνει:

$$d = g^{-1}(PL|f, h_{TX}, h_{RX}, b, w, nfloors, roof_height, \phi). \quad (4.25)$$

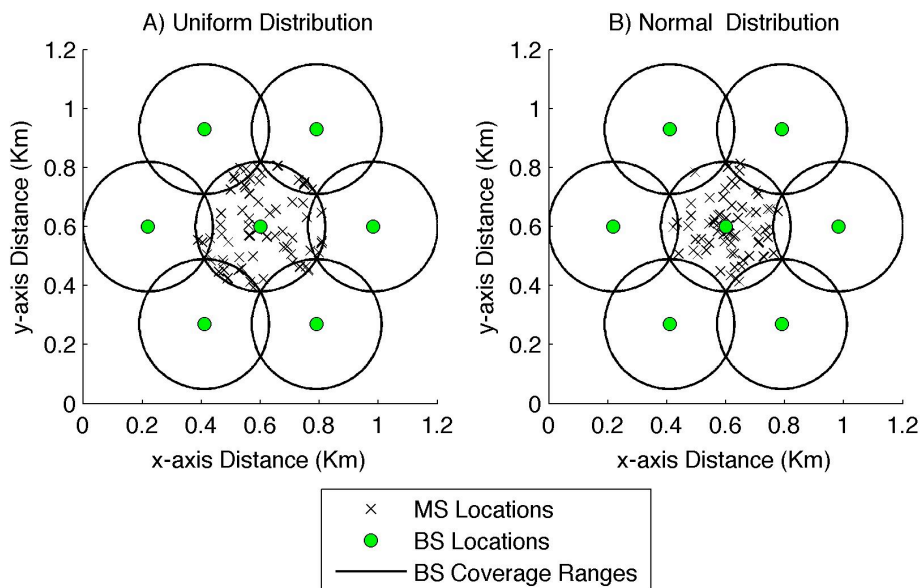
Επομένως, βασιζόμενοι στην εξίσωση 4.25 μπορούμε να καθορίσουμε τη μέγιστη κάλυψη του BS, d_max σε km , από την:

$$d_max = g^{-1}(PL_{max}|f, h_{TX}, h_{RX}, b, w, nfloors, roof_height, \phi). \quad (4.26)$$

4.10. Αριθμητική εκτίμηση μέγιστης χωρητικότητας κυψέλης

Σε αυτό το τμήμα θα αναλύσουμε την μέγιστη χωρητικότητα των BSs. Με τα αποτελέσματα αυτά θα έχουμε την δυνατότητα να εκτιμήσουμε την μέγιστη χωρητικότητα των κυψελών μέσα στο δίκτυο όταν αυτές λειτουργούν με τους γειτονικούς BSs ενεργούς αλλά και το αντίθετο.

Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις, στην πρώτη τοποθετήθηκαν στην κεντρική κυψέλη χρήστες με τυχαία ομοιόμορφη κατανομή (uniform distribution) και στην δεύτερη με τυχαία κανονική κατανομή (normal distribution). Κάθε περίπτωση θεωρούμε ότι αποτελείται από δυο επιμέρους περιπτώσεις, στην πρώτη όλοι οι BSs έχουν την δυνατότητα να εκπέμπουν συνολική ισχύ ίση με P_{max} , και στη δεύτερη οι γειτονικοί BSs δεν εκπέμπουν ισχύ. Το Σχ. 4.4 δείχνει την κατανομή των χρηστών στην κεντρική κυψέλη και για τις δύο περιπτώσεις.

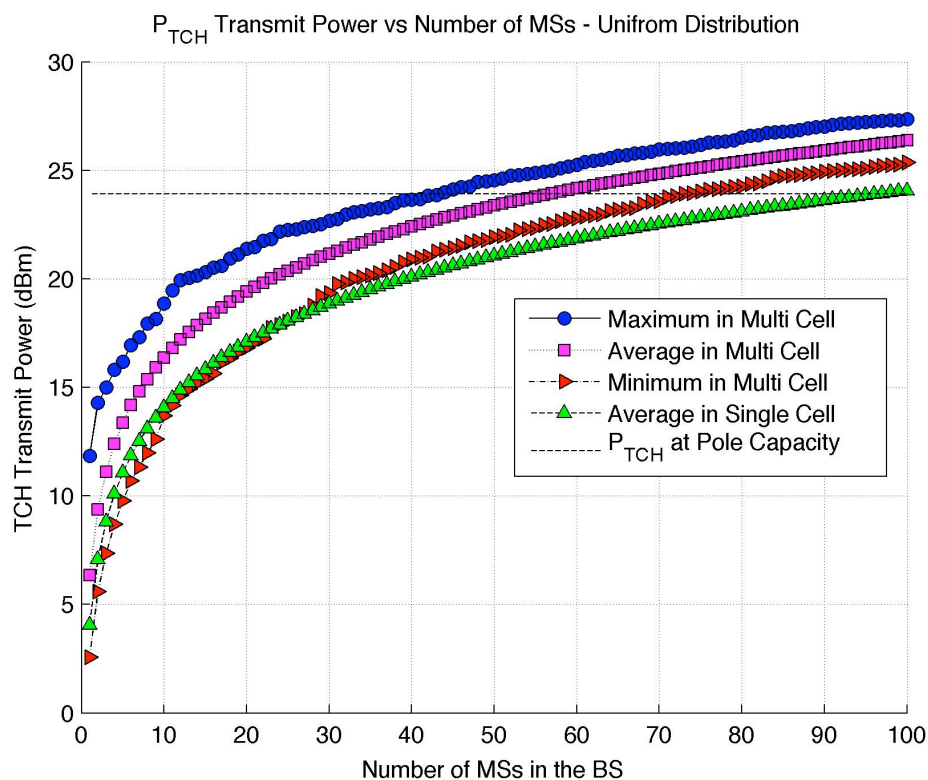


Σχ. 4.4. A) Ομοιόμορφη κατανομή MSs στην κεντρική κυψέλη, B) Κανονική κατανομή MSs στην κεντρική κυψέλη.

Για την παραγωγή των αποτελεσμάτων θεωρήσαμε αστική περιοχή, επομένως θέσαμε τον παράγοντα ορθογωνιότητας στην τιμή 0.327, [15]. Όσον αφορά την δομή των κτιρίων και της πόλης, οι παράμετροι έχουν ορισθεί κατά την περιγραφή του PM. Οι κεραιές των BSs είναι τοποθετημένες σε ύψος 10 m από το έδαφος, επομένως θεωρούμε τους BSs ως Micro cell και το μέσο ύψος της στέγης των κτιρίων από το έδαφος έχει υπολογιστεί στα 15 m.

Για την απλότητα των υπολογισμών θεωρούμε ότι όλοι οι MSs χρησιμοποιούν υπηρεσία τηλεφώνου και μεταδίδουν με ρυθμό δεδομένων 12.2 kbps, επίσης αυτοί μπορούν να πετύχουν το απαιτούμενο (E_b / N_0) , δηλαδή το $(E_b / N_0)_t$ το οποίο θέτουμε στα 7.5 dB. Ακόμη, υποθέτουμε ότι ο NF στον δέκτη έχει την τιμή 7 dB και η θερμοκρασία του αγωγού εκτιμάται στα 290° Kelvin. Τέλος, το επίπεδο δραστηριότητας για το DL είναι 0.50.

Το σύστημα του BS λειτουργεί με “chip rate” ίσο με 3.84 Mchps. Η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς P_{max} των BSs είναι 0.3 Watts. Επίσης το κέρδος της κεραιάς του BS είναι 2 dBi και το κέρδος της κεραιάς του δέκτη -1 dBi. Η μέγιστη ακτίνα κάλυψη των κυψελών d_{max} , η οποία υπολογίζεται από το ποσοστό της μέγιστης ισχύς που καταλαμβάνουν τα κανάλια CPICH, είναι στα 220.2 m. Τέλος, 2000 MHz θεωρούμε τη συχνότητα φέροντος.

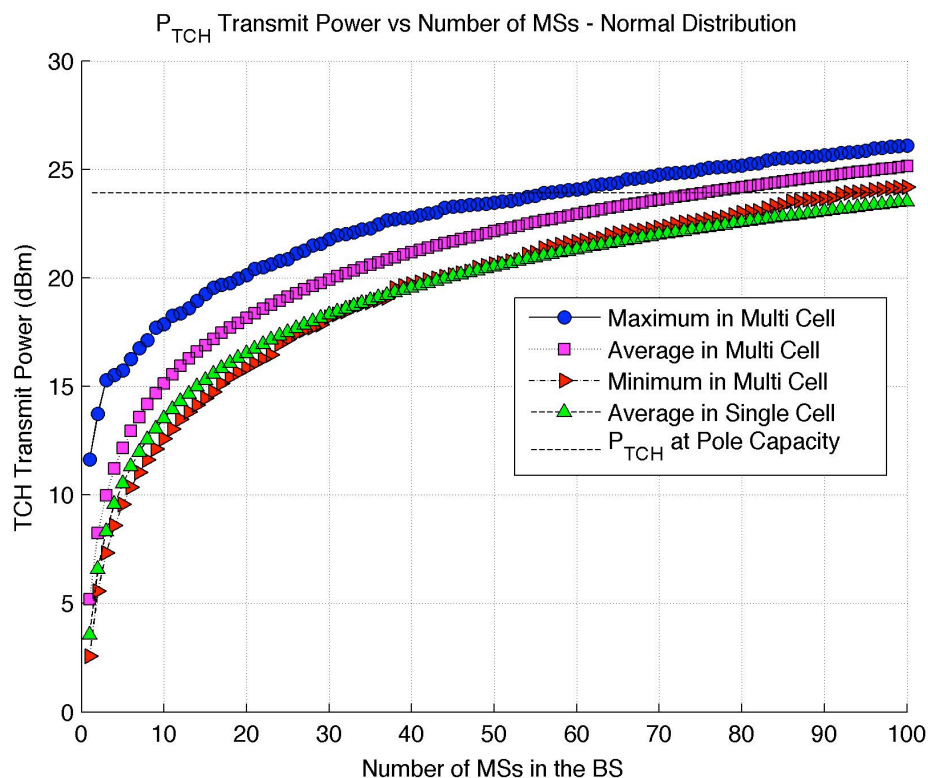


Σχ. 4.5. Ισχύς εκπομπής στα TCH συναρτήσει του συνόλου των MSs στην κεντρική κυψέλη όταν η κατανομή είναι ομοιόμορφη

Στο Σχ. 4.5 φαίνεται η TCH ισχύς εκπομπής που απαιτείται για να εξυπηρετηθεί ορισμένος αριθμός MSs στην κεντρική κυψέλη όταν η κατανομή των MSs είναι ομοιόμορφη. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από 1000 δείγματα από τα οποία εξάγουμε την μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση ισχύ εκπομπής στα TCH για την “Multi Cell, MC” περίπτωση ενώ για την “Single Cell, SC”, εξάγουμε την μέση ισχύ εκπομπής στα TCH. Όταν θεωρούμε ότι το σύστημα είναι MC και

όλοι οι γειτονικοί BSs εκπέμπουν με μέγιστη ισχύ τότε η μέγιστη χωρητικότητα της κεντρικής κυψέλης που προκύπτει από την μέση τιμή των 1000 δειγμάτων είναι περίπου 55 MSs, ενώ σε σύστημα SC που οι γειτονικοί BSs δεν εκπέμπουν ισχύ η μέγιστη χωρητικότητα είναι 95 MSs. Αυτό συμβαίνει λόγω της απουσίας παρεμβολών από γειτονικούς BSs, αφού ισχύει ότι $I_{inter} = 0$. Η μέγιστη ισχύς στα TCH είναι 0.246 watts ή 23.9094 dBm, και ισχύει ότι σε αυτή την ισχύ εκπομπής επιτυγχάνεται η μέγιστη χωρητικότητα του BS. Η μέγιστη χωρητικότητα του κεντρικού BS σε MC σύστημα όταν οι MSs βρίσκονται σε απομακρυσμένη τοποθεσία σε σχέση με την κεραία, δηλαδή, απαιτούν περισσότερη δέσμευση της ισχύς εκπομπής, που προκύπτει από την μέγιστη τιμή των δειγμάτων, είναι περίπου 42 MSs ενώ όταν αυτοί βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από την κεραία, που προκύπτει από την ελάχιστη τιμή των δειγμάτων είναι περίπου 73 MSs.

Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και στο Σχ. 4.6, όταν δηλαδή η κατανομή των χρηστών στην κεντρική κυψέλη είναι κανονική. Η μέγιστη χωρητικότητα του κεντρικού BS στην περίπτωση του συστήματος MC για την μέση τιμή των 1000 δειγμάτων προκύπτει ότι είναι περίπου 75 MSs, ενώ σε σύστημα SC υπερβαίνει τους 100 MSs. Για την κανονική κατανομή ισχύει ότι περισσότεροι MSs βρίσκονται στη μέση τιμή της κατανομής που στην προκειμένη περίπτωση είναι το κέντρο της κυψέλης, γι' αυτό το λόγο η κυψέλη παρουσιάζει μεγαλύτερη μέγιστη χωρητικότητα σε σχέση με αυτήν της ομοιόμορφης κατανομής.



Σχ. 4.6. Ισχύς εκπομπής στα TCH συναρτήσει του συνόλου των MSs στην κεντρική κυψέλη όταν η κατανομή είναι κανονική.

4.10.1. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρέχουμε το βασικό τυπολόγιο στο οποίο θα βασιστεί το σύστημα κινητού δικτύου πρόσβασης που θα αναπτύξουμε. Χρησιμοποιώντας τους τύπους και κάνοντας υπολογισμούς βρίσκουμε την μέγιστη χωρητικότητα μιας κυψέλης, που είναι διατεταγμένη σε

εξαγωνική διάταξη, όταν αυτή χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφη κατανομή MSs στο πεδίο κάλυψής της αλλά και κανονική κατανομή. Για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις μελετούμε την μέγιστη χωρητικότητα BS όταν αυτός θεωρητικά λειτουργεί σε σύστημα SC αλλά και σε MC. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η περίπτωση SC αυξάνει την μέγιστη χωρητικότητα του κεντρικού BS σε σχέση με αυτήν του συστήματος MC λόγω της μηδενικής παρεμβολής από τους γειτονικούς BSs. Ενώ για τις δυο κατανομές των MSs ισχύει ότι όταν η κυψέλη χαρακτηρίζεται από κανονική κατανομή με μέση τιμή το κέντρο της κυψέλης και τυπική διακύμανση την ακτίνα της, τότε σε αυτήν χωράνε περισσότεροι MSs σε σχέση με την ομοιόμορφη κατανομή.

4.11. Διεργασίες συστήματος

4.11.1. Σύστημα σερβιρίσματος Best server

Στο μοντέλο που αναπτύσσουμε θεωρούμε ότι ένας MSs u στο DL μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον BS b που του παρέχει τη μέγιστη λαμβανόμενη ισχύ η οποία πρέπει να είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη από την ευαισθησία του δέκτη. Το σύστημα αυτό αναφέρεται ως ‘best server’ στην [15], και μαθηματικά γράφεται ως εξής:

$$\arg \max_{b \in B} (Total_PL_{bu} (dB) + P_{Tx_CPICH,b} (dBW)) \geq P_{Rx_min} (dBW), \quad \forall u \in N, \quad (4.27)$$

όπου B είναι το σύνολο των BSs και N είναι το σύνολο των MSs που βρίσκονται στο δίκτυο, η ισχύς $P_{Tx_CPICH,b}$ είναι το 8% της P_{max} και προσδιορίζει τη μέγιστη ακτίνα κάλυψης της κυψέλης. Το $Total_PL_{bu}$ είναι το συνολικό PL μεταξύ των δύο κεραιών και περιλαμβάνει τις απώλειες που προκύπτουν από το PM COST W-I και τα κέρδη των κεραιών του πομπού b και του δέκτη u . Ο MS που δεν εξασφαλίζει την απαραίτητη λαμβανόμενη ισχύ, δηλαδή δεν καλύπτεται από κάποιο BS, θεωρούμε ότι βρίσκεται σε λειτουργία διακοπής (outage).

4.11.2. Περιορισμός των ράδιο-πόρων του συστήματος

Το σύστημα που μοντελοποιούμε περιορίζεται από την εκπεμπόμενη ισχύ που διαθέτει ο κάθε BS b . Σε κάθε BS b δίνεται μια αρχική τιμή στην εκπεμπόμενη ισχύ $P_{Tx,b}$. Η ισχύς αυτή όπως αναφέρθηκε προηγουμένως χωρίζεται στην ισχύ που δεσμεύεται στα TCH και CCCH, η εκπεμπόμενη ισχύς στα CCCH είναι μια σταθερά και καταλαμβάνει συνολικά το 18% της P_{max} , ενώ η ισχύς στα TCH θεωρείται εν δυνάμει διαθέσιμη ισχύς και προορίζεται για τους MSs που εισέρχονται στο δίκτυο κάθε χρονική στιγμή, και εν δυνάμει καταλαμβάνει το 82% της P_{max} .

Για να ορίσουμε την συνθήκη του συστήματος που αποφασίζει εάν ένας MS u μπορεί να δεσμευτεί σε ένα BS b ή όχι πρέπει αρχικά να ορίσουμε την εκπεμπόμενη ισχύ που δεσμεύεται στα TCH ως $P_{Tx_traffic,b}$. Επίσης το μοντέλο υπολογίζει την ισχύ P_{MS} που πρέπει να δεσμεύσει κάθε MS u από την ισχύ $P_{Tx_traffic}$ του BS b από τον οποίο καλύπτεται έτσι ώστε να εξυπηρετηθεί, η ισχύς αυτή υπολογίζεται από τον τύπο της εξίσωσης 4.5. Η συνθήκη γράφεται ως εξής:

$$Load_b \cdot P_{max} + P_{MS} \leq P_{Tx_traffic,b}, \quad (4.28)$$

όπου $Load_b$ είναι το συνολικό φορτίο κίνησης του BS b την χρονική στιγμή που εισέρχεται ένας νέος MS u στο δίκτυο και ελέγχεται αν μπορεί να εξυπηρετηθεί από την κυψέλη την οποία καλύπτεται ή όχι. Για την συνθήκη 4.28 ισχύει ότι ο MS u δεν εξυπηρετείται από έναν BS b όταν το αριστερό μέλος της είναι μεγαλύτερο από το δεξιό και επομένως θεωρούμε ότι ο MS βρίσκεται σε λειτουργία διακοπής (outage).

4.11.3. Επαναληπτικός αλγόριθμος προσαρμογής ισχύς

Κάθε BS πρέπει να έχει την δυνατότητα να προσαρμόζει την εκπεμπόμενη ισχύ του ανάλογα με το φορτίο κίνησης που πρέπει να εξυπηρετήσει. Αυτό είναι εφικτό με τον απλό επαναληπτικό αλγόριθμο προσαρμογής ισχύς. Ο αλγόριθμος ενεργοποιείται όταν ένας νέος MS u εισέρχεται στο δίκτυο και καλύπτεται από ένα BS c με το σύστημα σερβιρίσματος που θέσαμε παραπάνω, όπου $c \in B$. Το βασικό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου είναι ο αριθμός των επαναλήψεων (*No_of_iterations*) που θα εκτελεί, για τον αλγόριθμο ισχύει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση της εκπεμπόμενης ισχύς P_{Tx} του BS c που δεσμεύεται σε σχέση με την εκπεμπόμενη ισχύ κίνησης $P_{traffic,c}$ που υπολογίζεται. Η εκπεμπόμενη ισχύς κίνησης σε μια χρονική στιγμή για τον BS c όταν ένας νέος MS δεσμεύεται σε αυτόν υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_{traffic,c} = Load_c \cdot P_{max} + P_{MS}, \quad (4.29)$$

όπου τα ορίσματά της είναι τα ίδια με αυτά της συνθήκης 4.28. Σύμφωνα με αυτήν την ισχύ ο αλγόριθμος θα αποφασίσει την εκπεμπόμενη ισχύ που θα δεσμεύσει στον BS c μετά το τέλος των επαναλήψεων. Ο αλγόριθμος για μια επανάληψη έχει ως εξής:

START Algorithm Iterative power adjustment

Input: $P_traffic, P_Tx_traffic_old, P_Tx_old, P_max, step, interval, CCCH$

Output: $P_Tx_traffic_new, P_Tx_new$

if $P_traffic > P_Tx_traffic_old$ **then**

$P_Tx_new = P_Tx_old + step$

if $P_Tx_new \geq P_max$ **then**

$P_Tx_new == P_max$

end if

else

$difference = P_Tx_traffic_old - P_traffic$

if $difference \geq 0$ **and** $difference \leq interval$ **then**

$P_Tx_new == P_Tx_old$

else

$P_Tx_new = P_Tx_old - step$

if $P_Tx_new \leq CCCH * P_max$ **then**

$P_Tx_new == CCCH * P_max$

end if

end if

end if

$$P_{Tx_traffic_new} = P_{Tx_new} - CCCH * P_{max}$$

END Algorithm Iterative power adjustment

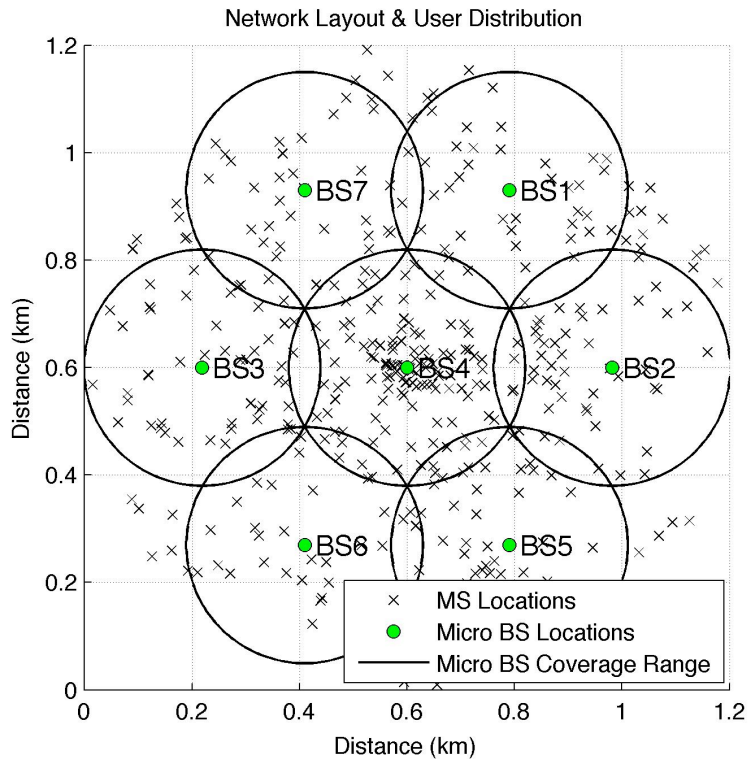
Δυο χαρακτηριστικά του αλγορίθμου που συμβάλουν στην λειτουργία του είναι οι μεταβλητές *step* και *interval*. Η πρώτη συμβάλει στην αύξηση ή μείωση του επιπέδου της εκπεμπόμενης ισχύς που πρέπει να δεσμευθεί από τον BS *c*, και με βάσει την δεύτερη κρίνεται πότε αυτή η ισχύς πρέπει να μειωθεί ή να παραμείνει στο ίδιο επίπεδο. Από την σχέση των δυο αυτών μεταβλητών κρίνεται η επιτυχής λειτουργία του αλγορίθμου. Ισχύει ότι $step \leq interval$, αλλιώς μετά το τέλος των επαναλήψεων ο αλγόριθμος δεν συγκλίνει σε ορθές τιμές, με άλλα λόγια, η εκπεμπόμενη ισχύς που δεσμεύεται δεν ικανοποιεί την ισχύ που έχει υπολογιστεί για το φορτίο κίνησης. Τέλος για την απλοποίηση του προβλήματος θέτουμε τις μεταβλητές ίσες, και η τιμή τους είναι ίση με $P_{max}/No_of_iterations$ έτσι ώστε να έχουν πλήρη εξάρτηση, πρώτον, με τα χαρακτηριστικά των ράδιο-πόρων του συστήματος και δεύτερον με τα χαρακτηριστικά του αλγορίθμου. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση της εκπεμπόμενης ισχύς που δεσμεύεται ως προς την ισχύ που υπολογίζεται για το φορτίο κίνησης, αυτό συμβαίνει λόγω του ότι το *step* θα είναι μικρότερο, την ίδια στιγμή όμως θα έχει ως αντίκτυπο χειρότερο χρόνο εκτέλεσης της διαδικασίας.

Στην λειτουργία του αλγορίθμου λαμβάνονται υπόψη οι ισχύς που έχει δεσμεύσει ο BS *c* στην προηγούμενη επανάληψη και ανάλογα με τις συνθήκες του αλγορίθμου αυτές είτε αυξάνονται είτε μειώνονται είτε διατηρούνται στο ίδιο επίπεδο. Σημειώνουμε ότι η εκπεμπόμενη ισχύς P_{Tx} των BSs χρησιμοποιείται ώστε να προσδιοριστούν οι παρεμβολές που προκύπτουν ως προς τον BS στον οποίο εισέρχεται ένας MS *u* και πιο συγκεκριμένα λαμβάνονται υπόψη στις εξισώσεις 4.2, 4.3 και 4.5. Ενώ, η εκπεμπόμενη ισχύς κίνησης $P_{Tx_traffic}$ που δεσμεύεται στο BS *c* προσδιορίζει το μέγιστο όριο των ράδιο-πόρων του συστήματος, και συγκεκριμένα χρησιμοποιείται στην συνθήκη 4.28.

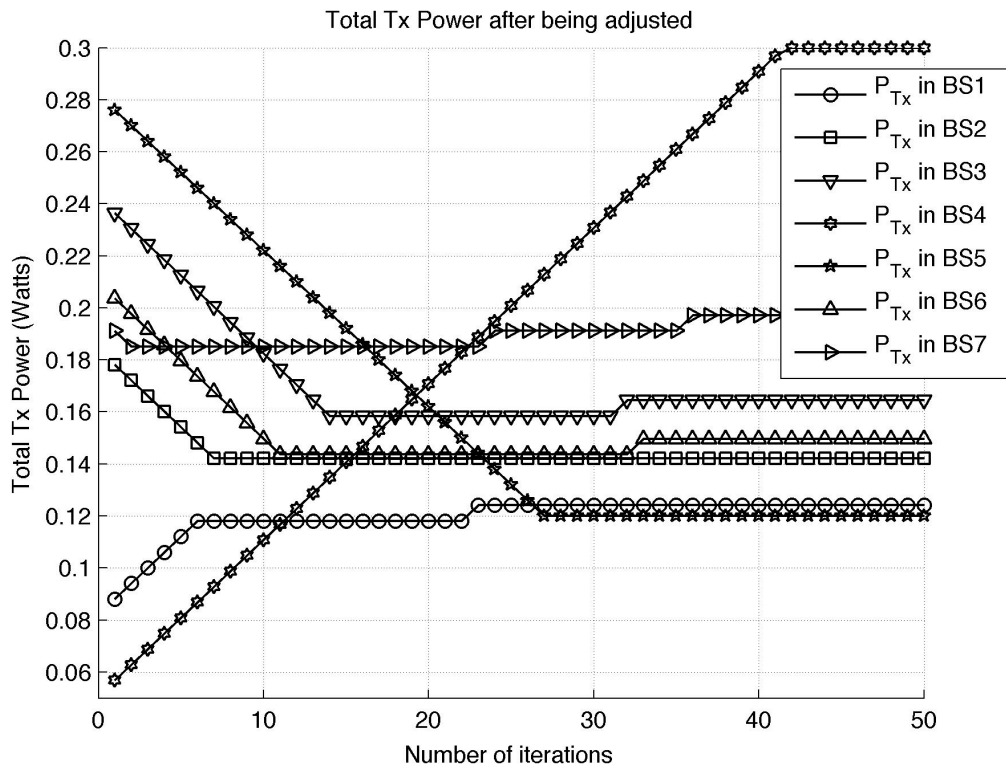
Στην συνέχεια παρουσιάζουμε την εκτέλεση του αλγορίθμου σε ένα δίκτυο. Στο Σχ. 4.7 παρουσιάζεται η εξαγωνική τοπολογία δικτύου μαζί με την κατανομή των χρηστών που χρησιμοποιήθηκε έτσι ώστε να δειχθεί η ορθή λειτουργία του αλγορίθμου. Η κατανομή των χρηστών είναι κανονική με μέση τιμή το κέντρο του δικτύου και διακύμανση ίση με $R = 0.6 km$. Επιλέξαμε αυτή την κατανομή για να φανεί πως ένας σταθμός βάσης μπορεί να προσαρμόσει την ισχύ εκπομπής του στο φορτίο που εξυπηρετεί. Στο δίκτυο εισάγουμε 400 χρήστες. Όσοι χρήστες δεν καλύπτονται από έναν σταθμό βάσης δεν συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς του μοντέλου.

Για τον αλγόριθμο επιλέγουμε 50 επαναλήψεις και αρχικοποιούμε την εκπομπή ισχύς του κάθε σταθμού βάσης σε τυχαία τιμή μεταξύ $[CCCH * P_{max}, P_{max}]$. Η μέγιστη ισχύς εκπομπής που μπορεί να δεσμεύσει ένας σταθμός βάσης είναι $P_{max} = 0.3 watts$, ενώ η ελάχιστη είναι ίση με $CCCH * P_{max}$. Προκύπτει ότι οι μεταβλητές *step* και *interval* θα έχουν την τιμή $0.006 watts$.

Στο Σχ. 4.8. φαίνεται η ισχύς εκπομπής του κάθε σταθμού βάσης από την πρώτη επανάληψη, όταν δηλαδή αρχικοποιείται τυχαία, μέχρι την τελευταία επανάληψη, όταν δηλαδή η ισχύς έχει ήδη προσαρμοστεί έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του φορτίου κίνησης στην περιοχή του. Παρατηρείται ότι ο κεντρικός σταθμός βάσης που πρέπει να εξυπηρετήσει μεγάλο φορτίο σε σχέση με τους γειτονικούς του δεσμεύει όλη την ισχύ εκπομπής που έχει στη διάθεσή του, δηλαδή, P_{max} . Από την άλλη μεριά οι υπόλοιποι σταθμοί βάσης δεσμεύουν λιγότερη ισχύ αφού του φορτίο κίνησης στην περιοχή τους είναι σημαντικά μικρότερο από ότι αυτό του κεντρικού. Είναι επίσης σημαντικό να ειπωθεί ότι η μεγάλη αύξηση της ισχύς εκπομπής ενός σταθμού βάσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύς εκπομπής και άλλων σταθμών βάσης, διότι οι δεύτεροι “βλέπουν” την ισχύ του πρώτου σταθμού βάσης ως εξωτερική παρεμβολή.



Σχ. 4.7. Τοπολογία δικτύου και κατανομή χρηστών για τα οποία εφαρμόζεται ο επαναληπτικός αλγόριθμος προσαρμογής ισχύος.



Σχ. 4.8. Προσαρμογή της ισχύος εκπομπής του κάθε σταθμού βάσης στο τρέχων φορτίο κίνησης που εξυπηρετεί ο καθένας μετά από 50 επαναλήψεις

4.12. Λειτουργία και περιγραφή μοντέλου με Poisson αφίξεις

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι ότι οι MSs φτάνουν στο δίκτυο σύμφωνα με διαδικασία Poisson. Ο ρυθμός αφίξεων είναι λ ανά δευτερόλεπτο και κάθε MS παραμένει στο σύστημα για μια χρονική περίοδο που κατανέμεται εκθετικά με μέση τιμή $1/\mu$ (δευτερόλεπτα), επομένως στο δίκτυο υπάρχουν $\lambda \cdot 1/\mu$ MSs κάθε χρονική στιγμή αφότου σταθεροποιηθεί το σύστημα.

Για κάθε ριπή αφίξεων το μοντέλο αρχικοποιεί ένα δυαδικό πίνακα 0-1, $alloc_set = [x_{bu}]$, όπου $x_{bu} = 1$ σημαίνει ότι ο MS u είναι ενωμένος με τον BS b , αλλιώς $x_{bu} = 0$. Εφόσον κάθε MS μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα BS, το άθροισμα κάθε στήλης στον $alloc_set$ είναι μονάδα, [5].

Όταν ένας MS u εισέρχεται στο δίκτυο υπολογίζονται οι αποστάσεις στις οποίες βρίσκεται σε σχέση με κάθε BS, και στη συνέχεια υπολογίζεται η ισχύς που λαμβάνει από κάθε BS. Από τις λαμβανόμενες ισχύς επιλέγεται αυτή, του BS b , που ικανοποιεί την συνθήκη 4.27, και έτσι ο MS u ενώνεται με το BS b θέτοντας την $x_{bu} = 1$. Στην συνέχεια ξεκινάει η επαναληπτική διαδικασία για την προσαρμογή της ισχύς, αρχικά όλοι οι BSs στο δίκτυο διαθέτουν δεσμευμένη εκπεμπόμενη ισχύ P_{Tx} ίση με την σταθερή ισχύ στα CCCH, και το φορτίο κίνησης είναι ίσο με μηδέν, επομένως στην πρώτη επανάληψη χρησιμοποιούνται οι αρχικές τιμές ισχύς που έχει ο BS b . Στην αρχή της κάθε επανάληψης υπολογίζεται η P_{MS} και ελέγχεται η συνθήκη 4.28, αν αυτή είναι αληθής ο MS u παραμένει ενωμένος στο BS b . Στο τέλος της κάθε επανάληψης υπολογίζεται η 4.29 και εκτελείται η διαδικασία προσαρμογής ισχύς. Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται για κάθε νέα επανάληψη με ορίσματα τις προσαρμοσμένες τιμές που προκύπτουν με το τέλος κάθε προηγούμενης επανάληψης. Όταν τελειώσουν οι επαναλήψεις γνωρίζουμε, πρώτον, τις προσαρμοσμένες τιμές ισχύς που δεσμεύει ο BS b , και δεύτερον, αν ο MS u είναι ενωμένος με τον BS b ή όχι. Αν ο MS u είναι ενωμένος με τον BS b τότε αναβαθμίζεται το *Load* του. Αν ο MS u δεν είναι ενωμένος με κανέναν BS από το σύνολο τότε θεωρούμε ότι βρίσκεται εκτός λειτουργίας (outage).

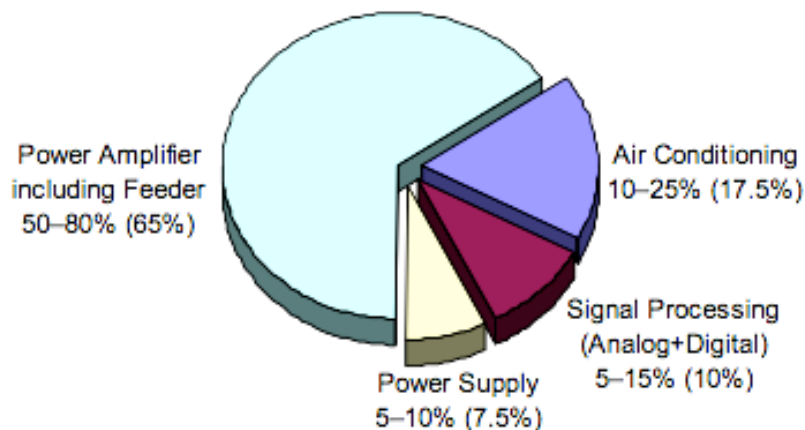
Κεφάλαιο 5

Κατανάλωση Ενέργειας Σταθμών Βάσης

5.1. Εξοπλισμός & περιεχόμενα σταθμών βάσης

Στην [4] αναφέρεται ότι παλαιότερες εργασίες έχουν δείξει ότι δίκτυα πρόσβασης κινητών επικοινωνιών συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό στις εκπομπές CO₂. Συγκεκριμένα όμως οι BSs ευθύνονται περίπου για τα 2/3 των συνολικών εκπομπών, [23]. Το NNT DoCoMo αναφέρει ότι ο λόγος μεταξύ της ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας των MSs προς την ημερήσια κατανάλωση ενέργειας των κινητών δικτύων πρόσβασης είναι 1:150, [24]. Επομένως γίνεται κατανοητό ότι για να μειώσουμε την κατανάλωση ενέργειας σε ένα δίκτυο πρόσβασης κινητών επικοινωνιών πρέπει να επικεντρώσουμε την προσοχή μας στους BSs.

Μέσα σε ένα BS βρίσκουμε διάφορα περιεχόμενα που καταναλώνουν ενέργεια, μια περιληπτική άποψη των περιεχομένων και των ποσοστών ενέργειας που καταναλώνουν φαίνεται στο Σχ. 5.1. Σημειώνουμε ότι αφού η περισσότερη κατανάλωση ενέργειας σε ένα δίκτυο πρόσβασης κινητών επικοινωνιών προέρχεται από τους BSs τότε εξελίσσοντας τα περιεχόμενα ενός BS που παίζουν τον σημαντικότερο ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας του όπως ο ενισχυτής ισχύος και ο κλιματισμός είναι μεγάλης σημασίας για ενεργειακή αποδοτικότητα, [8].



Σχ. 5.1. Κατανομή της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας σε ένα σταθμό βάσης, [8].

Σε αυτό το σημείο περιγράφουμε τα περιεχόμενα ενός BS με αναλυτικότερο τρόπο όπως φαίνονται στο Σχ. 5.2. Ένας BS ορίζεται ως ο εξοπλισμός που απαιτείται ώστε να υπάρχει επικοινωνία για τους MSs και το backhaul δίκτυο, [4]. Ένας BS περιέχει εξοπλισμό που επαναλαμβάνεται ανά τομέα (sector), και εξοπλισμό που είναι ίδιος για κάθε τομέα. Ο εξοπλισμός ανά τομέα είναι τέτοιος όπως:

1) η ψηφιακή επεξεργασία σήματος (Digital Signal Processing, DSP) η οποία είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία του συστήματος αλλά και την κωδικοποίηση· είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι όσο εξελίσσονται τα κινητά δίκτυα πρόσβασης τόσο περισσότερη και πολυπλοκότερη γίνεται η επεξεργασία σήματος,

2) ο ενισχυτής ισχύος (Power Amplifier, PA) ο οποίος αναμένεται να λειτουργεί σε μια κατάσταση στην οποία η μέγιστη τιμή του σήματος εξόδου συμφωνεί με την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ εισόδου του. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του PA είναι ότι η κατανάλωση ενέργειάς του εξαρτάται από την ισχύ εισόδου της κεραίας ή αλλιώς την ισχύ εξόδου του PA όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2. Για

τη μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του PA πρέπει να ορίσουμε την αποδοτικότητα μ του PA, η αποδοτικότητα προσδιορίζεται κατά κύριο λόγο από το σχήμα διαμόρφωσης που εφαρμόζεται και από τον παράγοντα crest. Ενώ αριθμητικά την ορίζουμε ως τον λόγο της ισχύς εξόδου του PA (σε *watts*) προς την ηλεκτρική ισχύ εισόδου του PA (σε *watts*),

$$\mu_{PA} = \frac{P_{out,PA}}{P_{el,PA}} \quad (5.1)$$

όπου στο Σχ. 5.2 η $P_{out,PA}$ αντιστοιχεί στην ισχύ εισόδου P_{Tx} της κεραίας του ενός τομέα. Η μέγιστη τιμή της P_{Tx} ρυθμίζεται συνήθως ανάλογα με την τεχνολογία και την συχνότητα φέροντος που χρησιμοποιείται αλλά επίσης και με το φορτίο κίνησης που εξυπηρετεί η κάθε κεραία του BS. Από το τελευταίο συμπεραίνουμε ότι η κατανάλωση ενέργειας του PA δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το φορτίο κίνησης· εκτός όμως από τους ράδιο-πόρους η κατανάλωση ενέργειας στον PA εξαρτάται και από την αποδοτικότητα του ενισχυτή. Από την εξίσωση 5.1 γράφουμε ότι η ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας μιας κεραίας ενός BS είναι ίση με:

$$P_{el,PA} = \frac{P_{Tx}}{\mu_{PA}}, \quad (5.2)$$

3) η *κεραία* (Antenna) η οποία είναι υπεύθυνη για την αποστολή και λήψη σήματος προς και από τους MSs αντίστοιχα· είναι όμως σαφές ότι η κεραία δεν περιλαμβάνεται στην κατανάλωση ενέργειας του BS αφού αποτελεί μέρος του Link Budget. Από την άλλη μεριά ο εξοπλισμός που είναι ίδιος για κάθε τομέα είναι:

4) ο *μετατροπέας AC/DC* ο οποίος καταναλώνει λιγότερο από 5% της ισχύς εισόδου ενός Macro BS, γι' αυτό το λόγο υπολείπεται και θεωρείται ότι συμπεριλαμβάνεται στο DSP, [25],

5) το *τροφοδοτικό* και η *εφεδρική μπαταρία* (Power Supply and Battery Backup, PSBB) για τα οποία η απώλεια ενέργειας είναι συνήθως μεταξύ 10% και 15%, αλλά εξαρτάται κυρίως από την τεχνολογία των υλικών,

6) ο *τροφοδότης* (Feeder) του οποίου οι απώλειες είναι 3 dB σε ένα Macro BS και συμπεριλαμβάνονται στο Link Budget γι' αυτό και δεν μοντελοποιείται στην κατανάλωση ενέργειας ενός BS - ο τροφοδότης ευθύνεται για την επικοινωνία με το backhaul δίκτυο, και τέλος,

7) η *ψύξη* η οποία συμβάλει σε ποσοστό απώλειας μεταξύ 0% και 40% και εξαρτάται κυρίως από τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες που είναι εγκατεστημένος ο BS - η ψύξη σε ένα BS μπορεί να είναι είτε κλιματισμός είτε κυκλοφορία του αέρα είτε ελεύθερη ψύξη είτε συνδυασμός αυτών, στην [26] αναφέρεται ότι η ελεύθερη ψύξη μπορεί να εξοικονομήσει έως και 80% στην συνολική ψύξη ενός κινητού δίκτυο πρόσβασης.

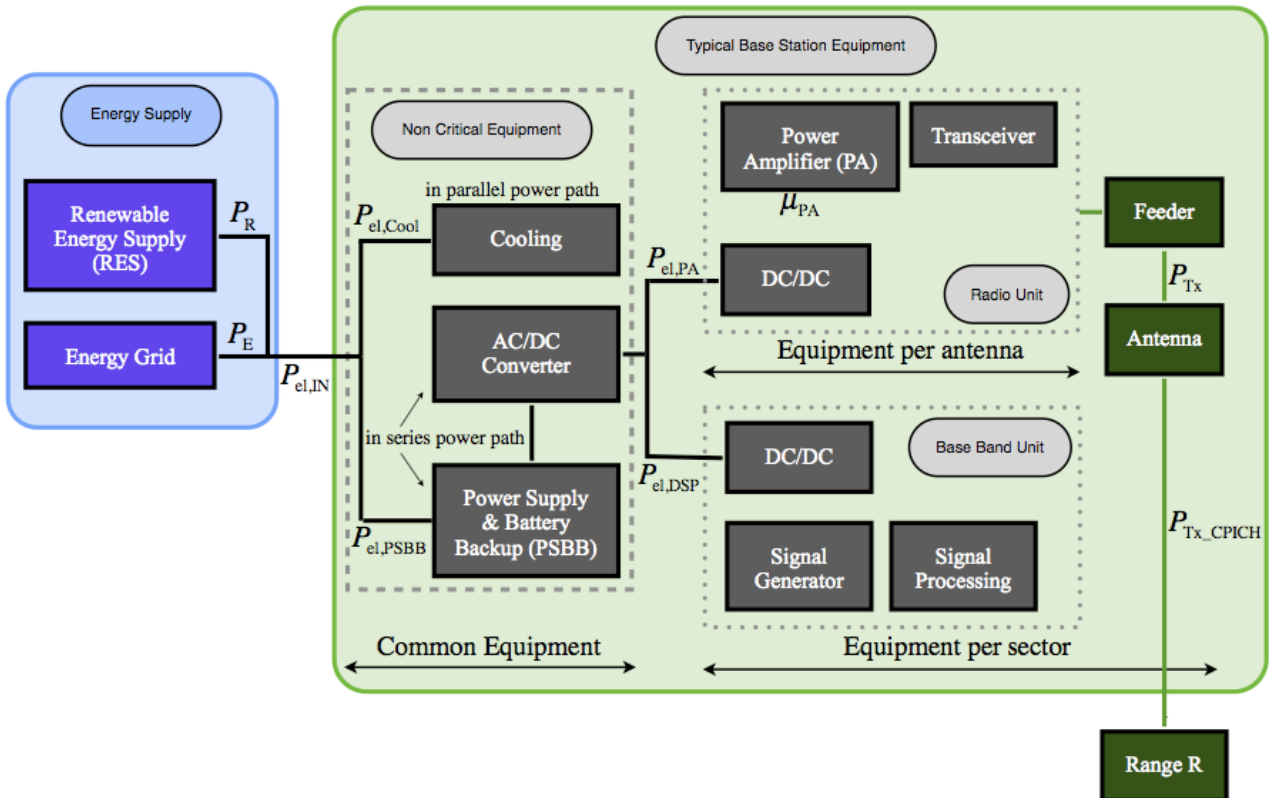
Λόγω του ότι τα περιεχόμενα σε διαφορετικούς τύπους σταθμών βάσης δεν είναι ίδια αναφέρουμε ότι η βασική διαφορά μεταξύ των Macro και Micro BSs είναι το μέγεθος, αφού οι δεύτεροι σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι πιο συμπαγείς, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό των δυνατοτήτων τους ως προς την ισχύ εκπομπής και την περιοχή κάλυψης, γι' αυτό το λόγο όμως παρουσιάζουν μικρή κατανάλωση ενέργειας, [27], [28]. Μια ακόμα διαφορά που παρατηρείται αφορά την ποιότητα και την ποσότητα του εξοπλισμού, ένα παράδειγμα είναι ότι οι Macro BS εξοπλίζονται με πιο αποδοτικούς PAs, [27].

Παρόλο που οι BSs στο μέλλον θα γίνουν πιο αποδοτικοί ενεργειακά, τα περιεχόμενα που θα συνεχίσουν να κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών ενέργειας σε έναν BS θα είναι ο PA με τις αντίστοιχες απώλειες του τροφοδότη, οι διάφορες μορφές ψύξης, ο αριθμός των συχνοτήτων

φέροντος και η κοινή χρήση θέσεων (site sharing), από την άλλη μεριά αναμένεται μείωση στη μέση κατανάλωση ενέργειας ανά bit λόγω ανάπτυξης νέων τεχνολογιών, [25].

Με βάση το Σχ. 5.2 μπορούμε να υπολογίσουμε με προσεγγιστικό τρόπο την κατανάλωση ενέργειας ενός σταθμού βάσης από τον επόμενο τύπο:

$$P_R + P_E = P_{el,IN} \rightarrow P_{el,Cool} + P_{el,PSBB} + N_{Sec} \cdot (N_{PApSec} \cdot P_{el,PA} + P_{el,DSP}) \quad (5.3)$$



Σχ. 5.2. Block διάγραμμα της κατανάλωσης ενέργειας ενός BS.

5.2. Αναλυτικά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας

Στην εργασία [25] αναπτύσσονται μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας δυο διαφορετικών τύπου BSs, τους Macro BSs και τους Micro BSs. Οι συγγραφείς εδώ συνέλεξαν δεδομένα από συνεντεύξεις και δελτία δεδομένων σταθμών βάσης και παρήγαγαν μοντέλα γραμμικών εξισώσεων για την κατανάλωση ενέργειας, στα μοντέλα αυτά η κατανάλωση ενέργειας μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με την ισχύ εκπομπής του BS. Ο σκοπός των μοντέλων κατανάλωσης ενέργειας των BSs που περιγράφονται σε αυτή την εργασία είναι η εισαγωγή των ρεαλιστικών χαρακτηριστικών - με μαθηματικές εξισώσεις - όπως περιγράφηκαν προηγουμένως ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας ενός υβριδικού κινητού δικτύου πρόσβασης. Σε σχέση με την περιγραφή που δόθηκε προηγουμένως για τα περιεχόμενα ενός BS, και συγκεκριμένα ότι αποτελείται από εξοπλισμό που επαναλαμβάνεται σε κάθε τομέα και εξοπλισμό που είναι ίδιος για κάθε τομέα, στα μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας αυτής της εργασίας θεωρείται ότι κάθε περιεχόμενο του BS, ακόμη και αυτά που θεωρούνται κοινά για όλο το σταθμό βάσης, επαναλαμβάνεται σε κάθε κεραία του κάθε τομέα ως ποσοστό απώλειας ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στους Macro

και Micro BSs μοντελοποιήθηκε έτσι ώστε να εξαρτάται άμεσα από το επίπεδο του φορτίου κίνησης.

Πριν περιγράψουμε τα μοντέλα με μαθηματικές εξισώσεις αναφέρουμε ένα ακόμη χαρακτηριστικό τους. Αυτό είναι ότι η κατανάλωση ενέργειας ενός BS αποτελείται από δυο μέρη: το στατικό και το δυναμικό, το στατικό μπορεί να περιγράψει την κατανάλωση ενέργειας σε ένα BS ακόμη και χωρίς φορτίο κίνησης, ενώ η δυναμική κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από το φορτίο κίνησης που πρέπει να εξυπηρετήσει ο κάθε BS. Λόγω του ότι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν περιγράφουν συμβατικούς BSs του σήμερα, η κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από το δυναμικό κομμάτι είναι σχετικά μικρή γι' αυτό και το βέλτιστο μέγεθος της κυψέλης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το στατικό κομμάτι.

Το μοντέλο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ενός Macro BS ακολουθεί τον παρακάτω τύπο:

$$P_{el,ma} = N_{Sec} \cdot N_{PApSec} \cdot (P_{el,PA,ma} + P_{el,SP}) \cdot (1 + F_C) \cdot (1 + F_{PSBB}), \quad (5.4)$$

όπου

$$P_{el,PA,ma} = \frac{P_{Tx,ma}}{\mu_{PA,ma}}, \quad (5.5)$$

όπου στον Πιν 5.1 δίνονται οι ονομασίες και τυπικές τιμές των παραμέτρων. Όπως φαίνεται από τον τύπο 5.4 το μοντέλο ενός συμβατικού Macro BS αποτελείται μόνο από στατική κατανάλωση ενέργειας.

Πιν. 5.1. Τυπικές τιμές παραμέτρων ενός Macro BS, [25].

Macro BS			
N_{Sec}	# Sectors	-	3
$P_{Tx,ma}$	Max. Tx power per PA	[watts]	[0, 40]
P_{SP}	Signal processing overhead	[watts]	58
F_{PSBB}	PSBB loss	[fraction]	0.10
N_{PApSec}	# PAs per sector	-	2
$\mu_{PA,ma}$	PA efficiency	[fraction]	0.38
F_C	Cooling loss	[fraction]	0.20

Όσον αφορά τους Micro BSs, αυτοί καταναλώνουν σημαντικά λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τους Macro BSs, περιέχουν ένα τομέα που αποτελείται από ένα PA και η αποδοτικότητά τους σε σχέση με αυτούς των Macro BS είναι σημαντικά μικρότερη. Οι Micro BS έχουν ως στόχο την κάλυψη μικρών περιοχών, γι' αυτό και η ισχύς εκπομπής είναι αρκετά μικρή, και συνήθως χρησιμοποιούνται στα σύνορα μεταξύ των Macro BS ή σε πυκνές αστικές περιοχές. Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας σε αυτούς τους BSs είναι περισσότερο δυναμικού χαρακτήρα αφού σε μια κυψέλη με μικρή ακτίνα κάλυψης ο αριθμός των MSs μεταβάλλεται με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της κινητικότητας αυτών, παρόλα αυτά, εάν αυτή η περιοχή που καλύπτουν οι Micro κυψέλες είναι πιο βιομηχανική, π.χ. έχει αρκετά γραφεία, η δυναμικότητα της κατανάλωσης ενέργειας μειώνεται. Το μοντέλο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ενός Micro BS δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{el,mi} = P_{el,sta,mi} + P_{el,dyn,mi} \quad (5.6)$$

όπου

$$P_{el,sta,mi} = (P_{el,PA,mi} \cdot F_{Tx,sta} + P_{el,SP,sta}) \cdot (1 + F_{PS}), \text{ και} \quad (5.7)$$

$$P_{el,dyn,mi} = (P_{el,PA,mi} \cdot (1 - F_{Tx,sta}) \cdot F_{Tx,NL} + P_{el,SP,NL}) \cdot N_L \cdot (1 + F_{PS}), \quad (5.8)$$

όπου

$$P_{el,PA,mi} = \frac{P_{Tx,mi}}{\mu_{PA,mi}}, \quad (5.9)$$

όπου στον Πιν. 5.2 παραθέτονται οι ονομασίες και οι τυπικές τιμές των παραμέτρων. Στην εξίσωση 5.8 φαίνεται ότι το ψηφιακό κομμάτι είναι ο βασικός υπεύθυνος για την δυναμική κατανάλωση ενέργειας σε ένα Micro BS και μεταβάλλεται ανάλογα με τον αριθμό των ενεργών ζεύξεων (active links). Τέλος, αναφέρουμε ότι ένας Micro BS δεν απαιτεί ούτε εφεδρική μπαταρία ούτε σύστημα ψύξης.

Πιν. 5.2. Τυπικές τιμές παραμέτρων ενός Micro BS, [25].

Micro BS			
$P_{el,sta,mi}$	Sta. electrical P. Consum.	[watts]	to be derived
$P_{el,dyn,mi}$	Dyn. electrical P. Consum.	[watts]	to be derived
$P_{Tx,mi}$	Max. Tx power	[watts]	[0, 6]
N_L	# active links (maximum)	-	25
$F_{Tx,NL}$	Dyn. Tx power per user	[fraction]	0.04
$P_{el,SP,NL}$	Dyn. signal processing per user	[watts]	0.55
$\mu_{PA,mi}$	PA efficiency	[fraction]	0.20
$F_{Tx,Static}$	Stat. Tx power	[fraction]	0.80
$P_{el,SP,sta}$	Stat. signal processing	[watts]	15
F_{PS}	Power supply loss	[fraction]	0.11

5.3. Απλά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας

Τα απλά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας που θα αναφέρουμε έχουν την καθαρή μορφή μιας τυπικής γραμμικής εξίσωσης: $\alpha \cdot P_{Tx} + b$ (σε Watts), όπου P_{Tx} είναι η ισχύς εκπομπής ενός BS. Αυτό το βασικό μοντέλο αναφέρεται στις εργασίες [7], [29], [28], [30] και [27]. Οι συντελεστές α και b αποτελούν τις τιμές των περιεχομένων όπως αυτές αναφέρθηκαν στα αναλυτικά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας. Συγκεκριμένα, σε ένα Macro BS ο συντελεστής α αντιπροσωπεύει τον εξοπλισμό που εξαρτάται άμεσα από την ισχύ εκπομπής P_{Tx} του BS όπως ο PA, ένα ποσοστό της

ψύξη ανά κεραία και του PSBB, αντίστοιχα, ενώ στον συντελεστή b λαμβάνονται υπόψη τα περιεχόμενα που είναι ανεξάρτητα από την ισχύ εκπομπής του BS όπως η DSP, το υπολειπόμενο ποσοστό της ψύξης ανά κεραία και του PSBB, αντίστοιχα. Από την άλλη μεριά, σε ένα Micro BS οι συντελεστές a και b εξαρτώνται από το φορτίο κίνησης, και μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με αυτό, ο συντελεστής a περιλαμβάνει τα ποσοστά απωλειών που εξαρτώνται από την ισχύ εκπομπής του BS και προέρχονται από την αποδοτικότητα του PA και το τροφοδοτικό, ενώ ο συντελεστής b αναφέρεται στον εξοπλισμό που είναι ανεξάρτητος από την ισχύ εκπομπής του BS, δηλαδή, η DSP και το υπόλοιπο μερίδιο της απώλειας του τροφοδοτικού.

Στις [7] και [29] τα απλά μοντέλα διατυπώνονται με την απλούστερη μορφή τους και σε αυτά γίνεται αναφορά ως η πρώτη έκδοση (1st version). Για τους Macro BSs αναφέρεται ότι είναι ανεξάρτητοι από το φορτίο κίνησης και κάθε συντελεστής εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό των κεραιών που διαθέτει, ενώ από την άλλη μεριά λόγω του ότι στις εργασίες αυτές μελετούνται σενάρια με υψηλό φορτίο κίνησης διακρίνουμε ότι οι Micro BSs αποτελούνται μονάχα από δυναμικά χαρακτηριστικά, και φαίνεται ότι το απλό μοντέλο της πρώτης έκδοσης δεν συμβαδίζει με το αναλυτικό που αναφέρθηκε προηγουμένως. Το μοντέλο για Macro BS αναπαρίστανται ως εξής:

$$P_{el,ma} = \alpha_{ma} \cdot P_{Tx,ma} + b_{ma} \quad (5.10)$$

ενώ για Micro BS ακολουθεί την εξής μορφή:

$$P_{el,mi}(L) = (\alpha_{mi} \cdot P_{Tx,mi} + b_{mi}) \cdot L \quad (5.11)$$

όπου το $L \in [0,1]$ δηλώνει τον δυναμικό χαρακτήρα και αναφέρεται ως φορτίο κίνησης ή επίπεδο δραστηριότητας. Οι τιμές για τους συντελεστές αναφέρονται στο Πιν. 5.3.

Πιν. 5.3. Τιμές παραμέτρων των απλών μοντέλων για την πρώτη έκδοσή τους, [7].

Macro BS			Micro BS		
α_{ma}	-	21.45	α_{mi}	-	7.84
b_{ma}	[watts]	354.44	b_{mi}	[watts]	71.5

Στις εργασίες [28], [30] και [27] τα απλά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας παρουσιάζονται με πιο ειδικευμένη μορφή και σε αυτά γίνεται αναφορά ως η δεύτερη έκδοση (2nd version). Οι Macro BS και εδώ είναι ανεξάρτητοι από το φορτίο κίνησης, δηλαδή, από τους πόρους που δεσμεύονται για μετάδοση, αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης περιοχής κάλυψης που πετυχαίνουν σε σχέση με τους Micro BS, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται πιο σταθερό φορτίο κίνησης. Ενώ, λόγω της μικρής ακτίνας κάλυψης που έχουν οι Micro BSs, τους δίνεται η δυνατότητα να προσαρμόζουν την κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με το φορτίο κίνησης, προσαρμόζοντας τον PA. Ο λόγος είναι ότι η πιθανότητα οι MSs να κατασκηνώνουν σε μια τόσο μικρή περιοχή για αρκετή ώρα είναι μηδαμινή. Το απλό μοντέλο για τους Micro BSs στις [28] και [27] διατυπώνεται με αρκετά πειστική αναφορά ως προς το αναλυτικό, αφού λαμβάνει υπόψη εκτός από δυναμικά χαρακτηριστικά, και στατικά χαρακτηριστικά κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο για Macro BS γράφεται ως εξής:

$$P_{el,ma} = N_{Sec} \cdot N_{PApSec} \cdot (\alpha_{ma} \cdot P_{Tx,ma} + b_{ma}) \quad (5.12)$$

ενώ για Micro BS ακολουθεί την εξής μορφή:

$$P_{el,mi}(L) = \underbrace{(a_{mi,dyn} \cdot L + a_{mi,sta})}_{a_{mi}(L)} \cdot P_{Tx,mi} + \underbrace{(b_{mi,dyn} \cdot L + b_{mi,sta})}_{b_{mi}(L)} \quad (5.13)$$

όπου $L \in [0,1]$ αναφέρεται ως το φορτίο κίνησης και περιγράφει το ποσοστό των πόρων που δεσμεύονται για μετάδοση, όπου μηδενικό (0) και μέγιστο (1) φορτίο κίνησης σημαίνει μηδέν MSs στην κυψέλη και μέγιστο αριθμό MSs, αντίστοιχα. Ο μέγιστος αριθμός MSs εξαρτάται από τους διαθέσιμους πόρους του BS και τις παρεμβολές που αναπτύσσονται. Οι τιμές για τους συντελεστές αναγράφονται στον Πιν. 5.4.

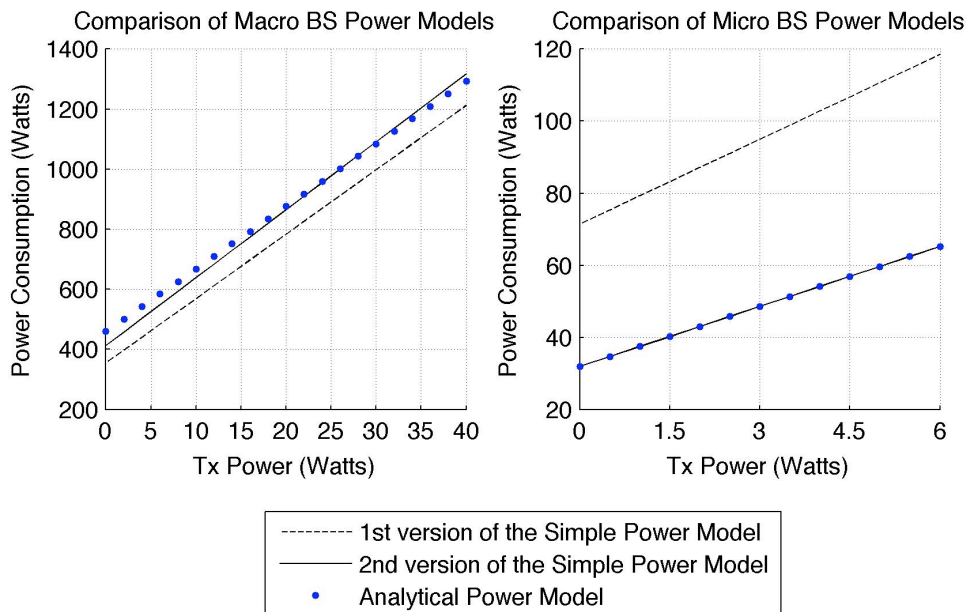
Πιν. 5.4. Τιμές παραμέτρων των απλών μοντέλων για την δεύτερη έκδοσή τους, [28], [27], και [30].

Macro BS			Micro BS		
N_Sec	-	3	a_mi,dyn	-	1.11
N_PApSec	-	2	b_mi,dyn	[watts]	15.26
a_ma	-	3.77	a_mi,sta	-	4.44
b_ma	[watts]	68.73	b_mi,sta	[watts]	16.65

Αν θέλαμε να συγκρίνουμε τους συντελεστές a και b των δυο τύπων σταθμών βάσης ανά κεραία, ή αλλιώς ανά PA, τότε προκύπτουν οι σχέσεις $a_{mi} \geq a_{ma}$ λόγω του ότι η αποδοτικότητα του PA σε έναν Micro BS είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με αυτήν ενός Macro BS, και $b_{mi} \leq b_{ma}$ λόγω των συγκριτικά αυξημένων δυνατοτήτων που παρέχει η DSP σε ένα Macro BS αλλά επίσης και την προσθήκη του απαραίτητου εξοπλισμού ψύξης.

5.4. Σύγκριση μοντέλων

Η εργασία μας απαιτεί την αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή της τεχνικής εξοικονόμησης ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί. Λόγω του ότι η μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας που θα χρησιμοποιήσουμε θεωρεί ότι κάποιοι σταθμοί βάσης θα αυξήσουν την ακτίνα κάλυψής τους μετά την εφαρμογή της τεχνικής, η κατανάλωση ενέργειας σε αυτούς τους BSs (BSs με αυξημένη την ακτίνα κάλυψης) θα αυξηθεί σε σχέση με την αρχική τους κατάσταση. Το Σχ. 5.3 παρουσιάζει το ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται η κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης σε σχέση με την ισχύ εκπομπής για κάθε μοντέλο ενέργειας. Για την ακριβή προσέγγιση και επιλογή ενός μοντέλου κατανάλωσης ενέργειας το οποίο θα μας βοηθήσει - ως εργαλείο στην εργασία - για την αναπαραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, συγκρίνουμε τα μοντέλα και τους συντελεστές αυτών που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.



Σχ. 5.3. Σύγκριση μοντέλων κατανάλωσης ενέργειας για Macro και Micro BSs. Για τους Micro BS θέτουμε μέγιστο φορτίο κίνησης (Full Load).

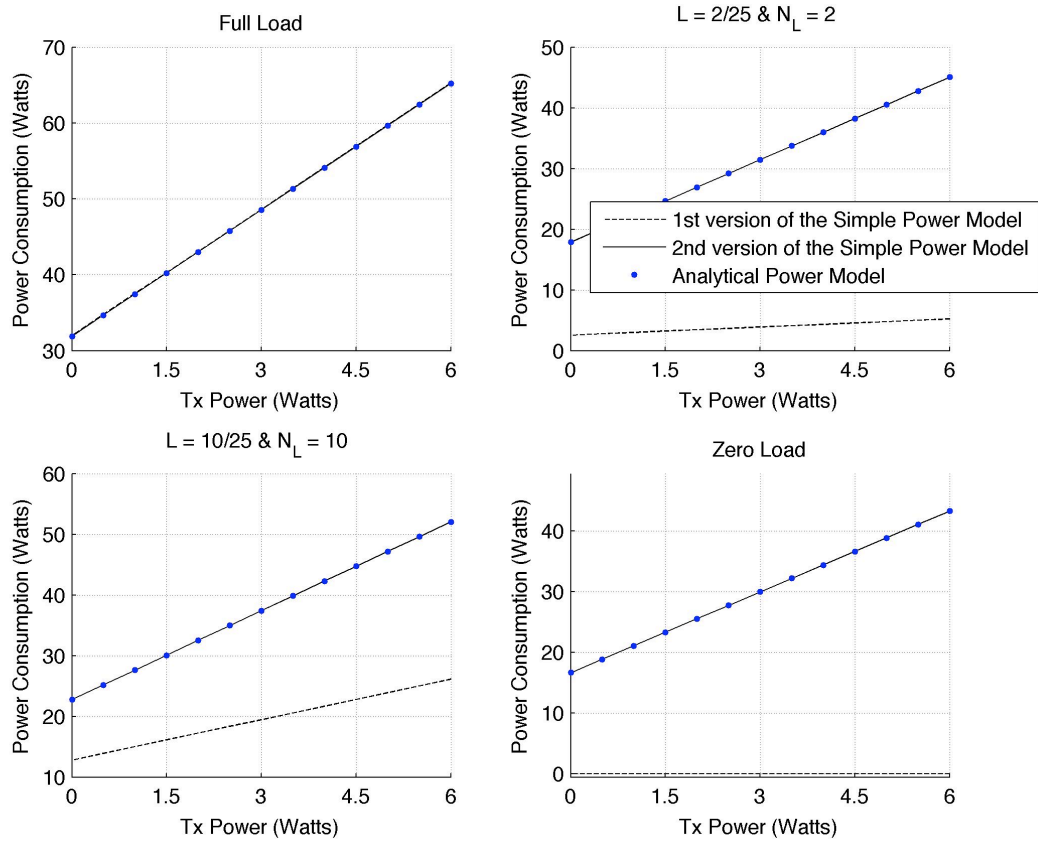
Ο στόχος μας είναι να επιλέξουμε ένα απλό μοντέλο και τους συντελεστές a και b που αναπαριστούν με ακρίβεια το αναλυτικό μοντέλο. Ο κύριος λόγος είναι ότι τα απλά μοντέλα χρησιμοποιούν λιγότερες μεταβλητές γι' αυτό και είναι εύκολα στην χρήση και αναπαραγωγή τους. Όπως περιγράφηκε στις αναλύσεις και αναφορές των μοντέλων, το απλό μοντέλο και οι συντελεστές a και b που αναπαριστούν πιστά το αναλυτικό είναι αυτοί στην δεύτερη έκδοση, αφού ισχύει ότι το μοντέλο κάνει χρήση στατικής και δυναμικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Το απλό μοντέλο στην πρώτη έκδοση μπορεί τελικά να περιγράψει το αναλυτικό όταν οι τιμές των συντελεστών a και b δίνονται από την [29], τιμές που παρουσιάζονται στον Πιν. 5.5, αλλά αυτό συμβαίνει μόνο για την περίπτωση όπου $L = 1$, τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά σε σχέση με αυτά του αναλυτικού μοντέλου όταν το $L \in [0,1)$, αφού όπως αναφέραμε, αυτό το μοντέλο χαρακτηρίζεται μόνο από δυναμική κατανάλωσης ενέργειας.

Πιν. 5.5. Τιμές παραμέτρων ενός Micro BS για το απλό μοντέλο στην απλούστερη μορφή, [29].

Micro BS		
a_{mi}	-	5.55
b_{mi}	[watts]	32

Η σύγκριση των μοντέλων για Micro BS με τις νέες τιμές των συντελεστών για το απλό μοντέλο στην απλούστερη μορφή δίνεται στο Σχ. 5.4. Τα διάφορα γραφήματα στο Σχ. 5.4 δείχνουν πως μεταβάλλεται η κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με το φορτίο κίνησης. Είναι σαφές και από εδώ ότι η αξιοποίηση του απλού μοντέλου στην δεύτερη έκδοση αποτελεί την ιδανική λύση για την

εξαγωγή των αποτελεσμάτων στην εργασία μας. Εδώ χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από τους Πιν. 5.4 και 5.5.



Σχ. 5.4. Κατανάλωση ενέργειας σε Micro BS για διάφορες τιμές του φορτίου κίνησης.

Κεφάλαιο 6

Ζητήματα Κατανάλωσης Ενέργειας σε Διάφορες Τοπολογίες Κινητών Δικτύων Πρόσβασης

6.1. Μεθοδολογία και υποθέσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφορες τοπολογίες κινητών δικτύων πρόσβασης: οι υβριδικές που αποτελούνται από Macro και Micro BSs ταυτόχρονα και οι τοπολογίες τύπου Micro BS. Για κάθε μια τοπολογία εξετάζεται η ενεργειακή αποδοτικότητα σε σχέση με το μέγεθος των BSs και το πλήθος των Micro BS για τις υβριδικές τοπολογίες, και το μέγεθος και το σχήμα κάλυψης της κυψέλης για τις τοπολογίες Micro BS. Εξετάζεται επίσης η κατανάλωση ενέργειας των δικτύων και η διακοπή λειτουργίας των κινητών χρηστών για τα διάφορα δίκτυα ανάλογα με το πλήθος των χρηστών που εισάγεται σε αυτά.

Τα αποτελέσματα προέκυψαν εκτελώντας τις προσομοιώσεις με τα εξής χαρακτηριστικά: για κάθε σύνολο χρηστών εκτελούμε τον αλγόριθμο για μερικά λεπτά (4 λεπτά) έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί η κίνηση στο επίπεδο που θέλουμε να μελετήσουμε, στην συνέχεια ο αλγόριθμος εκτελείται για 10 ακόμα λεπτά και οι χρήστες που βρίσκονται ήδη στο δίκτυο συνυπολογίζονται με τους χρήστες που φτάνουν εκ νέου στο δίκτυο για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου και την επίδοση του ως προς την διακοπή λειτουργίας των χρηστών. Για την ακριβή προσέγγιση των αποτελεσμάτων κάθε προσομοίωση εκτελείται 10 φορές και εξάγονται οι μέσοι όροι. Οι χρήστες φτάνουν στο δίκτυο με poisson διαδικασία με ρυθμό άφιξης λ (MSs/second) και παραμένουν σε αυτό για ένα χρονικό διάστημα που κυμαίνεται εκθετικά με μέση τιμή $1/\mu$ (second). Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρονική στιγμή μετά την σταθεροποίηση της κίνησης θα υπάρχουν στο σύστημα λ/μ MSs. Η μέση τιμή του χρονικού διαστήματος που ένας χρήστης παραμένει στο δίκτυο είναι $1/\mu = 60$ second, ενώ ο ρυθμός άφιξης επιλέγεται εκ νέου για κάθε δίκτυο.

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας των δικτύων αυτή υπολογίζεται με τους τύπους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι τύποι όπως είναι γνωστό είναι προσεγγιστικοί αλλά έχουν αναπτυχθεί με τιμές πραγματικών χαρακτηριστικών. Επίσης, η κατανάλωση ενέργειας στους Micro BSs είναι εξαρτημένη από το φορτίο κίνησης γεγονός που χαρακτηρίζει αυτούς τους BSs ως ενεργειακά αποδοτικούς. Από την άλλη μεριά η κατανάλωση ενέργειας στους Macro BSs δεν εξαρτάται από το φορτίο κίνησης λόγω της μεγάλης περιοχής κάλυψης τους, γι' αυτό και δεν χαρακτηρίζονται ως ενεργειακά αποδοτικοί.

Η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας - το λεγόμενο "outage probability" - των χρηστών σε κάθε δίκτυο προκαλείται για τους εξής λόγους: πρώτον, αν ένας χρήστης φτάσει στο δίκτυο και δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από έναν BSs λόγω της μη-διαθεσιμότητας ράδιο-πόρων του εν λόγω σταθμού βάσης (στην περίπτωση του μοντέλου μας οι διαθέσιμοι πόροι είναι η ισχύς εκπομπής στα κανάλια κίνησης) και δεύτερον, αν ο χρήστης φτάσει στο δίκτυο και η περιοχή στην οποία βρίσκεται δεν καλύπτεται από κανέναν BS (σε αυτό το σημείο της εργασίας κάθε δίκτυο που εξετάζουμε παρέχει πλήρη κάλυψη στην περιοχή που φτάνουν οι MSs).

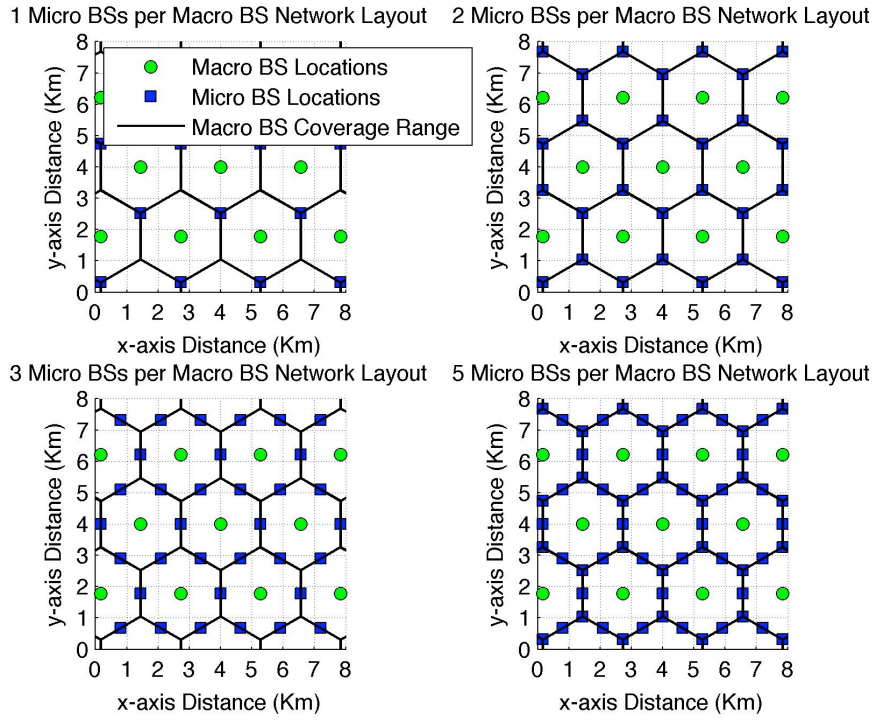
6.2. Υβριδικές τοπολογίες

Οι υβριδικές τοπολογίες που εισάγουμε στις προσομοιώσεις αποτελούνται από Macro σταθμούς βάσης και Micro σταθμούς βάσης. Οι Macro BSs διατάσσονται με εξαγωνική διάταξη και καλύπτουν μια περιοχή 64 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Από την άλλη μεριά οι Micro BSs καλύπτουν κυκλική περιοχή και τοποθετούνται στα σύνορα των Macro BSs με τέσσερις

διαφορετικές διατάξεις όπως φαίνεται στο Σχ. 6.1. Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων του καναλιού που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις φαίνονται στο Πιν. 6.1

Πιν 6.1. Παράμετροι καναλιού που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της υβριδικής τοπολογίας δικτύου

Micro Tx power	<i>watts</i>	5
Macro Tx power	<i>watts</i>	20
Micro Antenna Gain	<i>dBi</i>	2
Macro Antenna Gain	<i>dBi</i>	15
Receiver Gain	<i>dBi</i>	-1
Target_EbNo	<i>dB</i>	7.5
User bit rate	<i>kbps</i>	12.2
Speech activity level	-	0.5
Orthogonality factor	-	0.327
Chip rate	<i>Mcps</i>	3.84
Receiver NF	<i>dB</i>	7
Carrier frequency	<i>MHz</i>	2000
MS Antenna height	<i>metres</i>	1.5
Micro Antenna height	<i>metres</i>	10
Macro Antenna height	<i>metres</i>	27
No of floors	-	7
roof_height	<i>metres</i>	3
Building seperation	<i>metres</i>	20
Road width	<i>metres</i>	10
Road orientation	<i>degrees</i>	50



Σχ. 6.1. Υβριδικές τοπολογίες με Macro και Micro BSs.

6.2.1. Μέτρο ενεργειακής αποδοτικότητας στα υβριδικά δίκτυα

Το γράφημα στο Σχ. 6.2 παρουσιάζει την κατανάλωση ενέργειας ανά εμβαδόν. Από εδώ μπορούμε να προσδιορίσουμε την βέλτιστη απόσταση D μεταξύ δυο γειτονικών Macro BSs με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Το μέτρο που χρησιμοποιείται σε αυτές τις μετρήσεις είναι η κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Έστω ότι ένας Micro και ένας Macro καταναλώνουν P_m και P_M , αντίστοιχα και ότι σε ένα Macro περιέχονται N Micro, τότε η κατανάλωση ενέργειας αυτών των BSs είναι $P_C = P_M + N \cdot P_m$. Επομένως, η κατανάλωση ενέργειας ανά εμβαδόν δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{P_C}{A} = \frac{P_M + N \cdot P_m}{A} \quad (6.1)$$

όπου A είναι το εμβαδόν κάλυψης ενός Macro BS και είναι ίσο με

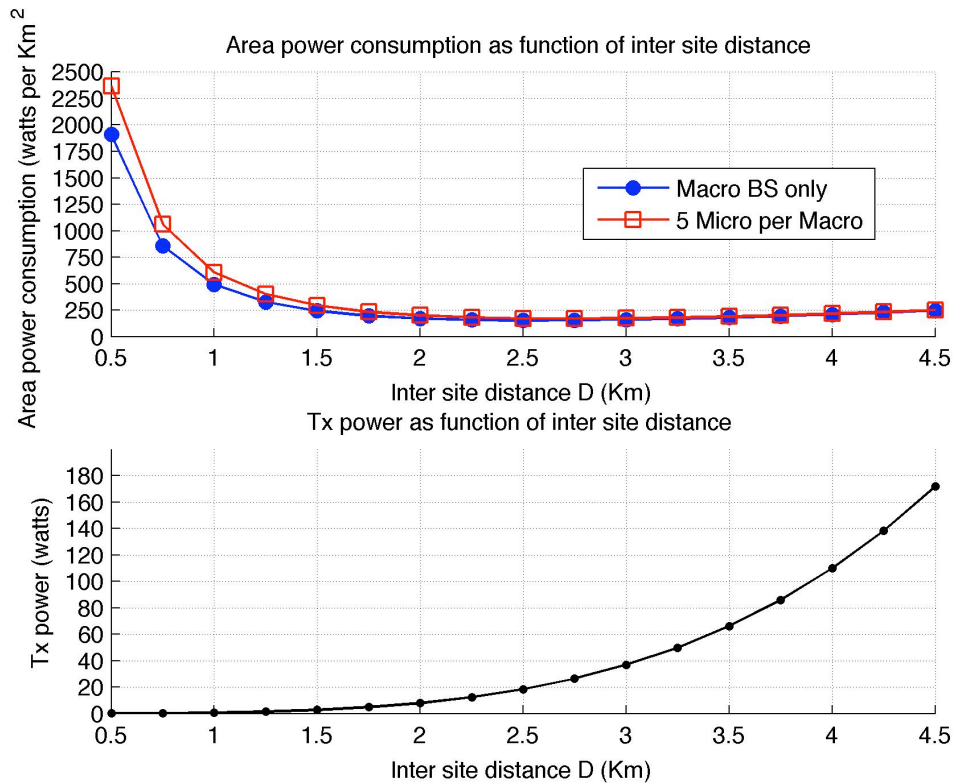
$$A = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot R^2 \quad (6.2)$$

με

$$R = D / \sqrt{3} \quad (6.3)$$

Από το Σχ. 6.2 παρατηρούμε ότι στις υβριδικές τοπολογίες όσο περισσότερα Micro cells βρίσκονται στα σύνορα των Macro BSs τόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η απόσταση D δυο γειτονικών Macro BSs, στην οποία το σύστημα θα λειτουργεί με την χαμηλότερη κατανάλωση

ενέργειας ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Πιο συγκεκριμένα το δίκτυο με Macro BSs μόνο μπορεί να έχει βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο όταν η απόσταση δυο γειτονικών Macro D είναι ίση με 2.5 km , ενώ το δίκτυο με 5 Micro BSs ανά Macro BS μπορεί να λειτουργήσει το ίδιο αποδοτικά και στις δυο τιμές D , 2.5 km και 2.75 km . Από την άλλη μεριά όμως όσο περισσότερους Micro BSs εισάγουμε στο δίκτυο τόσο περισσότερη θα είναι η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος. Το γράφημα με τη μαύρη καμπύλη προσδιορίζει την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής για κάθε τιμή της απόστασης D .

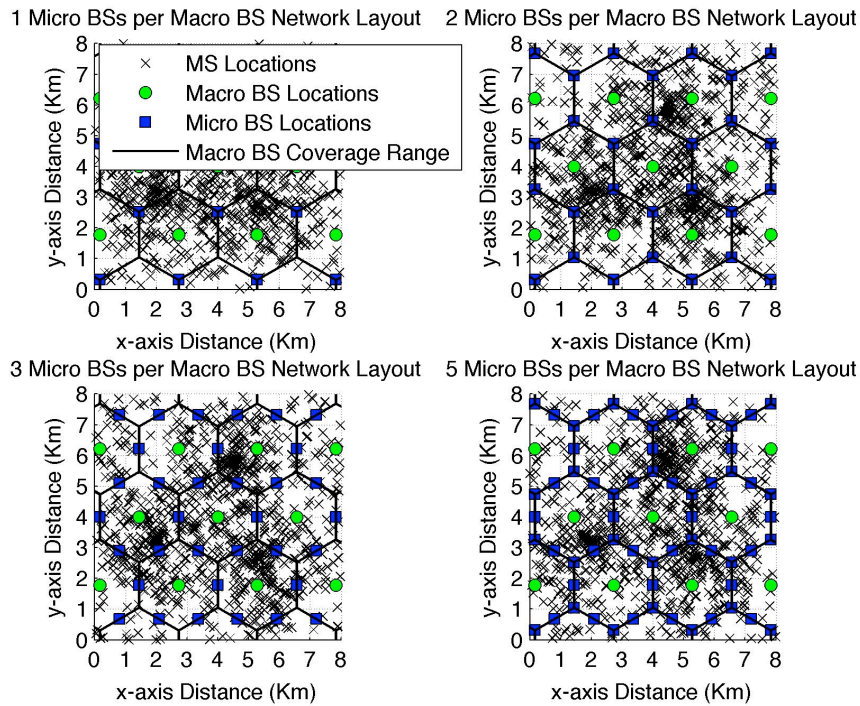


Σχ. 6.2. Το μέτρο ενεργειακής αποδοτικότητας στα υβριδικά δίκτυα. Χωρική κατανάλωση ενέργειας και ισχύς εκπομπής σε σχέση με την απόσταση δυο γειτονικών Macro BSs

6.2.2. Κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της χωρητικότητας των υβριδικών δικτύων

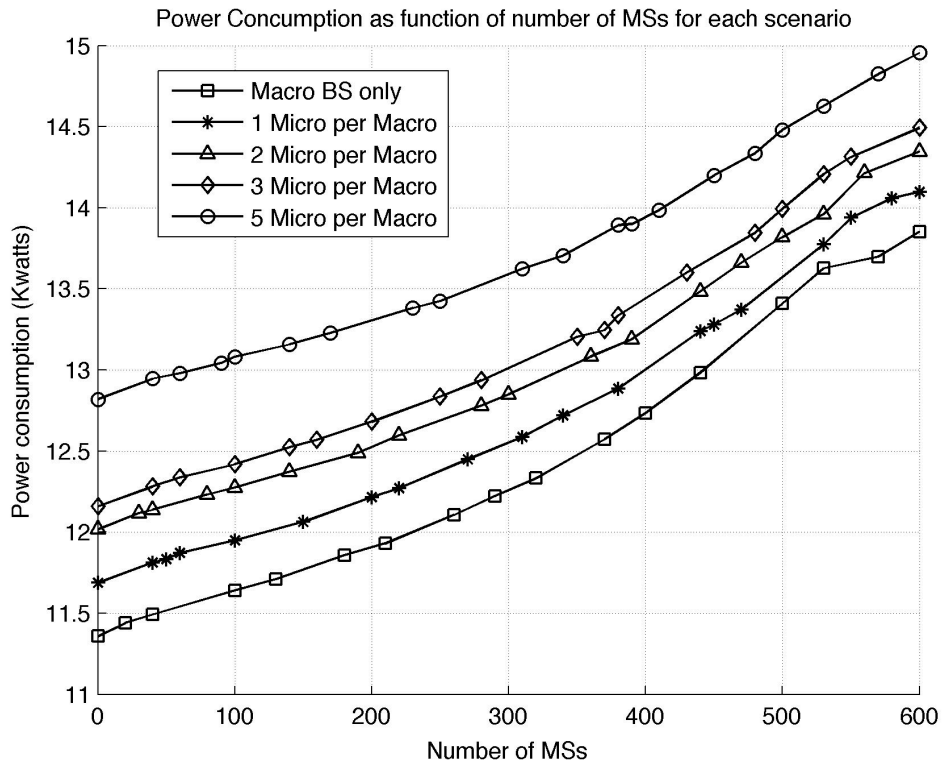
6.2.2.1. Κατανομή κινητών χρηστών με χωρική διακύμανση

Εδώ εισάγουμε την κατανομή κινητών χρηστών στα δίκτυα και εξετάζουμε την κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με την χωρητικότητα τους. Αρχικά εξετάζουμε αποκλειστικά χωρική κατανομή χρηστών - σε τρία σημεία του χώρου θέτουμε υψηλότερη κίνηση φορτίου σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.3. Στα 3 αυτά σημεία ένας χρήστης φτάνει στο δίκτυο με 20% πιθανότητα και οι τοποθεσίες τους ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή το κέντρο και τυπική διακύμανση την ακτίνα R , την οποία θέτουμε 2 km για κάθε μια περιοχή, η υπόλοιπη περιοχή χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφη κατανομή. Στην συνέχεια παρατηρούμε τις επιδόσεις της κάθε τοπολογίας εξετάζοντας την κατανάλωση ενέργειας και την διακοπή λειτουργίας των κινητών χρηστών σε κάθε μια.

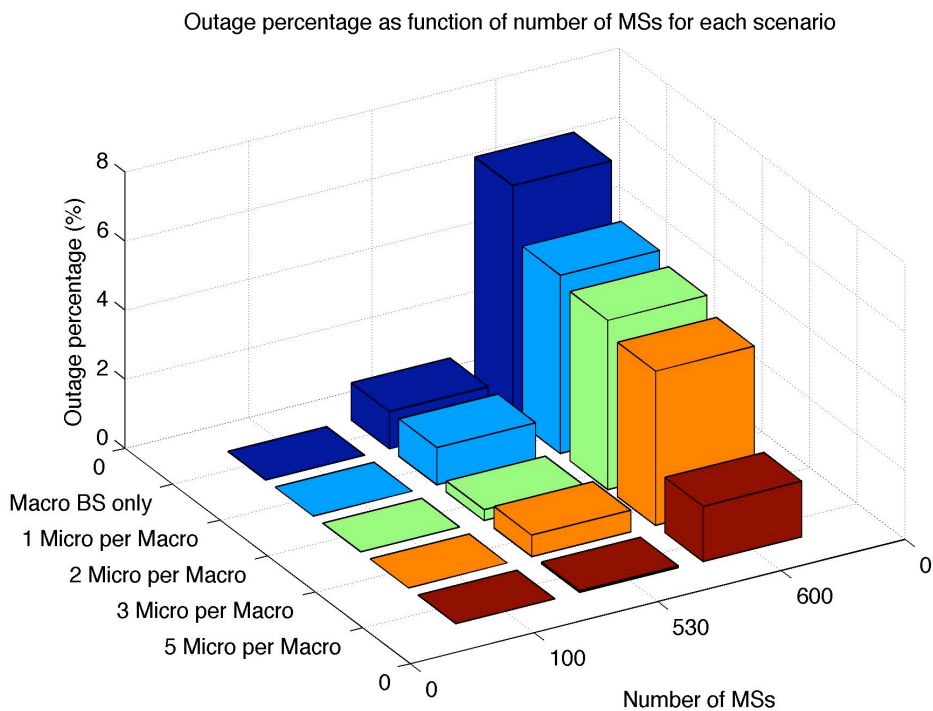


Σχ. 6.3. Κατανομή κινητών χρηστών στις υβριδικές τοπολογίες δικτύων

Το Σχ. 6.4 παρουσιάζει την κατανάλωση ενέργειας των υβριδικών τοπολογιών σε σύγκριση με την τοπολογία με Macro BSs μόνο. Παρατηρείται ότι η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας για κάθε τοπολογία είναι γραμμική. Καθώς αυξάνονται οι χρήστες η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται ανάλογα - με γραμμικό τρόπο - από ένα σημείο και μετά όμως ο ρυθμός αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας μειώνεται, αυτό συμβαίνει σε διαφορετικό σημείο για κάθε τοπολογία δικτύου. Για παράδειγμα, στη τοπολογία με Macro BSs μόνο αυτό το γεγονός φαίνεται όταν ο αριθμός των χρηστών έχει ξεπεράσει τους 530, ενώ στην τοπολογία με 5 Micro BSs ανά Macro BS αυτό το γεγονός δεν έχει παρουσιαστεί ακόμα. Αυτό το γεγονός συμβαίνει κατά κύριο λόγο γιατί έχουν ανομοιόμορφη κατανομή χρηστών στο δίκτυο, και εξηγείται με τον εξής τρόπο: στις περιοχές που έχουμε αυξημένη κίνηση οι σταθμοί βάσης θα γεμίσουν με χρήστες πιο γρήγορα από τους άλλους σταθμούς στο δίκτυο, επομένως αφού οι πρώτοι θα έχουν φτάσει στην μέγιστη χωρητικότητά τους δεν θα μπορούν να καταναλώσουν περισσότερη ενέργεια, λόγω του ότι θα έχουν προσφέρει όλη την ισχύ εκπομπής (διαθέσιμους πόρους) τους στους χρήστες. Στο Σχ. 6.5 φαίνεται το ποσοστό διακοπής λειτουργίας των κινητών χρηστών σε κάθε μια τοπολογία. Είναι φανερό ότι το χαμηλότερο ποσοστό λειτουργίας το παρουσιάζει η τοπολογία με τους 5 Micro BSs ανά Macro BS, το οποίο σημαίνει ότι έχει και την μεγαλύτερη χωρητικότητα. Συγκρίνοντας τα δυο γραφήματα, μπορούμε να δούμε ότι, όσο πιο γρήγορα εμφανίζεται το σημείο στο οποίο αλλάζει ο ρυθμός της αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας (το σημείο αυτό θεωρούμε ότι είναι ο αριθμός χρηστών στο δίκτυο) τόσο τόσο μεγαλύτερη είναι η διακοπή λειτουργίας των χρηστών στην για την εν λόγω τοπολογία.



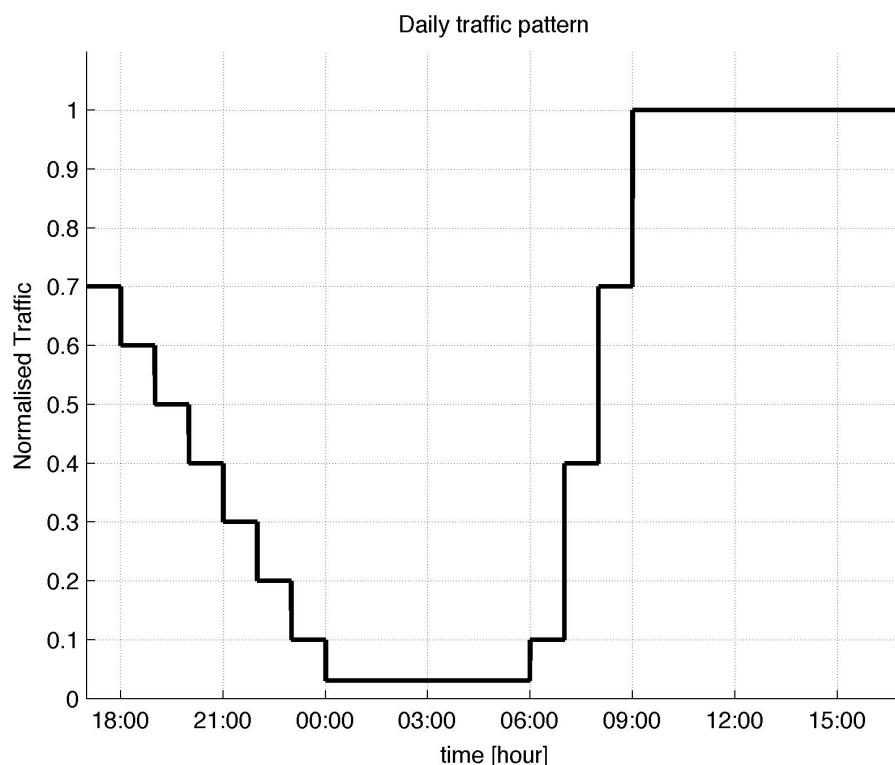
Σχ. 6.4. Κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το πλήθος των κινητών χρηστών στις διάφορες τοπολογίες υβριδικών δικτύων



Σχ. 6.5. Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ανάλογα με την διάταξη του δικτύου και το πλήθος των κινητών χρηστών.

6.2.2.2. Κατανομή κινητών χρηστών με χωρική και χρονική διακύμανση

Σε αυτό το σημείο εισάγουμε το πρότυπο κίνησης (traffic pattern) κατά την διάρκεια μιας ημέρας, όπως αυτό φαίνεται στο Σχ. 6.6. Θεωρούμε ότι κάθε ώρα η κίνηση χαρακτηρίζεται σταθερή, ενώ αλλάζει επίπεδο όταν εισάγεται στην επόμενη ώρα. Αυτό το πρότυπο κίνησης χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις ώστε να υπολογιστεί η κατανάλωση ενέργειας διαφόρων τοπολογιών και να εκτιμηθεί η απόδοσή του με βάση την διακοπή λειτουργίας των χρηστών. Επιπλέον υποθέσαμε ότι, οι ώρες αιχμής διαρκούν 8 ώρες, από τις 09:00 μέχρι τις 17:00 και οι ώρες χαμηλής κίνησης διαρκούν 6 ώρες, από τις 00:00 μέχρι τις 06:00. Κατά την διάρκεια της ημέρας η κίνηση από χαμηλή σε υψηλή αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό, ενώ κατά την διάρκεια της νύκτας από υψηλή κίνηση σε χαμηλή με πιο αργό ρυθμό. Η κίνηση είναι κανονικοποιημένη, υψηλή κίνηση έχουμε όταν είναι ίση με 1 και χαμηλή κίνηση όταν είναι ίση με 0.03. Για κάθε ώρα ισχύει ότι η κατανομή των χρηστών είναι ανομοιόμορφη, και ακολουθεί το πρότυπο που αναφέρθηκε προηγουμένως.

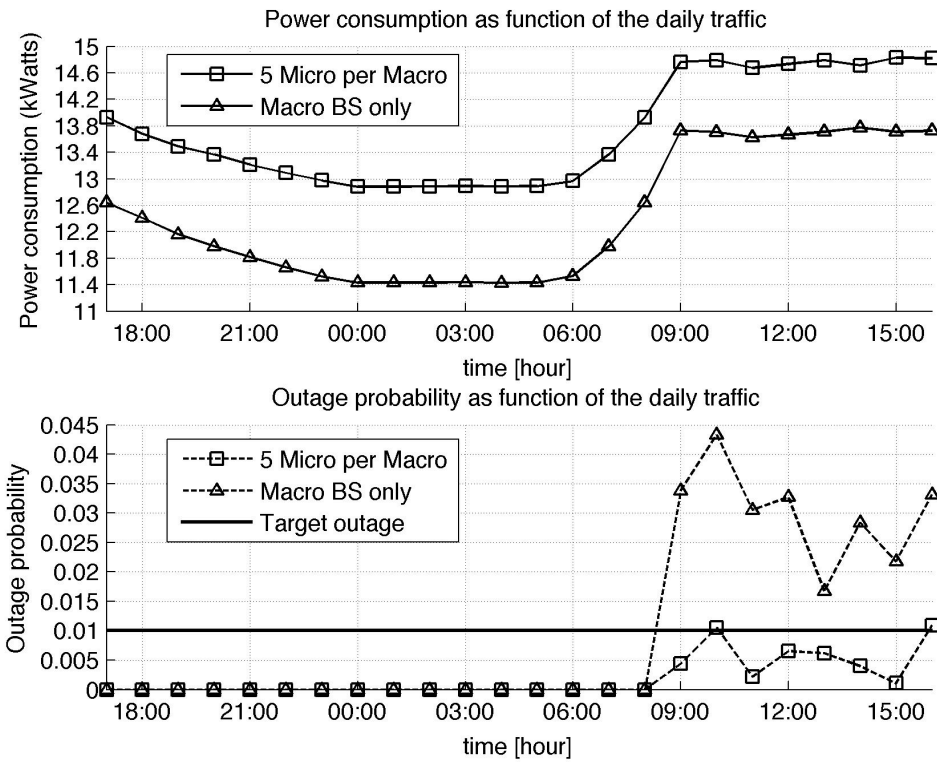


Σχ. 6.6. Πρότυπο κίνησης κατά την διάρκεια μιας ημέρας

Το Σχ. 6.7. παρουσιάζει την κατανάλωση ενέργειας των υβριδικών δικτύων και την διακοπή λειτουργίας των χρηστών για αυτές τις τοπολογίες. Λόγω του ότι η διακοπή λειτουργίας των δικτύων πρέπει να περιορίζεται από ένα κατώφλι, θέτουμε την επιθυμητή διακοπή λειτουργίας στο 1%. Επομένως, ένα δίκτυο το οποίο παρουσιάζει διακοπή λειτουργίας χρηστών μικρότερη από το κατώφλι, 1%, αποδίδει ικανοποιητικά. Για να πετύχουμε την διακοπή λειτουργίας των χρηστών έτσι ώστε να είναι κάτω από το κατώφλι, εκτελέσαμε μερικές προσομοιώσεις μέχρι να το καταφέρουμε. Θεωρήσαμε λοιπόν ότι ο μέγιστος αριθμός χρηστών κάθε χρονική στιγμή κατά τις ώρες αιχμής πρέπει να είναι 550 χρήστες για το υβριδικό δίκτυο με 5 Micro BSs ανά Macro BS. Ο ίδιος αριθμός χρηστών χρησιμοποιήθηκε και για το δίκτυο με Macro BSs μόνο.

Τα αποτελέσματα δείχνουν τις διαφορές των δυο αυτών δικτύων κατά την διάρκεια της ημέρας, όπως φαίνονται στο Σχ. 6.7, ως προς την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου και την διακοπή λειτουργίας των χρηστών. Η κατανάλωση ενέργειας στη τοπολογία με 5 Micro BSs ανά Macro BS

είναι αυξημένη σε σχέση με την απλή τοπολογία των Macro BSs, αυτό συμβαίνει λόγω των επιπρόσθετων σταθμών βάσης Micro. Από την άλλη μεριά η διακοπή λειτουργίας των χρηστών στην απλή τοπολογία με Macro BSs μόνο είναι σημαντικά αυξημένη και ξεπερνάει το κατώφλι (1%) σε σχέση με την άλλη τοπολογία, αυτό συμβαίνει λόγω του ότι συγκρίναμε την μέγιστη χωρητικότητα ενός δικτύου που χωράει περισσότερους χρήστες με ένα δίκτυο που μέγιστη χωρητικότητα είναι μικρότερη.



Σχ. 6.7. Συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου και πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών στα δίκτυα υβριδικών τοπολογιών πάνω από το ημερήσιο πρότυπο κίνησης.

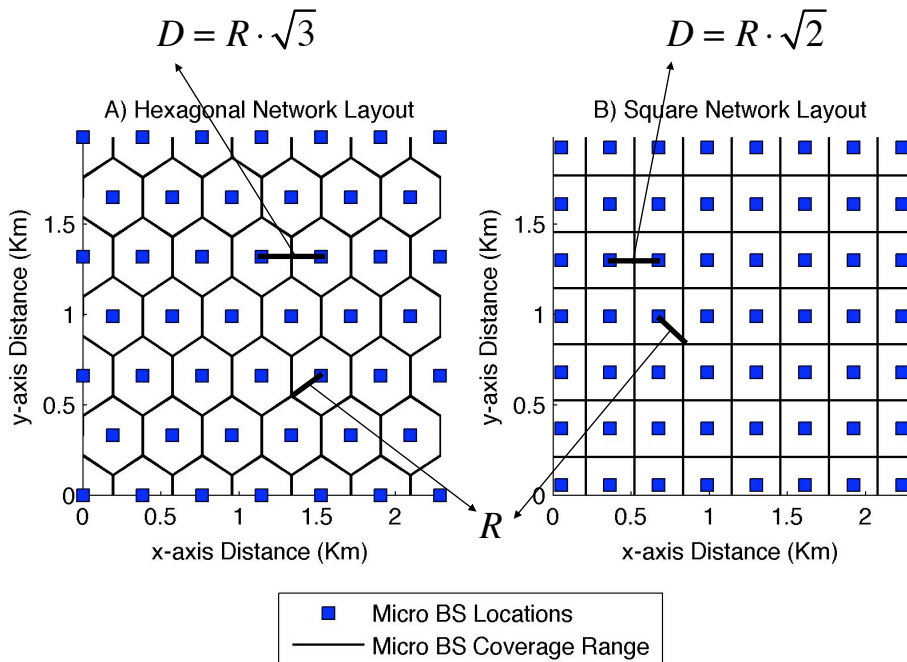
6.3. Ομοιογενής τοπολογίες σταθμών βάσης τύπου Micro cell

Σε αυτό το σημείο αναλύονται οι ομοιογενής τοπολογίες των Micro BSs που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις. Χρησιμοποιούμε δυο γνωστές τοπολογίες έτσι ώστε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Η πρώτη τοπολογία είναι η εξαγωνική και δεύτερη η τετραγωνική, όπως φαίνεται στο Σχ.6.8. Οι τοπολογίες αυτές διαφέρουν ως προς την διάταξή τους και την απόσταση D , δυο γειτονικών σταθμών βάσης, παρόλα αυτά, και οι δύο τοπολογίες χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να εξάγουν την ίδια ακτίνα κάλυψης. Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων του καναλιού που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις φαίνονται στο Πιν. 6.2

Πιν 6.2. Παράμετροι καναλιού που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της ομοιογενούς τοπολογίας δικτύου

Micro Tx power	watts	0.3
Micro Antenna Gain	dBi	2
Receiver Gain	dBi	-1

Target_EbNo	<i>dB</i>	7.5
User bit rate	<i>kbps</i>	12.2
Speech activity level	-	0.5
Orthogonality factor	-	0.327
Chip rate	<i>Mcps</i>	3.84
Receiver NF	<i>dB</i>	7
Carrier frequency	<i>MHz</i>	2000
MS Antenna height	<i>metres</i>	1.5
Micro Antenna height	<i>metres</i>	10
No of floors	-	5
roof_height	<i>metres</i>	0
Building seperation	<i>metres</i>	30
Road width	<i>metres</i>	15
Road orientation	<i>degrees</i>	90



Σχ. 6.8. Τοπολογίες δικτύων με Micro BSs: A) εξαγωνική διάταξη δικτύου και B) τετραγωνική διάταξη δικτύου.

6.3.1. Μέτρο ενεργειακής αποδοτικότητας σε micro cell τοπολογίες

Το γράφημα του Σχ. 6.9 στοχεύει στην εύρεση της βέλτιστης απόστασης μεταξύ δυο γειτονικών σταθμών βάσης έτσι ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Το μέτρο που χρησιμοποιείται για την εύρεση την βέλτιστης κατανάλωσης ενέργειας ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ορίζεται ως εξής:

$$P = \frac{P_m}{A} \quad (6.4)$$

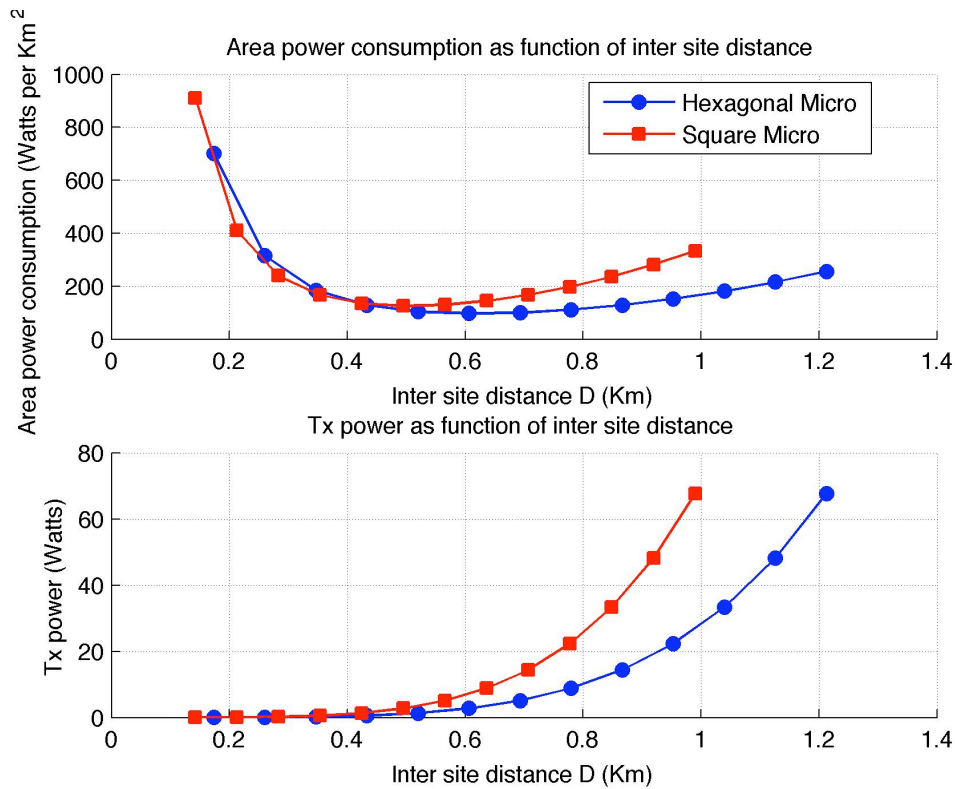
όπου P_m είναι η κατανάλωση ενέργειας ενός Micro BS, και A είναι η περιοχή κάλυψης της εν λόγω κυψέλης, για την εξαγωνική κυψέλη ισχύουν οι τύποι 6.2 και 6.3, ενώ για την τετραγωνική κυψέλη, η περιοχή κάλυψης είναι η εξής:

$$A_{sq} = 2 \cdot R^2 \quad (6.5)$$

όπου,

$$R = D / \sqrt{2} . \quad (6.6)$$

Θεωρούμε ότι η μέγιστη ακτίνα κάλυψης της εξαγωνικής και της τετραγωνικής κυψέλης μπορεί να πάρει τιμές στο εύρος $R \in [0.1, 0.7] \text{ km}$. Επομένως για κάθε R εξάγουμε το αντίστοιχη απόσταση μεταξύ των σταθμών βάσης D και παράλληλα την κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο μαζί με την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής της κάθε κυψέλης, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα στο Σχ. 6.9 δείχνουν ότι οι εξαγωνικές κυψέλες είναι πιο αποδοτικές ενεργειακά από τις τετραγωνικές. Αυτό συμβαίνει διότι οι πρώτες καλύπτουν μεγαλύτερο εμβαδόν επομένως η κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο σε αυτές θα είναι μικρότερη, αφού η σχέση τους είναι αντιστρόφως ανάλογο όπως φαίνεται και από την εξίσωση 6.4. Έτσι η βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας τετραγωνικό χιλιόμετρο ή ενεργειακή αποδοτικότητα των εξαγωνικών κυψέλων φαίνεται όταν η απόσταση D είναι 0.6 km ενώ για τις τετραγωνικές όταν αυτή η απόσταση είναι 0.5 km .

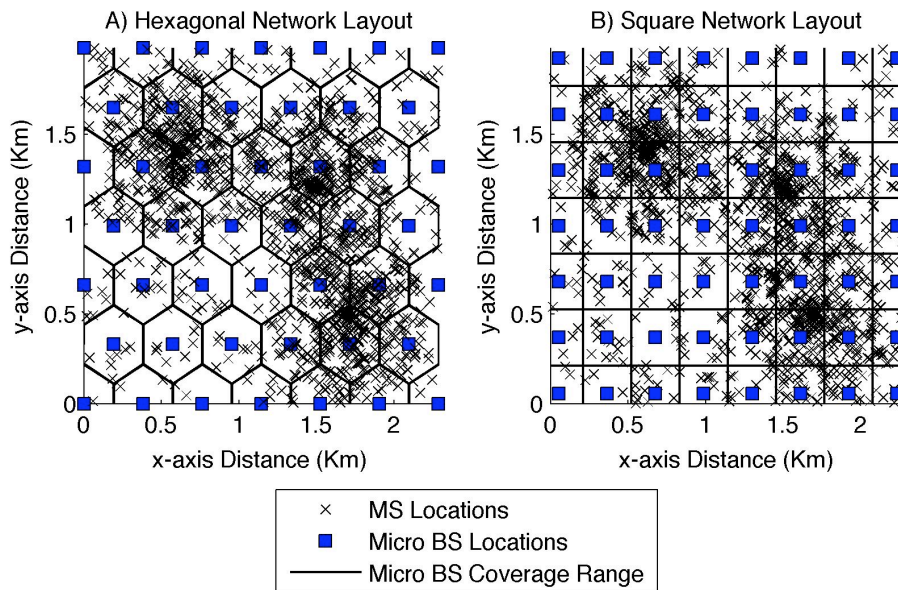


Σχ. 6.9. Ενεργειακή αποδοτικότητα σε δυο διατάξεις δικτύων με Micro BSs: την εξαγωνική και τετραγωνική διάταξη. Χωρική κατανάλωση ενέργειας και ισχύς εκπομπής σε σχέση με την απόσταση δυο γειτονικών BSs.

6.3.2. Κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της χωρητικότητας των micro cell δικτύων

6.3.2.1. Κατανομή κινητών χρηστών με χωρική διακύμανση

Σε αυτό το σημείο τοποθετούμε στο δίκτυο κινητούς χρήστες και εξετάζουμε την κατανάλωση ενέργειας των δικτύων και την διακοπή λειτουργίας των χρηστών. Αυτό γίνεται θεωρώντας ότι η κατανομή του φορτίου των χρηστών στην περιοχή είναι υψηλότερη σε 3 σημεία σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.10. Οι χρήστες εισάγονται με 25% πιθανότητα σε κάθε μια από αυτές τις περιοχές και κατανέμονται κανονικά με μέση τιμή το κέντρο της περιοχής και τυπική διακύμανση την ακτίνα R , την οποία θέτουμε 0.5 km . Ενώ στην υπόλοιπη περιοχή οι χρήστες που φτάνουν στο δίκτυο κατανέμονται ομοιόμορφα. Στη συνέχεια εξετάζουμε τις επιδόσεις των δικτύων ανάλογα με την ενέργεια που καταναλώνουν και την διακοπή λειτουργίας των κινητών χρηστών σε σχέση με το πλήθος των χρηστών στο δίκτυο.

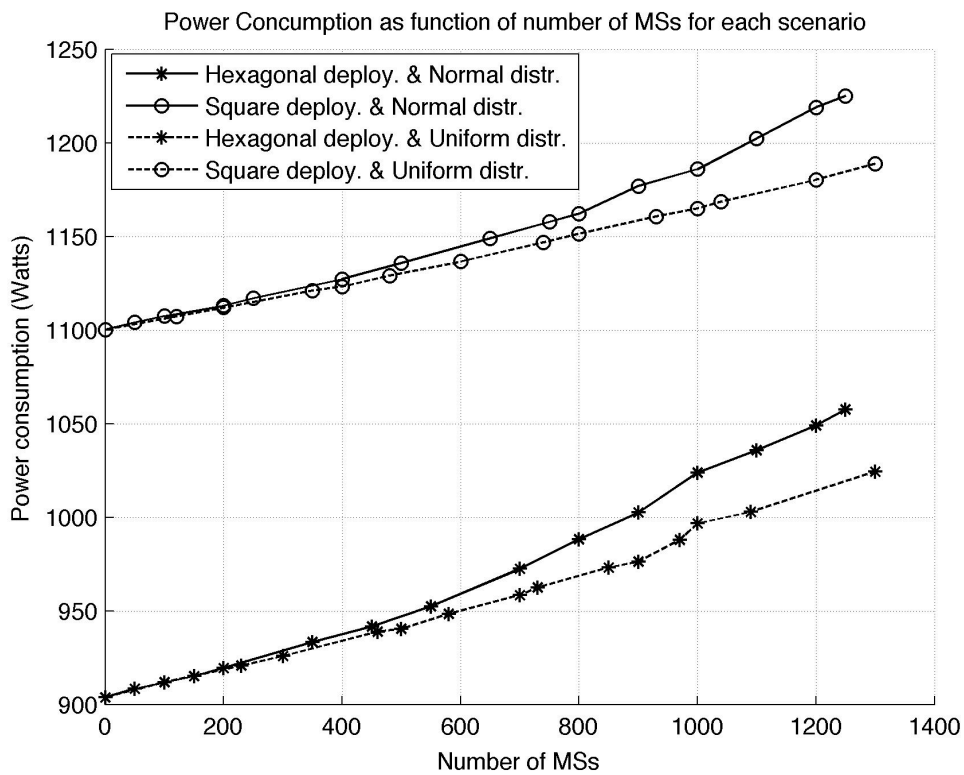


Σχ. 6.10. Κατανομή κινητών χρηστών με χωρική διακύμανση σε τοπολογίες δικτύων με Micro BSs: την εξαγωνική και τετραγωνική διάταξη.

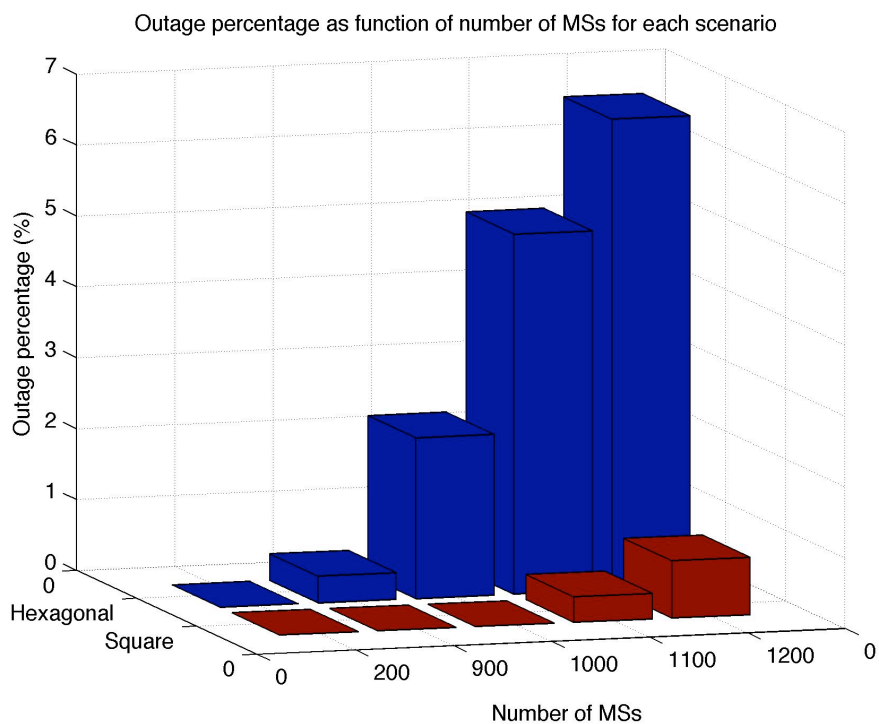
Στο Σχ. 6.11 παρουσιάζεται το γράφημα της κατανάλωσης ενέργειας των ομοιογενών τοπολογιών τύπου Micro BS σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών που εισάγουμε στο δίκτυο. Ο χαρακτηρισμός των καμπύλων της κατανάλωσης ενέργειας των δικτύων - για την ανομοιομορφη κατανομή των χρηστών - και σε αυτή την περίπτωση είναι σχεδόν γραμμικός σε σχέση με το κάθε σύνολο χρηστών που εισάγουμε στο δίκτυο. Παρόλα αυτά παρατηρούμε και εδώ ένα σημείο (το σημείο θεωρείται ένα σύνολο χρηστών) πάνω στη καμπύλη το οποίο δείχνει ότι από αυτό το σύνολο χρηστών και έπειτα ο ρυθμός που αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας είναι μειωμένη σε σχέση με το ρυθμό αύξησης της καμπύλης πριν από αυτό το σημείο. Αυτό συνδέεται με την εισαγωγή της ανομοιομορφης χωρικής κατανομής των χρηστών στο δίκτυο. Αφού αυτοί οι σταθμοί βάσης που εξυπηρετούν τις περιοχές με υψηλό φορτίο θα φτάσουν στην μέγιστη χωρητικότητά τους πιο γρήγορα από αυτούς που εξυπηρετούν περιοχές με χαμηλότερο φορτίο κίνησης, επομένως η κατανάλωση ενέργειας των δεύτερων BSs αυξάνεται με σταθερό ρυθμό ενώ των πρώτων με διαφορετικό, πιο γρήγορο ρυθμό. Από την άλλη μεριά η καμπύλη της κατανάλωσης ενέργειας των δικτύων για την ομοιόμορφη κατανομή των χρηστών είναι γραμμική, αφού η ισχύς εκπομπής των σταθμών βάσης αυξάνεται σταθερά για όλους τους σταθμούς βάσης, δηλαδή, ομοιόμορφα.

Είναι προφανές ότι η ενέργεια που καταναλώνει το δίκτυο με την τετραγωνική διάταξη κυψελών είναι αρκετά μεγαλύτερη, αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι η τοπολογία αυτών των κυψελών είναι πιο πυκνή - από την εξαγωνική διάταξη - άρα απαιτούνται περισσότεροι σταθμοί βάσης για την κάλυψη της περιοχής. Όσο πυκνότερο είναι διατεταγμένο ένα δίκτυο τόσο μεγαλύτερη θα είναι η κατανάλωση ενέργειάς του σε σχέση με ένα άλλο (αραιότερο) που καλύπτει την ίδια περιοχή· το θετικό ενός πυκνού δικτύου όμως είναι η αυξημένη χωρητικότητα που παρουσιάζει. Το Σχ. 6.12 δείχνει αυτή τη διαφορά συγκρίνοντας τη διακοπή λειτουργίας των χρηστών ανάλογα με το σύνολο χρηστών που εισάγεται στο δίκτυο. Όπως φαίνεται, η τετραγωνική τοπολογία χωράει μέχρι και περίπου 1200 χρήστες την ίδια στιγμή, ενώ η εξαγωνική περιορίζεται στους 900. Αναφέρουμε ότι

για την ομοιόμορφη κατανομή δεν παρουσιάστηκε διακοπή λειτουργίας των χρηστών για σε αυτά τα μεγέθη των συνόλων των χρηστών.



Σχ. 6.11. Κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με το πλήθος των κινητών χρηστών για την κάθε διάταξη δικτύου.

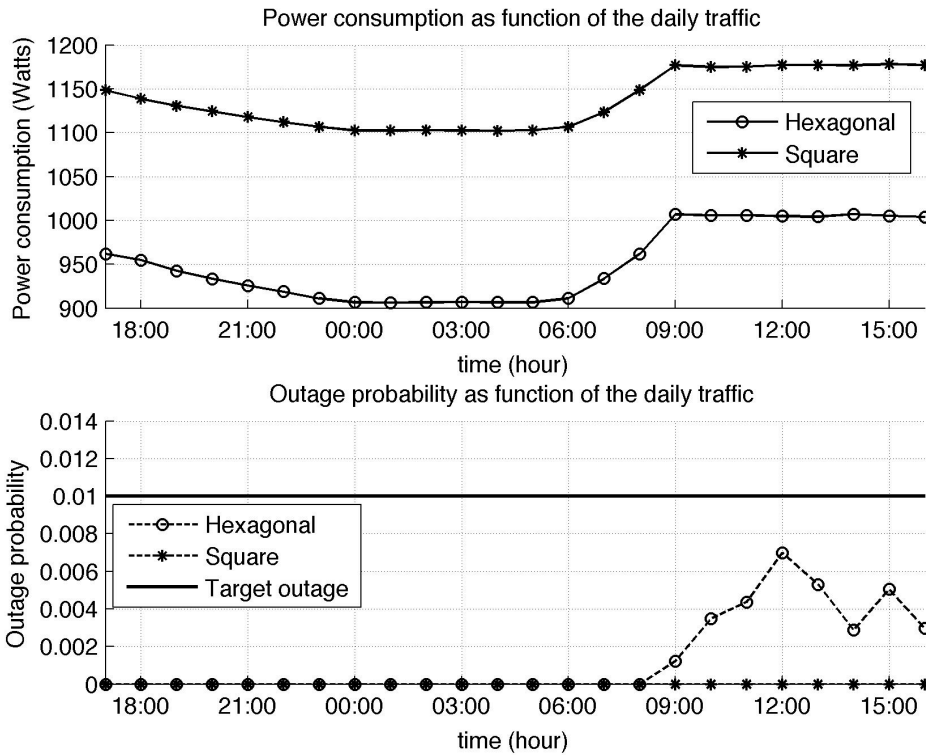


Σχ. 6.12. Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας κινητών χρηστών για τις διάφορες διατάξεις των Micro BS ανάλογα με το πλήθος των κινητών χρηστών στη κάθε διάταξη

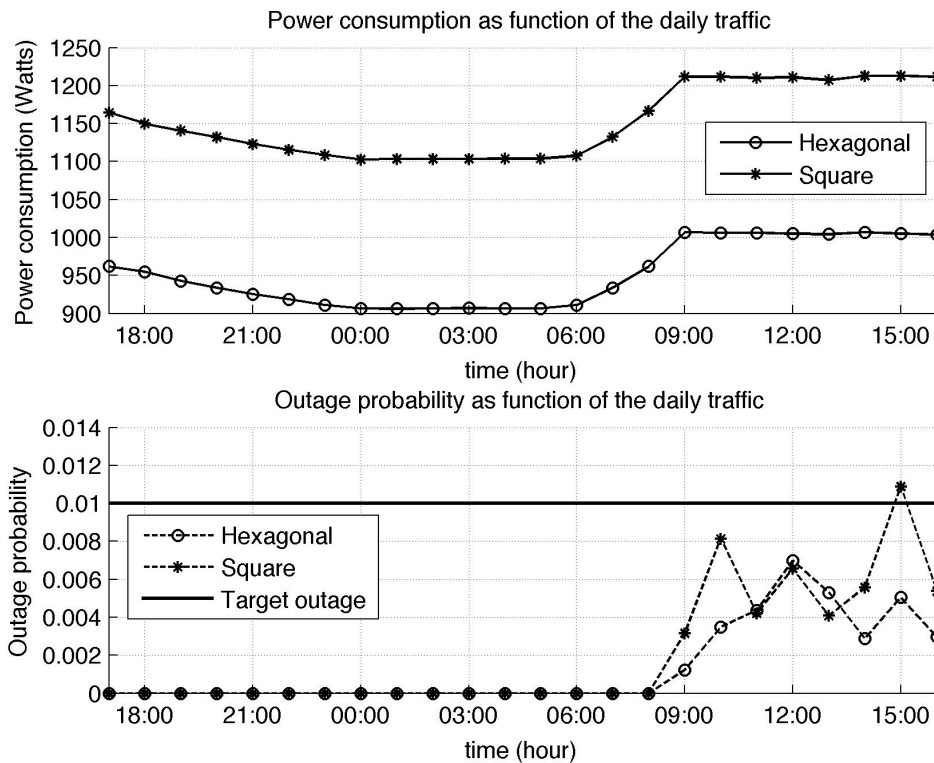
6.3.2.2. Κατανομή κινητών χρηστών με χωρική και χρονική διακύμανση

Σε αυτό το σημείο εξετάζουμε την κατανάλωση ενέργειας των δικτύων και την επίδοσή τους όσον αφορά την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών πάνω από το πρότυπο ημερήσιας κίνησης όπως αυτό περιγράφηκε προηγουμένως στο Σχ. 6.6. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα Σχ. 6.13 και 6.14. Στο 6.13 ο ρυθμός άφιξης των χρηστών είναι ίδιος και στα δύο δίκτυα· ο ρυθμός άφιξης έχει τεθεί στους 15 MSs/second, δηλαδή, στο σύστημα θα υπάρχουν 900 MSs κάθε χρονική στιγμή. Ο ρυθμός άφιξης επιλέχθηκε έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η χωρητικότητα της εξαγωνικής διάταξης ενώ την ίδια στιγμή η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών δεν ξεπερνάει το κατώφλι (1%). Παράλληλα φαίνεται ότι η επίδοση του δικτύου με τις τετραγωνικές κυψέλες είναι και αυτή κάτω από το κατώφλι και συγκεκριμένα είναι 0 για κάθε ώρα της ημέρας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η εν λόγω διάταξη παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα λόγω της πυκνότητας των σταθμών βάσης σε σχέση με την εξαγωνική. Από την άλλη μεριά το Σχ. 6.14 δείχνει την κατανάλωση ενέργειας των δικτύων και την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας όταν ο ρυθμός άφιξης είναι διαφορετικός για τα δυο δίκτυα. Για την εξαγωνική διάταξη ισχύει ότι αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο ρυθμός άφιξης της τετραγωνικής διάταξης σε αυτήν την περίπτωση τέθηκε στους 19 MSs/second, που σημαίνει ότι 1140 MSs μπορούν να βρίσκονται στο δίκτυο κάθε στιγμή. Με αυτόν το ρυθμός άφιξης μεγιστοποιούμε την χωρητικότητα του δικτύου με την τετραγωνική τοπολογία ενώ κρατάμε την επίδοσή του κάτω από το 1%.

Η κατανάλωση ενέργειας ενός δικτύου εξαρτάται σημαντικά από το ρυθμό άφιξης των χρηστών, δηλαδή από το συνολικό αριθμό των χρηστών στο δίκτυο κάθε χρονική στιγμή. Αυτό φαίνεται από την εξής παρατήρηση: καθώς το δίκτυο με τις τετραγωνικές κυψέλες διατρέχει τις ώρες αιχμής παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός άφιξης τόσο μεγαλύτερη θα είναι η κατανάλωση ενέργειας, δηλαδή, όταν ο ρυθμός άφιξης είναι 15 MSs/second το δίκτυο καταναλώνει ενέργεια τις τάξεως 1175 *Watts* περίπου, ενώ όταν ο ρυθμός άφιξης είναι 19 MSs/second το δίκτυο καταναλώνει ενέργεια τις τάξεως 1210 *Watts* περίπου, ενώ από την άλλη μεριά, στις ώρες χαμηλού φορτίου κίνησης ακόμα και αν ο ρυθμός άφιξης είναι μεγαλύτερος η κατανάλωση ενέργειας είναι η σχεδόν η ίδια, με τιμή 1100 *Watts* περίπου.



Σχ. 6.13. Κατανάλωση ενέργειας των ομοιογενών δικτύων Micro BSs πάνω από το πρότυπο ημερήσιας κίνησης μαζί με την διακοπή λειτουργίας των χρηστών για ίδιο ρυθμό άφιξης και στα δυο δίκτυα.



Σχ. 6.14. Κατανάλωση ενέργειας των δικτύων με Micro BS τοπολογίες πάνω από το πρότυπο ημερήσιας κίνησης μαζί με την διακοπή λειτουργίας των χρηστών για ίδιο ρυθμό άφιξης και στα δυο δίκτυα.

6.4. Σύνοψη αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο ελέγξαμε διάφορα ζητήματα για την κατανάλωση ενέργειας σε διάφορα κινητά δίκτυα πρόσβασης τα οποία άλλοτε έχουν να κάνουν με την ενεργειακή αποδοτικότητα των δικτύων ανάλογα με την τοπολογία τους και άλλοτε αναφέρονται στην επακριβή κατανάλωση ενέργειας του κάθε δικτύου που προέκυψε από τις προσομοιώσεις μαζί με τις πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών.

Αρχικά, στις υβριδικές τοπολογίες παρατηρήσαμε πως αλλάζει η ενεργειακή αποδοτικότητα ανάλογα με την τοπολογία που χρησιμοποιούμε. Αυτό έδειξε ότι όσο περισσότερους Micro BSs έχουμε τοποθετημένους στο δίκτυο τόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η ακτίνα κάλυψης των Macro BSs, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόστασης μεταξύ τους. Ως αντίκτυπο όμως έχουμε μια μικρή αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Στη συνέχεια έγινε σαφές η συμπεριφορά της κατανάλωσης ενέργειας ανάλογα με το σύνολο των χρηστών που υπάρχουν στο δίκτυο· η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει γραμμικά χαρακτηριστικά και αλλάζει τον ρυθμό αύξησής της όταν σε ένα δίκτυο παρουσιαστούν σταθμοί βάσης με μέγιστη χωρητικότητα. Παράλληλα με αυτά τα αποτελέσματα εξάγεται και το ποσοστό διακοπής λειτουργίας των χρηστών της κάθε τοπολογίας, μέτρο το οποίο μας δείχνει πότε μεγιστοποιείται η χωρητικότητα. Ακόμη ελέγχουμε την κατανάλωση ενέργειας πάνω από ένα πρότυπο ημερήσιας κίνησης θεωρώντας ότι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών, κατά την περίοδο των ωρών αιχμής, διατηρείται κάτω από ένα επιτρεπτό όριο (1%).

Έπειτα παρατηρήθηκε η ενεργειακή αποδοτικότητα σε ομοιογενής τοπολογίες Micro BSs για δυο διαφορετικές διατάξεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εξαγωνικές κυψέλες είναι πιο αποδοτικές ενεργειακά σε σχέση με τις τετραγωνικές, αυτό συμβαίνει γιατί οι πρώτες καλύπτουν μεγαλύτερο εμβαδόν, ενώ οι δεύτερες είναι τοποθετημένες πιο κοντά η μία στην άλλη. Στη συνέχεια δείχθηκε ότι η χωρητικότητα του δικτύου με τις τετραγωνικές κυψέλες είναι μεγαλύτερη από αυτήν της τοπολογίας των εξαγωνικών κυψελών, αλλά την ίδια στιγμή το αντίθετο ισχύει για την κατανάλωση ενέργειας των τοπολογιών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η τοπολογία των τετραγωνικών κυψελών είναι πυκνότερη από αυτήν των εξαγωνικών, επομένως, χρειάζεται περισσότερους σταθμούς βάσης ώστε να εξυπηρετήσει την ίδια περιοχή που εξυπηρετούν και οι εξαγωνικές - έτσι προκύπτει η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Τέλος, υπολογίστηκε η κατανάλωση ενέργειας πάνω από ένα πρότυπο ημερήσιας κίνησης με γνώμονα ότι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα ανώτατο κατώφλι.

Κεφάλαιο 7

Εξοικονόμηση Ενέργειας σε Κινητά Δίκτυα Πρόσβασης

7.1. Διεργασία διαχείρισης των σταθμών βάσης για εξοικονόμησης ενέργειας

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν αποτελέσματα από την κατανάλωση ενέργειας σε διάφορα δίκτυα πρόσβασης. Δείχθηκε η συμπεριφορά της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με την τοπολογία και την χωρητικότητα του δικτύου - κάνοντας αναφορά στην χωρητικότητα ενός δικτύου μπορούμε να ισχυριστούμε ότι ένα δίκτυο καταναλώνει περίσσια ενέργεια κατά τις περιόδους που το φορτίο κίνησης είναι χαμηλό, δηλαδή εκτός των ορίων της κίνησης αιχμής, αυτή η κατανάλωση ενέργειας είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθεί με την διαχείριση των σταθμών βάσης ως προς την τοπολογία τους. Με άλλα λόγια είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε μερικούς από τους σταθμούς βάσης σε ένα δίκτυο με σκοπό την συνολική κάλυψη του εν λόγω δικτύου όταν η χωρητικότητά του δεν αντιπροσωπεύει την κίνηση στις ώρες αιχμής. Αυτό θα σήμαινε ότι στο δίκτυο θα λειτουργούν μερικοί σταθμοί βάσης ενώ οι υπόλοιποι δεν θα χρησιμοποιούνται για ένα χρονικό διάστημα μερικών ωρών, συνήθως νυχτερινές ώρες, όπου η κίνηση είναι αρκετά χαμηλή - είναι δυνατόν όμως ένα τέτοιο σχήμα να λειτουργήσει και σε κάποιες επιπλέον ώρες πέραν των νυχτερινών, αυτό εξαρτάται από την χωρητικότητα του δικτύου. Μια τέτοια διαδικασία μπορεί να χαρακτηριστεί ως στατική απενεργοποίηση σταθμών βάσης, και έχει ως βασικό στοιχείο την τοπολογία του δικτύου.

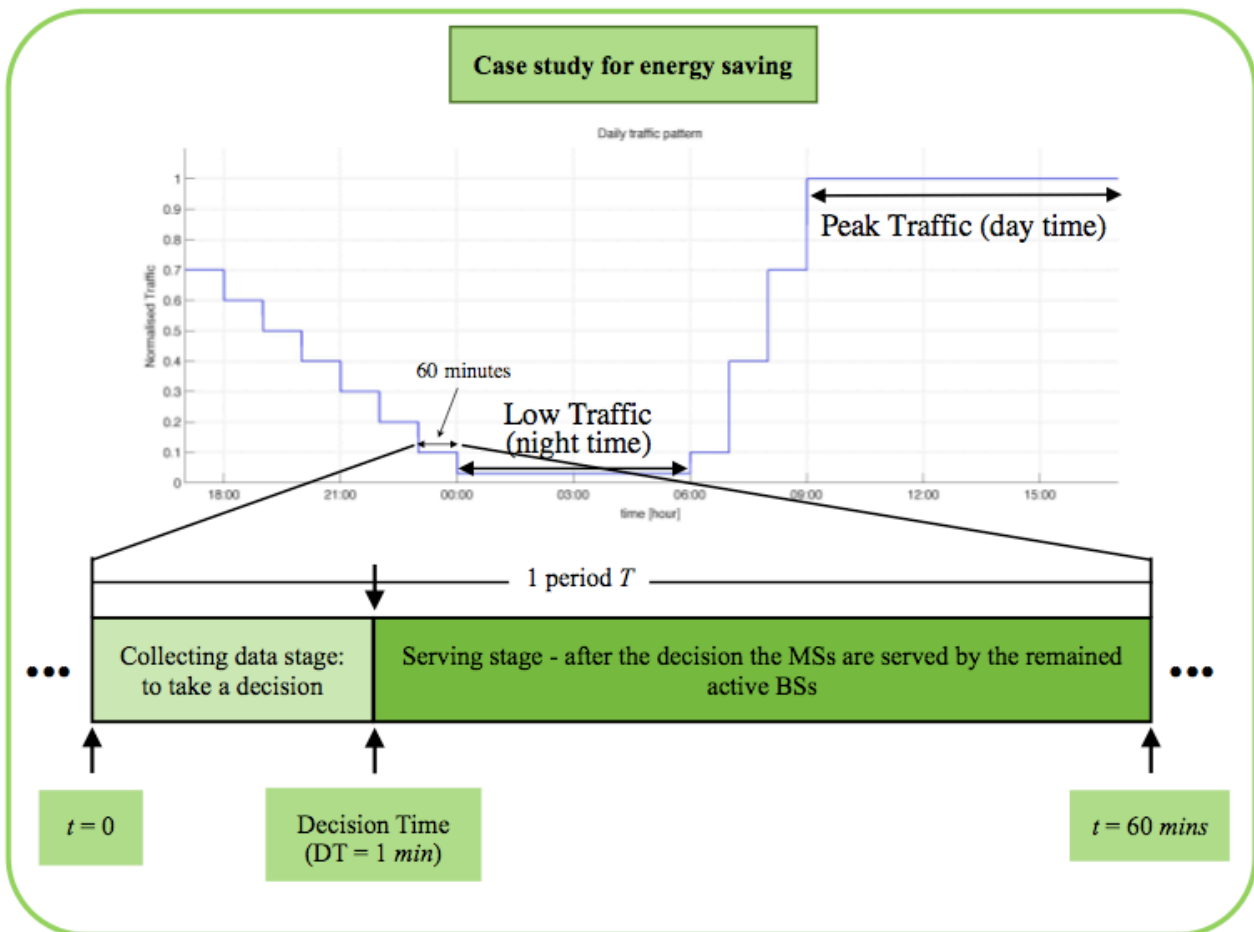
Θέλοντας να δώσουμε δυναμικό χαρακτήρα στους σταθμούς βάσης του δικτύου με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας, δηλαδή, κάποιιοι σταθμοί βάσης να μην χρησιμοποιούνται όταν οι απαιτήσεις του δικτύου για την περιοχή που καλύπτουν είναι ελάχιστες - όπως για παράδειγμα χαμηλή κίνηση χρηστών σε διάφορα σημεία του δικτύου - ορίζουμε την κατάσταση ύπνου (*sleep mode*) των σταθμών βάσης. Θεωρούμε ότι όταν ένας σταθμός βάσης βρίσκεται σε *sleep mode* απενεργοποιούνται διάφοροι εξοπλισμοί στα περιεχόμενά του έτσι ώστε να καταναλώνει μηδενική ενέργεια. Οι σταθμοί βάσης που λειτουργούν σε κατάσταση ύπνου μπορούν να αισθάνονται το φορτίο κίνησης της περιοχής τους εκπέμποντας τα κοινά κανάλια ελέγχου (CCCH) όταν βρίσκονται στο χρονικό παράθυρο στο οποίο συλλέγονται τα δεδομένα για το φορτίο κίνησης όλων των σταθμών βάσης, δηλαδή πριν παρθεί η απόφαση για το ερώτημα ποιοι από τους σταθμούς βάσης θα πρέπει να λειτουργήσουν καθ' όλη την διάρκεια της ώρας, έτσι ώστε να εξυπηρετήσουν το επίπεδο κίνησης στην περιοχή. Το χρονικό στάδιο συλλογής δεδομένων (Collecting data stage) διακρίνεται από το Σχ. 7.1.

Σε κάθε ώρα/περίοδο T η κίνηση θεωρείται σταθερή. Η συλλογή δεδομένων για την απόφαση για απενεργοποίηση των σταθμών διαρκεί για αρκετά μικρό χρονικό διάστημα, $t = 1 \text{ min}$, από την χρονική στιγμή που ξεκινάει αυτή η σταθερή χρονική διάρκεια της μιας ώρας (60 mins), όπως φαίνεται στο Σχ.7.1. Το συγκεκριμένο γεγονός το θέτουμε με αυτό τον τρόπο έτσι ώστε η μέση κατανάλωση ενέργειας να εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το στάδιο εξυπηρέτησης (Serving stage), δηλαδή, το στάδιο στο οποίο έχουν ήδη επιλεγεί οι εν λειτουργία σταθμοί βάσης για να καλύψουν και εξυπηρετήσουν την περιοχή και τους χρήστες, αντίστοιχα, με άλλα λόγια, από τη χρονική στιγμή της απόφασης και μετά, το δίκτυο εξυπηρετεί τους χρήστες με τους σταθμούς βάσης που έχουν παραμείνει ή μεταβεί σε κατάσταση ενεργής λειτουργίας. Λόγω του ότι η κίνηση είναι σταθερή για ένα χρονικό διάστημα μιας ώρας, κάθε φορά που αρχίζει μια νέα περίοδος, το φορτίο κίνησης πρέπει να σταθεροποιηθεί στο τρέχον επίπεδο κίνησης, επομένως το σύστημα λειτουργεί για μερικά λεπτά μέχρι να γίνει η σταθεροποίηση (ο χρόνος αυτός δεν περιλαμβάνεται στα αποτελέσματα).

Η διεργασία για την διαχείριση των σταθμών βάσης για την εξοικονόμηση ενέργειας λαμβάνει υπόψη το φορτίο κίνησης των σταθμών βάσης του δικτύου. Κατά την διάρκεια αυτής της μικρής

χρονικής περιόδου συλλέγεται το φορτίο κίνησης των σταθμών βάσης ανά δευτερόλεπτο και την χρονική στιγμή της απόφασης υπολογίζεται ο μέσος όρος του φορτίου κίνησης του κάθε σταθμού βάσης, στη συνέχεια, την ίδια χρονική στιγμή αυτά τα φορτία συγκρίνονται με βάση ένα δοσμένο κατώφλι το οποίο καθορίζει εάν ήδη ενεργοποιημένοι σταθμοί βάσης πρέπει να μεταβούν σε κατάσταση ύπνου ή να παραμείνουν ενεργοποιημένοι, και εάν σταθμοί βάσης που βρίσκονται ήδη σε *sleep mode* απαιτείται να ενεργοποιηθούν ή να παραμείνουν στην κατάσταση ύπνου, όπου το κατώφλι ανήκει στο $[0, TCH]$, όπου TCH είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το φορτίο κίνησης. Ένας σταθμός βάσης μεταβαίνει σε κατάσταση ύπνου όταν η μέση τιμή του φορτίου κίνησης που έχει συλλέξει είναι μικρότερη ή ίση από το δοσμένο κατώφλι, ενώ ενεργοποιείται όταν είναι μεγαλύτερη από το κατώφλι. Αναφέρουμε ότι οι σταθμοί βάσης κατά την διάρκεια χαμηλής κίνησης (νυχτερινές ώρες) θα αισθάνονται αρκετά μικρό μέσο φορτίο κίνησης, και συγκεκριμένα αρκετοί από αυτούς ίσως να έχουν μηδενικό φορτίο κίνησης, αυτό σημαίνει ότι ένα κατώφλι αρκετά μικρής τιμής είναι ιδανικό για αυτήν την περίπτωση, για παράδειγμα, μπορεί να επιλεγεί η τιμή 0. Από την άλλη μεριά οι σταθμοί βάσης σε μεγαλύτερα επίπεδα κίνησης θα αισθάνονται μεγαλύτερο φορτίο κίνησης, συνεπώς, χρησιμοποιώντας την τιμή του κατωφλίου 0 δεν θα είναι αποδοτικό, αφού ελάχιστοι έως κανένας σταθμός βάσης δεν θα έχει μηδενικό φορτίο κίνησης, συνεπώς, σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να επιλεγεί μεγαλύτερο κατώφλι.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου διερευνώνται διάφοροι μέθοδοι όπως, η απλή δυναμική διαχείριση των σταθμών βάσης, η απλή στατική διαχείριση των σταθμών βάσης και τέλος μια μίξη των δυο παραπάνω που την ονομάζουμε υβριδική μέθοδο, για εξοικονόμηση ενέργειας. Οι τρεις αυτές μέθοδοι εφαρμόζονται σε ομοιογενή δίκτυο τύπου Micro BSs, ενώ στα υβριδικά δίκτυα που αποτελούνται από Macro και Micro BSs εφαρμόζεται μόνο η απλή δυναμική μέθοδος διαχείρισης των σταθμών βάσης για τους Micro BSs. Παράλληλα, ελέγχεται η επίδοση των δικτύων αυτών όσον αφορά την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών.



Σχ. 7.1. Μελέτη περίπτωσης και απεικόνιση της διεργασίας εξοικονόμησης ενέργειας. Αφορά την λειτουργία των σταθμών βάσης με δυναμική διαχείριση.

7.2. Δυναμική μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας

7.2.1. Υβριδική τοπολογία με Macro και Micro BSs

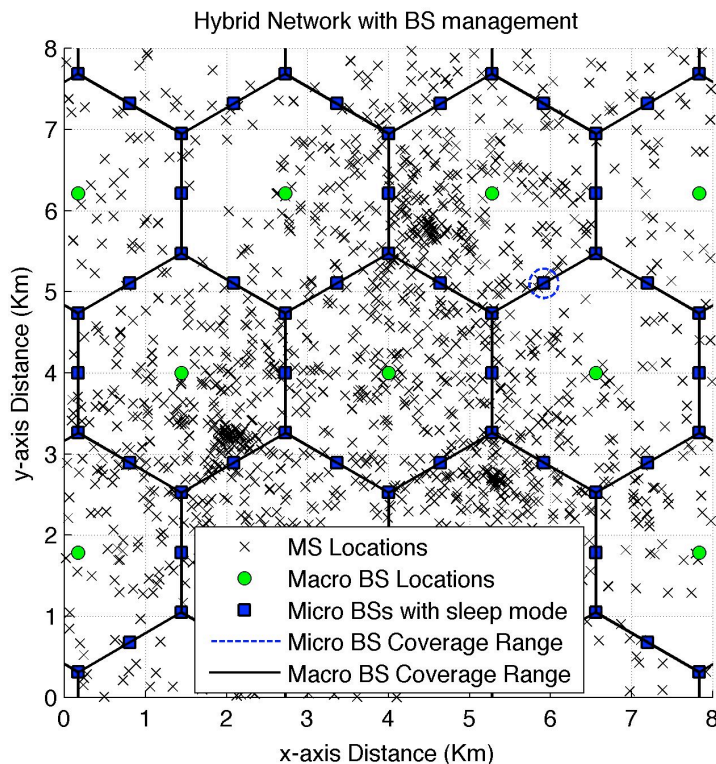
7.2.1.1. Λειτουργία των σταθμών βάσης

Για να δείξουμε την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα υβριδικό δίκτυο που αποτελείται από Macro BSs και Micro BSs χρησιμοποιούμε την τοπολογία με 5 Micro BSs ανά ένα Macro BS, και εισάγουμε ένα το δυναμικό σχήμα διαχείρισης σε μερικούς σταθμούς βάσης. Οι Micro BSs τοποθετούνται στα σύνορα της μέγιστης κάλυψης των Macro BSs και έχουν το ρόλο της αύξησης της χωρητικότητας του δικτύου. Στο Σχ. 7.2 φαίνεται η τοπολογία του δικτύου ενώ μπορούμε να διακρίνουμε την κάλυψη που παρέχουν οι Micro BSs. Σημειώνουμε ότι η κατανομή των χρηστών στο χώρο περιγράφεται από την ανομοιόμορφη χωρική κατανομή που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ για την κατανομή ως προς τον χρόνο χρησιμοποιούμε το πρότυπο κίνησης που έχει ήδη παρουσιαστεί.

Λόγω της μεγάλης κάλυψης που παρέχουν οι Macro BSs είναι αδύνατο να τους θέσουμε σε κατάσταση ύπνου, αφού ένα τέτοιο γεγονός θα προκαλούσε αυξημένη διακοπή λειτουργίας των χρηστών. Γι' αυτό το λόγο η διαχείριση των σταθμών βάσης αναφέρεται μόνο στους Micro BSs. Για να εξοικονομηθεί ενέργεια σε ένα τέτοιο δίκτυο πρέπει να μεταβούν σε κατάσταση ύπνου όσο περισσότεροι Micro BSs είναι δυνατόν. Σε καταστάσεις χαμηλής κίνησης οι Micro BSs είναι πολύ

πιθανόν να μην χρειάζονται για την εξυπηρέτηση των χρηστών, αφού όλοι οι χρήστες μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες τους μόνο με την βοήθεια των Macro BSs, επομένως είναι δυνατόν να θέσουμε κάποιους από αυτούς σε κατάσταση ύπνου με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στο σύνολο του δικτύου.

Εισάγουμε δυο τρόπους για την διαχείριση των Micro BSs. Στην πρώτη περίπτωση (1st case) η απόφαση για το ποιοι σταθμοί βάσης θα λειτουργήσουν σε κατάσταση ύπνου ή σε ενεργή κατάσταση λαμβάνεται με βάση το δοσμένο κατώφλι, που σημαίνει ότι οι αποφάσεις αυτές προκύπτουν εξολοκλήρου από το φορτίο κίνησης που αισθάνονται στην περιοχή τους οι Micro BSs - μετά από διάφορες δοκιμές παρατηρήθηκε ότι μια καλή επιλογή για το κατώφλι είναι η τιμή 0.006. Στην δεύτερη περίπτωση (2nd case) που μελετήσαμε - στην απόφαση για την διαχείριση των Micro BSs - συμπεριλαμβάνεται εκτός από το φορτίο κίνησης που αισθάνονται οι Micro BSs και το φορτίο κίνησης που αισθάνονται οι Macro BSs. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να αποτρέψουμε μερικούς Micro BSs από το να λειτουργούν σε ενεργή κατάσταση όταν το φορτίο των Macro BSs δεν έχει φτάσει σε ένα μέγιστο όριο. Με άλλα λόγια, δεν χρησιμοποιούμε τους Micro BSs όταν στους Macro BSs υπάρχουν ακόμα ράδιο-πόροι που εν δυνάμει μπορούν να χρησιμοποιηθούν από νέους χρήστες. Μόλις ένας Macro BS αισθανθεί φορτίο κίνησης μεγαλύτερο από το όριο που ορίζουμε, θεωρούμε ότι οι Micro BSs μπορούν να λειτουργήσουν με τον δυναμικό τους χαρακτήρα, δηλαδή, με τον τρόπο που λειτουργούν στην πρώτη περίπτωση. Το όριο που θέτουμε είναι $0.85 * TCH$, όπου $TCH = 0.82$, η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το φορτίο κίνησης, όπως αυτή περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.



Σχ. 7.2. Δίκτυο υβριδικής τοπολογίας με Micro BSs που μπορούν να λειτουργήσουν σε κατάσταση ύπνου.

7.2.1.2. Αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας

Το Σχ. 7.3 παρουσιάζει την ενέργεια που καταναλώνει το δίκτυο όταν χρησιμοποιούνται οι δυο περιπτώσεις για την διαχείριση των Micro BSs και την ενέργεια που καταναλώνεται όταν το δίκτυο

λειτουργεί συμβατικά, ενώ στη συνέχεια δίνεται η επίδοση του δικτύου η οποία αφορά την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι συμφέρουσα αφού κατά την διάρκεια εκτός των ωρών αιχμής πολλοί Micro BSs λειτουργούν χωρίς να εξυπηρετούν σημαντικό φορτίο. Παρόλα αυτά όμως τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας είναι αρκετά χαμηλά.

Συγκεκριμένα για την 1η περίπτωση διαχείρισης των Micro BSs ισχύει ότι - κατά την διάρκεια εκτός των ωρών κίνησης αιχμής - κάποιιοι από αυτούς θα παραμένουν σε ενεργή κατάσταση διότι αισθάνονται κάποιο μέγεθος φορτίου στην περιοχή τους, επομένως όπως περιμένουμε αυτό σημαίνει ότι η κατανάλωση ενέργειας δεν έχει ελαχιστοποιηθεί πλήρως. Για την 2η περίπτωση διαχείρισης των Micro BSs ισχύει ότι αυτοί θα λειτουργήσουν με τον τρόπο που λειτουργούν στη 1η περίπτωση αν το μέσο φορτίο κίνησης ενός από τους Macro BSs ξεπεράσει το όριο που έχει οριστεί, $0.85 * TCH$. Συνεπώς, σε αυτή την περίπτωση η κατανάλωση ενέργειας θα είναι πλήρως ελαχιστοποιημένη, αφού οι Micro BSs που λειτουργούσαν κατά την διάρκεια εκτός των ωρών αιχμής θα είναι πλήρως ανενεργοί.

Όπως βλέπουμε από το Σχ. 7.3, κατά τις ώρες αιχμής το δίκτυο μπορεί - και με τις δυο περιπτώσεις διαχείρισης των σταθμών βάσης - να μειώσει την κατανάλωση ενέργειάς του σε σχέση με τη συμβατική λειτουργία του. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί σε ένα τέτοιο δίκτυο οι χρήστες είναι αραιά κατανομημένοι, επομένως οι Micro BSs που δεν βρίσκονται κοντά στα hot spots δεν θα εξυπηρετούν σημαντικό φορτίο κίνησης, και γι' αυτό το λόγο μπορούν να λειτουργήσουν σε κατάσταση ύπνου, ώστε να μην καταναλώνουν ενέργεια. Παρατηρώντας την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών γι' αυτές τις δυο περιπτώσεις μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι μια τέτοια λειτουργία των σταθμών βάσης είναι αποδοτική, αφού τα επίπεδα της πιθανότητας διατηρούνται κάτω από το επιτρεπτό όριο που έχουμε ορίσει.

Στην 1η περίπτωση διαχείρισης των Micro BSs το δίκτυο μπορεί να εξοικονομήσει ποσοστό ενέργειας, ως προς την συμβατική λειτουργία του, που υπολογίζεται στα 7.25%, ενώ στην άλλη περίπτωση το ποσοστό υπολογίστηκε στα 8.24% ως προς την συμβατική λειτουργία του δικτύου. Εκτός από τη ημερήσια εξοικονόμηση ενέργειας σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών δεν υπερβαίνει το όριο και για τις δυο περιπτώσεις.

Πιν. 7.1. Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, διάφορα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν και ημερήσια κατανάλωση ενέργειας για τις δυο περιπτώσεις της δυναμικής διαχείρισης των σταθμών βάσης σε υβριδική τοπολογία δικτύου με Macro BSs και Micro BSs.

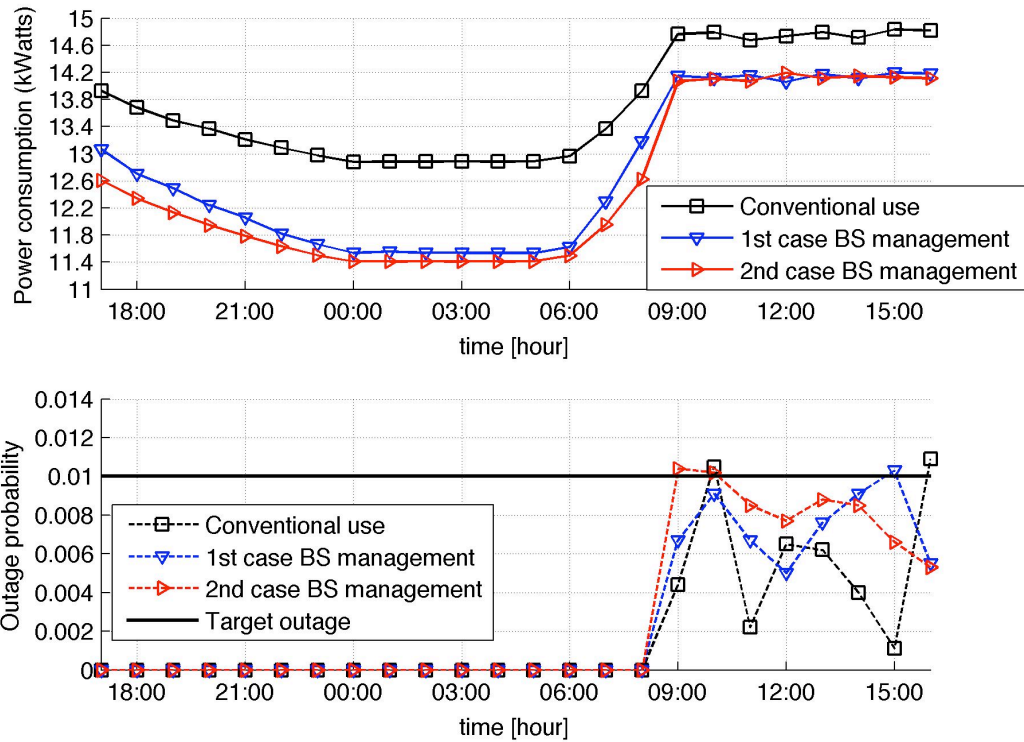
		1st case Dynamic BS management in Hybrid deployment	2nd case Dynamic BS management in Hybrid deployment
Decision Time	<i>min</i>	1	1
Micro BS Threshold	-	0.006	0.006
Comments	-	Decision based on Micro BSs	Decision based on Macro & Micro BSs
Daily Energy Saving	%	7.25	8.49
Energy Saving at Low Traffic	%	10.44	11.41

1st case Dynamic BS management in Hybrid deployment	2nd case Dynamic BS management in Hybrid deployment
--	--

**Daily Energy
Consumption** *kWh*

305.518

301.433



Σχ. 7.3. Κατανάλωση ενέργειας και επίδοση δικτύου όσον αφορά την διακοπή λειτουργίας των χρηστών μετά την εφαρμογή της διεργασίας για εξοικονόμηση ενέργειας.

7.2.2. Ομοιογενής τοπολογία με Micro BSs

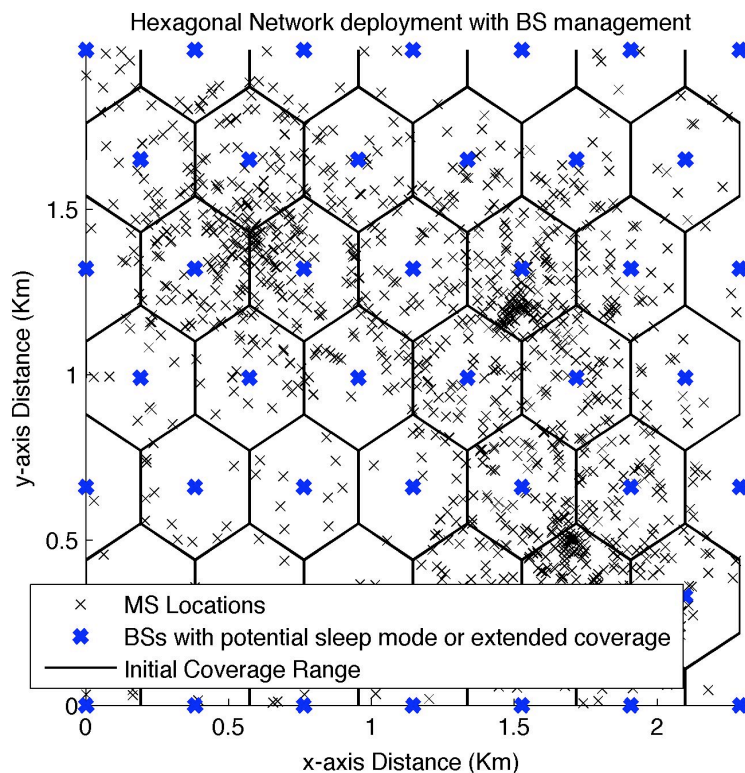
7.2.2.1. Λειτουργία των σταθμών βάσης

Για να παρουσιάσουμε την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα δίκτυο με ομοιογενή τοπολογία που αποτελείται από Micro BSs, χρησιμοποιούμε την εξαγωνική τοπολογία. Θεωρούμε ότι η χωρική κατανομή των χρηστών είναι ανομοιόμορφη όπως φαίνεται στο Σχ. 7.2 και ότι η χρονική κατανομή ακολουθεί το πρότυπο κίνησης που έχει ήδη παρουσιαστεί.

Σε αυτήν την μέθοδο για εξοικονόμηση ενέργειας η διαχείριση των σταθμών βάσης ακολουθεί δυναμικό χαρακτήρα, δηλαδή, όλοι οι σταθμοί βάσης έχουν την δυνατότητα να λειτουργήσουν σε κατάσταση ύπνου όταν αυτό απαιτείται. Θέτοντας όμως κάποιους σταθμούς βάσης σε κατάσταση ύπνου θα δημιουργηθούν περιοχές οι οποίες δεν θα καλύπτονται, επομένως οι χρήστες δεν θα έχουν την δυνατότητα να καλύψουν τις ανάγκες τους. Αυτό μπορεί να αναιρεθεί ορίζοντας για τους σταθμούς βάσης μια ακόμα λειτουργία, την επέκταση της ακτίνας κάλυψης από R σε $2 \cdot R$, έτσι ώστε οι σταθμοί βάσης που παραμένουν σε ενεργή κατάσταση στο δίκτυο να μπορούν να καλύψουν μερικές από τις ακάλυπτες περιοχές. Για να αυξήσουμε όμως την ακτίνα κάλυψης ενός σταθμού βάσης πρέπει αρχικά να αυξήσουμε την ισχύ εκπομπής του, ένα τέτοιο γεγονός θα είχε ως

αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας ενός σταθμού βάσης που παραμένει σε ενεργή κατάσταση, κάτι που μπορεί να ορισθεί ως μειονέκτημα για αυτήν την μέθοδο. Στην συμβατική λειτουργία των σταθμών βάσης αυτοί εκπέμπουν μέγιστη ισχύ 0.3 watts και η ακτίνα κάλυψης είναι 220.2 metres , ενώ μια αύξηση στην αρχικής μέγιστης ισχύ εκπομπής κατά 5.7 watts η ακτίνα κάλυψης μπορεί να διπλασιαστεί. Η μέθοδος αυτή είναι σημαντικό να εφαρμόζεται σε περιόδους χαμηλής κίνησης, διαφορετικά, θα είχαμε σημαντική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, αφού αρκετοί από τους σταθμούς βάσης θα ορισθούν στην κατάσταση για αύξηση της ακτίνας κάλυψης.

Για το λόγο ότι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας εφαρμόζεται συνήθως κατά τις περιόδους χαμηλής κίνησης, είναι απαραίτητο το κατώφλι να ορίζεται από ένα πολύ μικρό αριθμό, αυτό το γεγονός συμβαίνει για το λόγο ότι σε περιόδους χαμηλής κίνησης αρκετοί σταθμοί βάσης που βρίσκονται σε περιοχές εκτός των hot spots αισθάνονται φορτίο κίνησης το οποίο είναι μηδενικό ή σχεδόν μηδενικό. Επομένως ορίζουμε το κατώφλι να είναι ίσο με 0, αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όσοι σταθμοί βάσης αισθάνονται μηδενικό φορτίο κίνησης να μεταβαίνουν σε κατάσταση ύπνου, ενώ οι υπόλοιποι να παραμένουν ενεργοί αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής τους έτσι ώστε να αυξήσουν την κάλυψή τους. Είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε το χρονικό διάστημα ωρών κατά το οποίο αυτή η μέθοδος μπορεί να γίνει εφαρμόσιμη.



Σχ. 7.4. Εξαγωνική τοπολογία δικτύου με Micro BSs που έχουν την δυνατότητα να λειτουργήσουν σε κατάσταση ύπνου αλλά και να αυξήσουν την ακτίνα κάλυψής τους από R σε $2 \cdot R$.

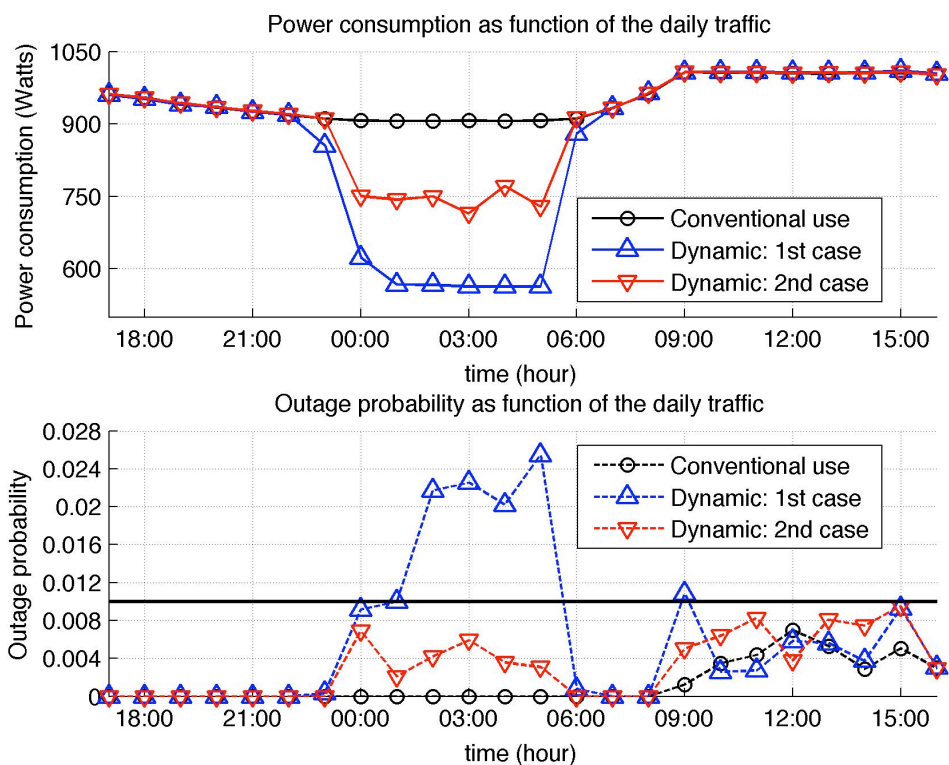
7.2.2.2. Αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας

Τα αποτελέσματα της κατανάλωσης ενέργειας και η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών μετά την εφαρμογή της δυναμικής μεθόδου διαχείρισης των σταθμών βάσης σε μια ομοιογενή τοπολογία με Micro BSs παρουσιάζονται στο Σχ. 7.5.

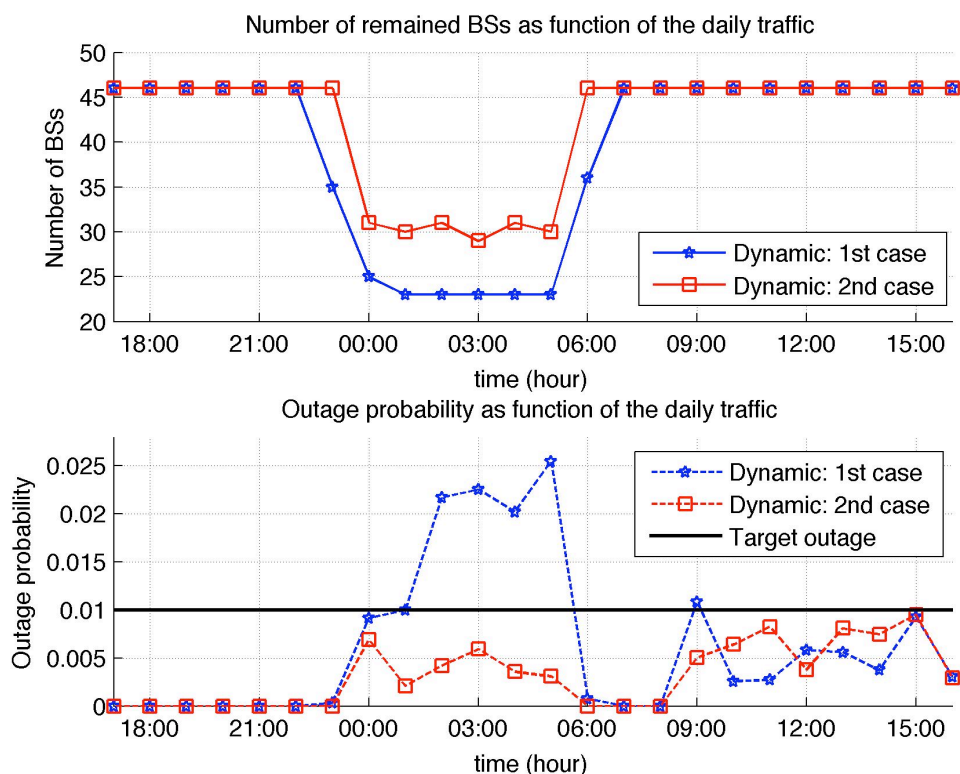
Χρησιμοποιώντας αρχικά την 1η περίπτωση (μπλε γραμμή) δυναμικής διαχείρισης των σταθμών βάσης εκτελέσαμε μερικές δοκιμές και παρατηρήσαμε ότι η μέγιστη χρονική διάρκεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος έτσι ώστε να εξοικονομείται ενέργεια είναι 8 ώρες, σε αυτή την περίπτωση, η απόφαση για αλλαγή κατάστασης των σταθμών βάσης παίρνεται σε 1 *min* από την στιγμή που αρχίζει μια νέα ώρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορεί να εξοικονομηθεί 9.07% ενέργεια σε σχέση με την ενέργεια που καταναλώνεται όταν το δίκτυο λειτουργεί συμβατικά, παρόλα αυτά όμως η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών ξεπερνάει το επιτρεπτό όριο.

Έχοντας υπόψη ότι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών ξεπερνάει το επιθυμητό όριο στην 1η περίπτωση, εκτελούμε μια 2η περίπτωση, αλλάζοντας ένα χαρακτηριστικό της 1ης. Μεταβάλλουμε την χρονική στιγμή της απόφασης στα 3 *min*, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα οι σταθμοί βάσης να έχουν περισσότερα δείγματα στη διάθεσή τους για την συγκέντρωση πληροφοριών για το φορτίο κίνησης, ώστε την στιγμή της απόφασης να υπολογίσουν το μέσο φορτίο κίνησης, γεγονός που θα μειώσει την ποσότητα των σταθμών βάσης που θα μεταβούν σε κατάσταση ύπνου. Επομένως, εκτελώντας μερικές δοκιμές βρίσκουμε τη μέγιστη διάρκεια κατά την οποία η μέθοδος αυτή μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια, και αυτή είναι 6 ώρες. Τελικά, το αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, και συνεπώς η μείωση του ποσοστού εξοικονόμησης ενέργειας, σε σχέση με την 1η περίπτωση, σε 4.25%, αλλά την ίδια στιγμή, παρατηρούμε μείωση της πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών κάτω από το επιτρεπτό όριο.

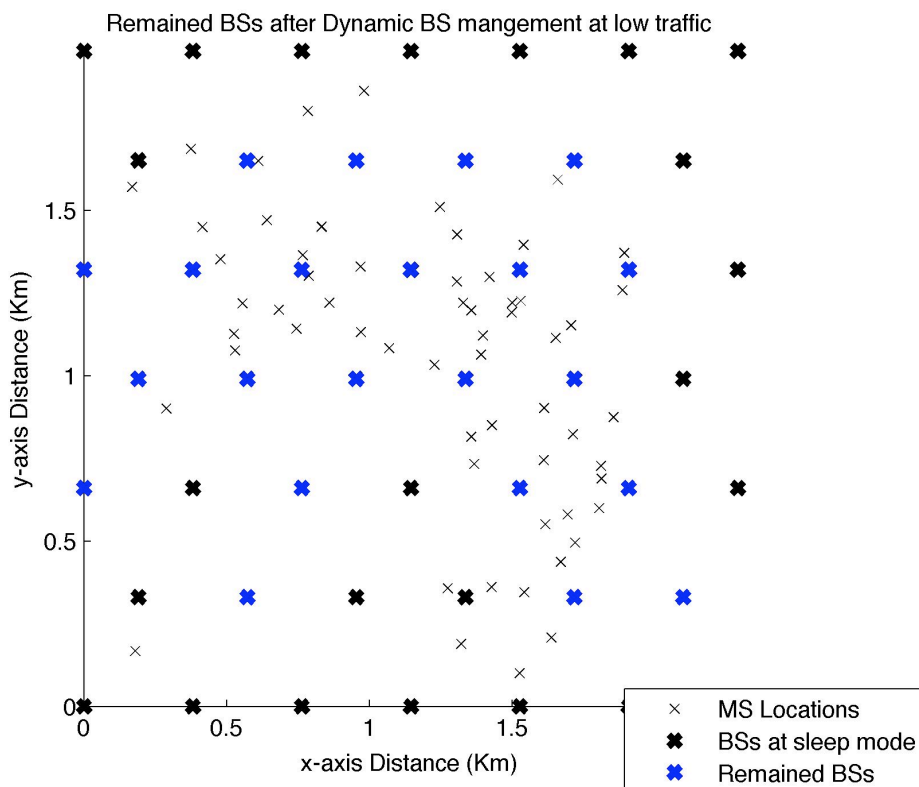
Από το Σχ. 7.7 μπορούμε να διακρίνουμε ποιοι σταθμοί βάσης είναι δυνατόν να παραμείνουν σε ενεργή κατάσταση κατά την διάρκεια μιας οποιαδήποτε ώρας με χαμηλή κίνηση, για παράδειγμα στο διάστημα 00:00 με 01:00. Το στιγμιότυπο του δικτύου προέκυψε με την εφαρμογή της 1ης περίπτωσης για δυναμική διαχείριση των σταθμών βάσης. Οι σταθμοί βάσης με το έντονο μπλε χιαστή παραμένουν σε ενεργή κατάσταση διπλασιάζοντας την ακτίνα κάλυψής τους ενώ αυτοί με το έντονο μαύρο χιαστή μεταβαίνουν σε κατάσταση ύπνου για την χρονική περίοδο μιας ώρας.



Σχ. 7.5. Κατανάλωση ενέργειας και πιθανότητα διακοπής λειτουργίας μετά την εφαρμογή της δυναμικής διαχείρισης των σταθμών βάσης σε ομοιογενή τοπολογία με Micro cells.



Σχ. 7.6. Αριθμός σταθμών βάσης που παραμένουν σε ενεργή κατάσταση και επίδοση του δικτύου μετά την εφαρμογή της δυναμικής μεθόδου για την εξυπηρέτηση των χρηστών.



Σχ. 7.7. Στιγμιότυπο του δικτύου μετά από την εφαρμογή της δυναμικής διαχείρισης των σταθμών βάσης.

Πιν. 7.2. Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, διάφορα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν και ημερήσια κατανάλωση ενέργειας για τις δυο περιπτώσεις της δυναμικής διαχείρισης των σταθμών βάσης ομοιογενούς τοπολογίας Micro BS.

		1st case Dynamic BS management	2nd case Dynamic BS management
Decision Time	<i>min</i>	1	3
Threshold	-	0	0
Daily Energy Saving	%	9.07	4.25
Energy Saving at Low Traffic	%	31.29	17.24
Daily Energy Consumption	<i>kWh</i>	20.767	21.868

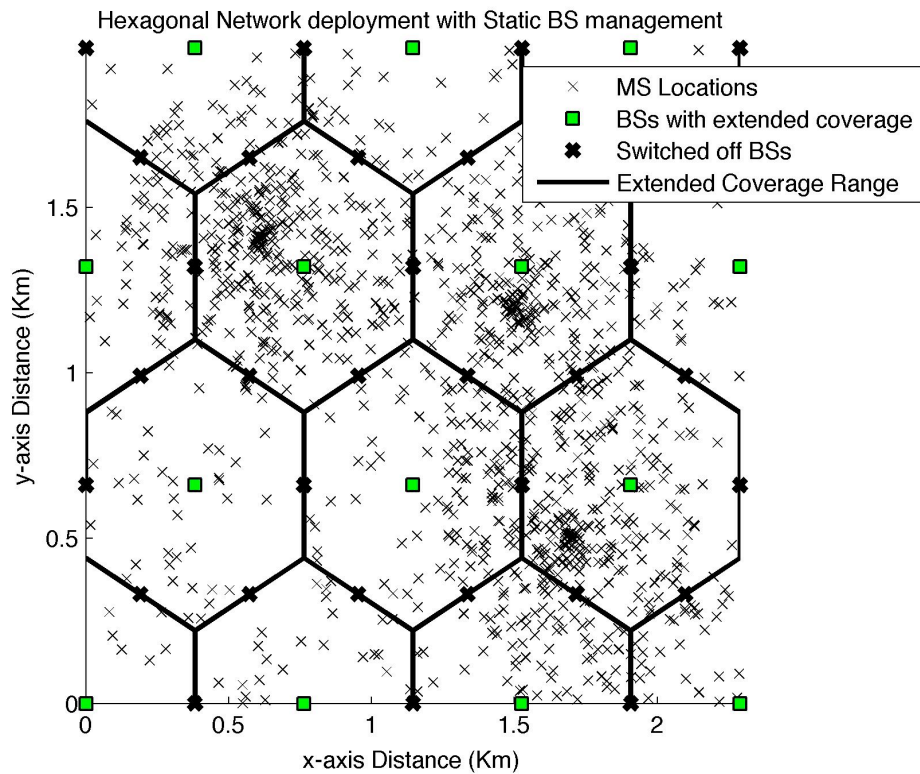
7.3. Στατική διαχείριση σταθμών βάσης ομοιογενούς τοπολογίας με Micro BSs

7.3.1. Το σχήμα απενεργοποίησης των σταθμών βάσης

Μια δεύτερη μέθοδος που εφαρμόζουμε για εξοικονόμηση ενέργειας στην ομοιογενή τοπολογία με Micro BSs είναι η στατική διαχείριση των σταθμών βάσης. Στο Σχ. 7.8 φαίνεται η κάλυψη του δικτύου έτσι όπως θα είναι αφού εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος.

Για να εφαρμόσουμε αυτή την μέθοδο διαχείρισης στους σταθμούς βάσης επιλέχθηκαν ορισμένοι σταθμοί βάσης μέσα στο δίκτυο οι οποίοι έχουν την δυνατότητα με μια αύξηση της ακτίνας κάλυψής τους να παρέχουν κάλυψη σε όλη την περιοχή. Όπως φαίνεται στο Σχ. 7.8 οι σταθμοί βάσης (πράσινο τετράγωνο) είναι επιλεγμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε το δίκτυο να συνεχίσει να χαρακτηρίζεται από εξαγωνική διάταξη κυψελών, η οποία έχει αποδειχθεί πλέον ως η πιο αποδοτική ενεργειακά, από την άλλη μεριά οι υπόλοιποι σταθμοί βάσης (έντονο μαύρο χιαστή) απενεργοποιούνται οριστικά. Οι πρώτοι σταθμοί βάσης που παραμένουν σε ενεργή κατάσταση έχουν την δυνατότητα να επεκτείνουν την ακτίνα κάλυψής τους από R σε $2*R$, γι' αυτό το λόγο προϋπόθεση είναι η αύξηση της ισχύς εκπομπής - στην συμβατική λειτουργία του δικτύου οι σταθμοί βάσης λειτουργούν με μέγιστη ισχύ εκπομπής 0.3 watts και παρέχουν ακτίνα κάλυψης 220.2 metres , έχει υπολογιστεί ότι για τον διπλασιασμό της ακτίνας κάλυψης απαιτείται η αύξηση της ισχύς εκπομπής στα 6 watts , γεγονός που θα προκαλέσει την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας - στους σταθμούς βάσης που παραμένουν σε ενεργή κατάσταση μεμονωμένα - από 17 watts σε 42 watts , για σχεδόν μηδενικό φορτίο κίνησης. Παρόλα αυτά η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου θα είναι μειωμένη αφού θα λειτουργούν μόνο 14 από τους 46 σταθμούς βάσης κατά την διάρκεια των ωρών χαμηλής κίνησης.

Σημαντικό είναι να βρεθούν οι ώρες στις οποίες η στατική διαχείριση των σταθμών βάσης μπορεί να εφαρμοστεί καθώς η επίδοση του δικτύου παραμένει κάτω από το επιτρεπτό όριο.



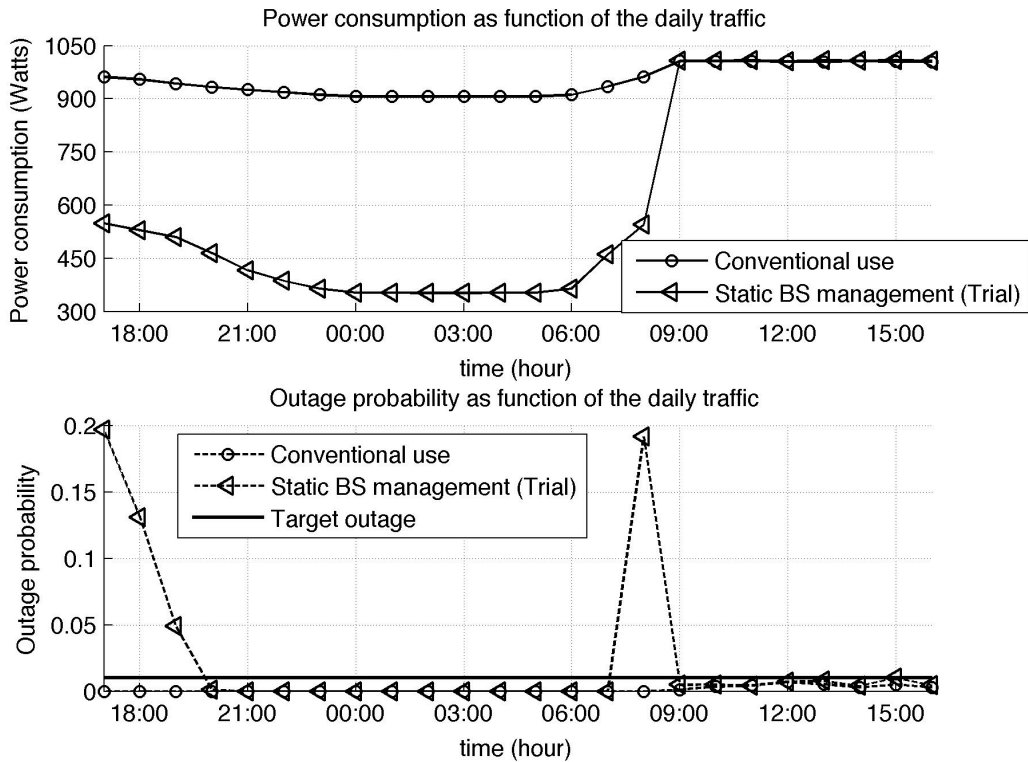
Σχ. 7.8. Εξαγωνική τοπολογία δικτύου με Micro BSs με στατική διαχείριση των σταθμών βάσης, όπου ορισμένοι σταθμοί βάσης έχουν την δυνατότητα να αυξήσουν την ακτίνα κάλυψής τους από R σε $2 \cdot R$ ενώ οι υπόλοιποι απενεργοποιούνται τελείως

7.3.2. Επιδόσεις του δικτύου και εξοικονόμηση ενέργειας

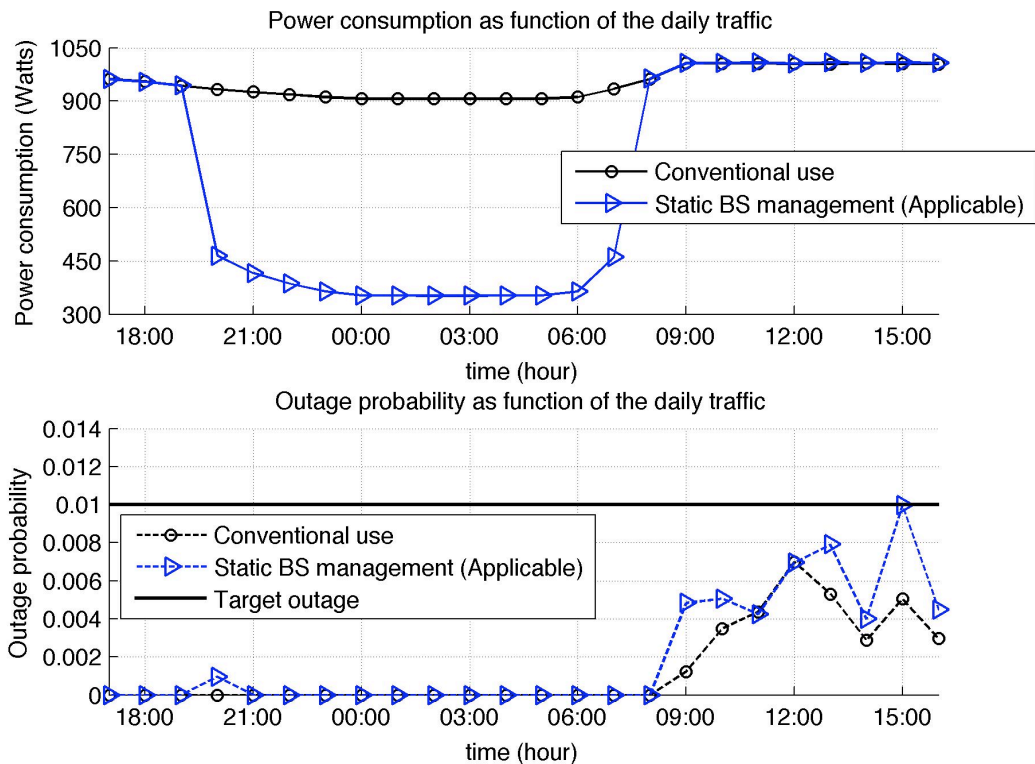
Στο Σχ. 7.9 παρατηρούμε την κατανάλωση ενέργειας και την επίδοση του δικτύου έχοντας εφαρμόσει την στατική διαχείριση των σταθμών βάσης καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας κατά την οποία η κίνηση είναι μικρότερη από την κίνηση αιχμής. Με μια τέτοια εφαρμογή είναι δυνατόν να έχουμε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αν δεν λαμβάνουμε υπόψη την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών. Λαμβάνοντας όμως υπόψη τα αποτελέσματα της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας των χρηστών φαίνεται ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο μεταξύ των ωρών 20:00 και 08:00, δηλαδή για ένα διάστημα 12 ωρών (μισή μέρα). Με αυτή την μέθοδο και με την εφαρμογή της όπως φαίνεται στο Σχ. 7.10 είναι δυνατόν να εξοικονομήσουμε 27.95% ενέργεια κατά την διάρκεια της μιας μέρας χωρίς η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών να ξεπερνάει το όριο.

Πιν. 7.3. Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας και ημερήσια κατανάλωση ενέργειας της στατικής διαχείρισης των σταθμών βάσης ομοιογενούς τοπολογίας Micro BS.

Static BS management		
Daily Energy Saving	%	27.95
Energy Saving at Low Traffic	%	61.11
Daily Energy Consumption	<i>kWh</i>	16.455



Σχ. 7.9. Δοκιμαστική περίπτωση της στατικής διαχείρισης των σταθμών βάσης για τον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας και την επίδοση του δικτύου



Σχ. 7.10. Κατανάλωση ενέργειας και πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών μετά την εφαρμογή της στατικής διαχείρισης των σταθμών βάσης σε ομοιογενές δίκτυο με Micro BSs.

7.4. Υβριδική μέθοδος διαχείρισης ομοιογενούς τοπολογίας με Micro BSs

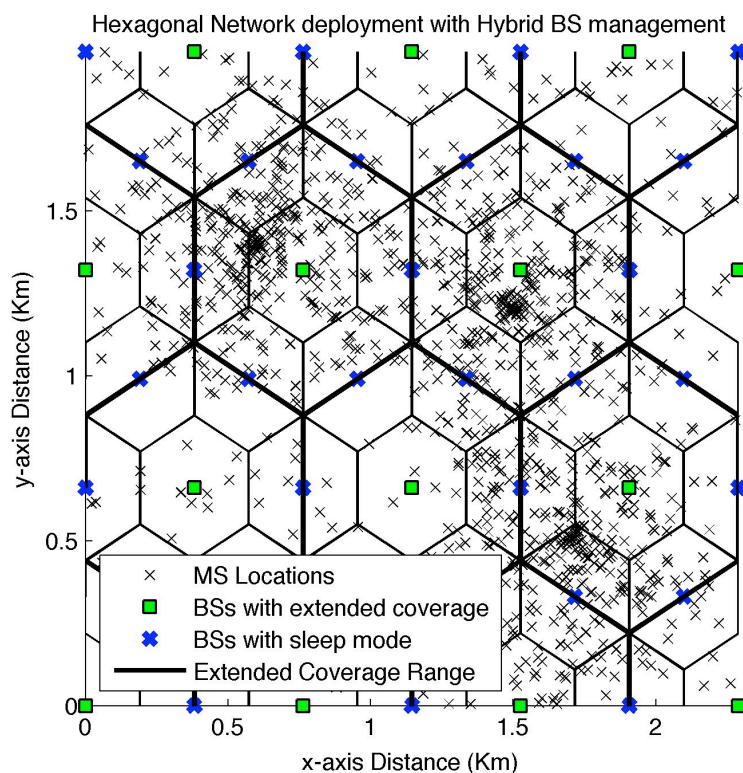
7.4.1. Λειτουργία και χαρακτηριστικά του δικτύου

Η τελευταία μέθοδος διαχείρισης των σταθμών βάσης για εξοικονόμησης της ενέργειας αναφέρεται σε τοπολογία δικτύου εξαγωνικής διάταξης και έχει ως στόχο να ελαχιστοποιήσει περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας που προκύπτει από την στατική διαχείριση των σταθμών βάσης.

Αναφερόμαστε σε αυτήν την μέθοδο ως υβριδική μέθοδος διαχείρισης των σταθμών βάσης. Το Σχ. 7.11 παρουσιάζει την λειτουργία των σταθμών βάσης για την εν λόγω μέθοδο. Για την ανάπτυξη της υβριδικής μεθόδου υιοθετούμε την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την στατική διαχείριση έτσι ώστε στο δίκτυο να υπάρχουν οι σταθμοί βάσης (πράσινο τετράγωνο) οι οποίοι με αυτήν την διάταξη και με την αύξηση της ακτίνας κάλυψής τους έχουν την δυνατότητα να καλύψουν όλη την περιοχή, επιπλέον όμως χρησιμοποιούμε τους υπόλοιπους σταθμούς βάσης (έντονο μπλε χιαστή) έτσι ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν δυναμικά, δηλαδή, είτε σε ενεργή κατάσταση αν χρειάζονται, είτε σε κατάσταση ύπνου αν δεν χρειάζονται - αυτή η απόφαση θα παρθεί βάσει του φορτίου κίνησης που αισθάνονται.

Έχοντας παρατηρήσει ότι η στατική διαχείριση των σταθμών βάσης δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε ορισμένες ώρες της ημέρας όπως από τις 17:00 μέχρι τις 20:00 και από τις 08:00 μέχρι τις 09:00 επιχειρούμε με την υποστήριξη μερικών σταθμών βάσης να αυξήσουμε την χωρητικότητα αυτής της μεθόδου. Με άλλα λόγια αντί να χρησιμοποιούμε την συμβατική λειτουργία του δικτύου για να παρέχουμε κάλυψη και αρκετή χωρητικότητα στο δίκτυο - για τις περιόδους που αναφέρθηκαν - μπορούμε να συνδυάσουμε την δυναμική λειτουργία μερικών σταθμών βάσης με την στατική λειτουργία των σταθμών βάσης που καλύπτουν όλη την περιοχή του δικτύου έτσι ώστε να επιτευχθεί η αύξηση της χωρητικότητας σε αυτές τις χρονικές περιόδους.

Για το λόγο ότι η στατική διαχείριση των σταθμών βάσης έχει την δυνατότητα να εξυπηρετήσει τις ανάγκες του δικτύου κατά την διάρκεια 20:00 με 08:00, ορίζουμε ως λειτουργία αυτής της μεθόδου ότι για την συγκεκριμένη περίοδο οι σταθμοί βάσης με την δυναμική λειτουργία δεν είναι απαραίτητοι, επομένως είναι δυνατόν να απενεργοποιηθούν για το χρονικό διάστημα των 12 ωρών. Σημαντικό είναι επίσης να αναφέρουμε ότι οι σταθμοί βάσης που λειτουργούν δυναμικά δεν αυξάνουν την ακτίνα κάλυψής τους από R σε $2 \cdot R$ όπως οι σταθμοί βάσης που λειτουργούν στην στατική λειτουργία.



Σχ. 7.11. Εξαγωνική διάταξη δικτύου με υβριδική διαχείριση των σταθμών βάσης. Ένας καθορισμένος αριθμός σταθμών βάσης μπορεί να λειτουργήσει με αύξηση της ακτίνας κάλυψής του, και οι υπόλοιποι σταθμοί βάσης διαθέτουν δυναμική λειτουργία.

7.4.1. Εξοικονόμηση ενέργειας και επιδόσεις

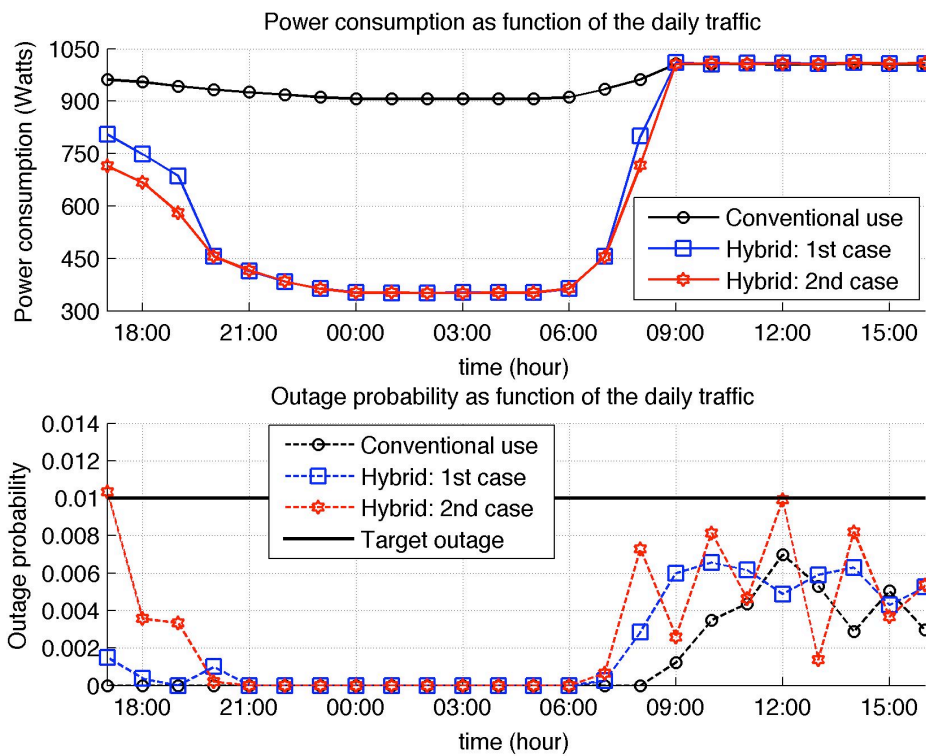
Παρατηρώντας το Σχ. 7.12 διαπιστώνουμε ότι με την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου επιτύχαμε την περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο ομοιογενές δίκτυο με Micro BSs σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας που προκύπτει από την στατική μέθοδο. Για την διερεύνηση της επιπλέον μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας εκτελέσαμε δυο περιπτώσεις.

Και στις δύο περιπτώσεις ισχύει ότι η κάλυψη του δικτύου βασίζεται στους σταθμούς βάσης με την λειτουργία της στατικής διαχείρισης. Όσον αφορά όμως την πρώτη περίπτωση (1st case), για τους σταθμούς βάσης που λειτουργούν δυναμικά ορίζουμε το κατώφλι σε 0.02. Αυτό σημαίνει ότι όσοι σταθμοί βάσης αισθάνονται φορτίο μεγαλύτερο από αυτό το κατώφλι θα παραμείνουν σε ενεργή κατάσταση έτσι ώστε να υποστηρίξουν το υπάρχον δίκτυο - από άποψη χωρητικότητας. Ενώ οι σταθμοί βάσης που αισθάνονται φορτίο μικρότερο από το κατώφλι θα μεταβαίνουν σε κατάσταση ύπνου. Για την συγκεκριμένη περίπτωση το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας υπολογίζεται σε 31.46% σε σχέση με την συμβατική λειτουργία του δικτύου και η επίδοση θεωρείται υψηλή αφού κατά τις ώρες στις οποίες λειτουργούν οι σταθμοί βάσης με δυναμική διαχείριση παράλληλα με τους σταθμούς βάσης με στατική διαχείριση η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών είναι σχεδόν μηδενική.

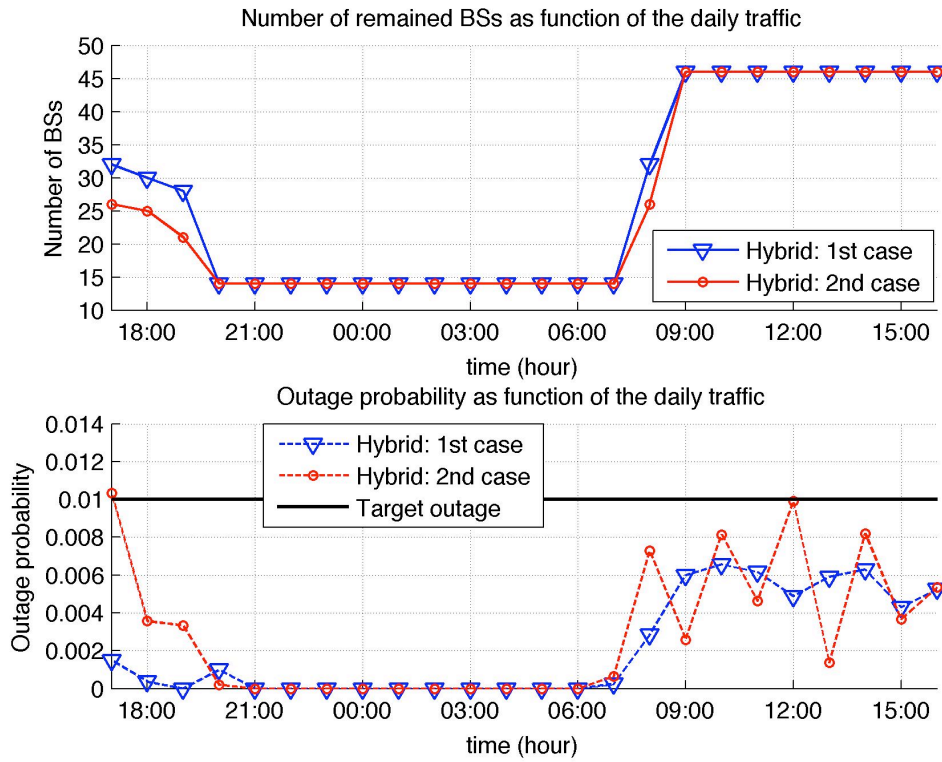
Στην 2η περίπτωση (2nd case) χρησιμοποιούμε κατώφλι ίσο με 0.04, αυτό σημαίνει ότι οι σταθμοί βάσης που θα μεταβούν σε κατάσταση ύπνου θα είναι περισσότεροι σε σχέση με αυτούς της 1ης περίπτωσης. Ως αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι - όπως φαίνεται και στο Σχ. 7.12 - η επιπλέον μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, όπου το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας υπολογίζεται σε 33.06% σε σχέση με την συμβατική λειτουργία του δικτύου, αλλά και η επιπλέον

αύξηση της πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών. Παρόλα αυτά, η περίπτωση αυτή είναι εφαρμόσιμη αφού η επίδοσή που προκύπτει δεν ξεπερνά κατά σημαντικό βαθμό το επιθυμητό όριο.

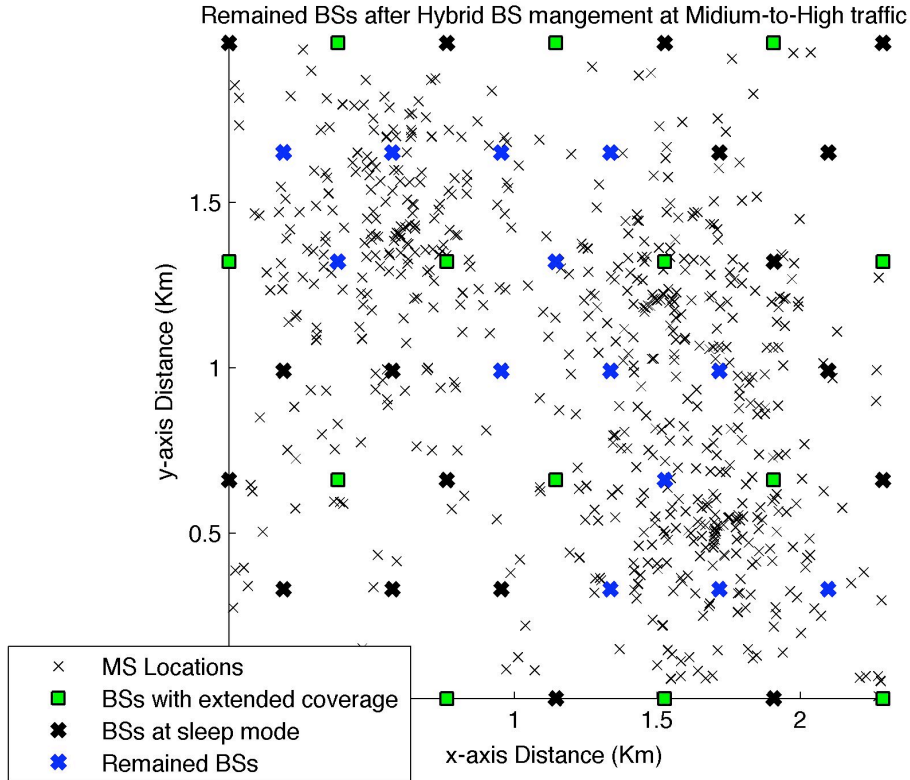
Τέλος το Σχ. 7.14 παρουσιάζει τους σταθμούς βάσης που παραμένουν σε ενεργή κατάσταση κατά την διάρκεια φορτίου κίνησης μέτριο-προς-υψηλό, πιο συγκεκριμένα το στιγμιότυπο του δικτύου αναφέρεται στο διάστημα ωρών 17:00 με 18:00 και 08:00 με 09:00, δηλαδή, τα αποτελέσματα πάρθηκαν με βάση την κίνηση που παρατηρείται κατά την διάρκεια αυτών των ωρών. Η περίπτωση στην οποία αναφέρεται το στιγμιότυπο είναι η 2η. Σε αυτό το στιγμιότυπο οι σταθμοί βάσης με πράσινο τετράγωνο είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται με βάση τη στατική διαχείριση και έχουν στόχο την κάλυψη όλης της περιοχής, οι σταθμοί βάσης με έντονο μπλε χιαστή είναι αυτοί που παραμένουν σε ενεργή κατάσταση έτσι ώστε να ενισχύσουν την χωρητικότητα της στατικής τοπολογίας και οι σταθμοί βάσης με το έντονο μαύρο χιαστή είναι αυτοί που μεταβαίνουν σε κατάσταση ύπνου.



Σχ. 7.12. Κατανάλωση ενέργειας και πιθανότητα διακοπής λειτουργίας χρηστών μετά την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου για την διαχείριση των σταθμών βάσης σε ομοιογενές δίκτυο με Micro BSs.



Σχ. 7.13. Αριθμός σταθμών βάσης που παραμένουν σε ενεργή κατάσταση και επίδοση του δικτύου μετά την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου για την εξυπηρέτηση των χρηστών.



Σχ. 7.14. Στιγμιότυπο δικτύου μετά την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου κατά την διάρκεια φορτίου κίνηση μέτριο-προς-υψηλό.

Πιν. 7.4. Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, διάφορα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν και ημερήσια κατανάλωση ενέργειας για τις δυο περιπτώσεις της υβριδικής διαχείρισης των σταθμών βάσης ομοιογενούς τοπολογίας Micro BS.

		1st case Hybrid BS management	2nd case Hybrid BS management
Decision Time	<i>min</i>	1	1
Threshold	-	0.02	0.04
Daily Energy Saving	%	31.46	33.06
Energy Saving at Low Traffic	%	61.11	61.11
Daily Energy Consumption	<i>kWh</i>	15.652	15.288

7.5. Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και λειτουργικό κόστος των σταθμών βάσης

Σε αυτό το σημείο του κεφαλαίου συγκρίνουμε τις μεθόδους διαχείρισης των Micro BSs για ομοιογενή τοπολογία που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Εισάγουμε διάφορα συγκριτικά μεγέθη που ενδιαφέρουν ένα πάροχο κινητών δικτύων πρόσβασης, όπως το λειτουργικό κόστος ενός τέτοιου δικτύου αλλά και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν για ένα χρόνο λειτουργίας.

Για τον υπολογισμό αυτών των μεγεθών θεωρούμε τα εξής: μια *kWh* κοστίζει 0.1€, και ότι για την κατανάλωση μιας *kWh* παράγονται 700gr CO₂. Αν και στην πραγματικότητα το πρότυπο κίνησης μεταβάλλεται από μέρα σε μέρα, για παράδειγμα, το σαββατοκύριακο το φορτίο κίνησης σε μια βιομηχανική περιοχή θα είναι αρκετά χαμηλό, σε αυτήν την εργασία θεωρούμε ότι κάθε μέρα του χρόνου περιγράφεται από το πρότυπο κίνησης που έχουμε παρουσιάσει. Επομένως για την ετήσια κατανάλωση ενέργειας σε *kWh* πολλαπλασιάζουμε τις 365 του χρόνου με την ημερήσια κατανάλωση ενέργειας που έχουμε ήδη υπολογίσει.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα παραπάνω μεγέθη με βάσει τα δεδομένα που έχουμε ορίσει και βρίσκουμε το ετήσιο λειτουργικό κόστος σε €/year και τις ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε *Tons* CO₂/year για κάθε μέθοδο που εφαρμόζουμε στο ομοιογενές δίκτυο για την εξοικονόμηση της ενέργειας.

Πιν. 7.5. Συνοπτικός πίνακας με την κατανάλωση ενέργειας, τα λειτουργικά κόστη, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας ανά χρόνο για όλα τα σενάρια.

Scenario	Annual Energy Consumption	Annual Operating Cost	Annual Carbon Emissions	Overall Saving
	<i>kWh</i>	€/year	<i>Tons</i> CO ₂ /year	%
Conventional use	8336.235	833.6235	5.8353	0
1st case Dynamic BS management	7579.955	757.9955	5.3059	9.07

Scenario	Annual Energy Consumption	Annual Operating Cost	Annual Carbon Emissions	Overall Saving
2nd case Dynamic BS management	7981.82	798.182	5.5872	4.25
Static BS management	6006.075	600.6075	4.2042	27.95
1st case Hybrid BS management	5712.98	571.298	3.9990	31.46
2nd case Hybrid BS management	5580.12	558.012	3.9060	33.06

7.6. Σύνοψη αποτελεσμάτων και συγκρίσεις

Αρχίζοντας από το σενάριο με την υβριδική τοπολογία δικτύου παρατηρήσαμε ότι απενεργοποιώντας δυναμικά μερικούς Micro BSs είναι δυνατόν να εξοικονομηθεί κάποιο ποσό ενέργειας. Παρόλο που η εξοικονόμηση ενέργειας λαμβάνει χώρα συνήθως σε περιόδους χαμηλής κίνησης, σε αυτή την περίπτωση μερικοί Micro BSs είναι δυνατόν να μεταβούν σε κατάσταση ύπνου ακόμα και σε περιόδους υψηλής κίνησης, αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι σε ένα τέτοιο δίκτυο η χωρική κατανομή των χρηστών είναι αρκετά αραιωμένη, επομένως, ορισμένοι Micro BSs δεν θα αισθάνονται σημαντική ποσότητα φορτίου ακόμη και στις περιόδους κίνησης αιχμής.

Το σημαντικό σε αυτήν την μέθοδο είναι ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους Macro BSs ώστε με βάσει αυτούς να αποτρέψουμε τους Micro BSs να λειτουργούν όταν οι πρώτοι δεν έχουν διαθέσει ακόμα όλους τους τους ραδιο-πόρους - για αυτήν την μέθοδο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας 8.49%.

Ελέγχοντας στην συνέχεια διάφορες μεθόδους στην ομοιογενή τοπολογία Micro BSs παρατηρήσαμε πώς μπορεί να εξοικονομηθεί όσο το δυνατότερο περισσότερη ενέργεια. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήσαμε είναι η δυναμική μέθοδος για διαχείριση των σταθμών βάσης, η στατική διαχείριση των σταθμών βάσης και η υβριδική μέθοδος διαχείρισης των σταθμών βάσης η οποία αποτελεί ένα συνδυασμό των δυο προηγούμενων.

Συγκρίνοντας την δυναμική διαχείριση με την στατική διαχείριση των σταθμών βάσης παρατηρούμε ότι στην δυναμική διαχείριση επιλέγονται σταθμοί βάσης ώστε να καλύπτουν περιοχές με μεγαλύτερη κίνηση, ενώ άλλες περιοχές μπορεί να παραμείνουν ακάλυπτες, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο αφού αρκετοί σταθμοί βάσης - γύρω από τις περιοχές με υψηλή κίνηση - θα παραμείνουν σε ενεργή κατάσταση έχοντας αυξημένη την ακτίνα κάλυψής τους. Από την άλλη μεριά στην στατική διαχείριση των σταθμών βάσης η απενεργοποίηση των σταθμών βάσης είναι πιο οργανωμένη και έχει ως στόχο να μεγιστοποιεί την κάλυψη μέσα στο δίκτυο με το λιγότερο αριθμό των σταθμών βάσης κατά την διάρκεια χαμηλής κίνησης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την στατική μέθοδο είναι δυνατόν να επιτύχουμε ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας 27.95% ενώ με την δυναμική διαχείριση των σταθμών βάσης το ποσοστό αυτό είναι σημαντικά μικρότερο, 4.25%. Έτσι συμπεραίνουμε ότι μια ομοιόμορφη διαχείριση των σταθμών βάσης όπως αυτή της στατικής μεθόδου είναι αποδοτική ως προς μια ενδεχόμενη εξοικονόμηση ενέργειας ενώ την ίδια στιγμή κρατάει την διακοπή λειτουργίας των χρηστών κάτω από το επιθυμητό όριο. Παρόλα αυτά, το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για μια συγκεκριμένη ώρα όπου το επίπεδο κίνησης είναι χαμηλό, δηλαδή, μεταξύ των ωρών 00:00 με 06:00, για την δυναμική μέθοδο προέκυψε 17.24%, ενώ για την στατική μέθοδο παρατηρήθηκε 61.11%.

Σημειώνουμε ότι τα ποσοστά της δυναμικής μεθόδου είναι από την περίπτωση που η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας δεν υπερβαίνει το επιτρεπτό όριο 1%.

Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια για ακόμη περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας, αναπτύχθηκε η υβριδική μέθοδος η οποία συνδυάζει χαρακτηριστικά της στατικής και της δυναμικής μεθόδου. Είναι γνωστό ότι κατά την διάρκεια ορισμένων ωρών η στατική μέθοδος δεν μπορεί να υποστηρίξει την χωρητικότητα του δικτύου, πράγμα που σημαίνει ότι το δίκτυο πρέπει να επιστρέψει στην συμβατική λειτουργία του, για να ξεπερασθεί αυτό το πρόβλημα είναι δυνατόν να αντικαθιστούμε την συμβατική λειτουργία του δικτύου με αυτή των σταθμών βάσης που λειτουργούν με την στατική μέθοδο με την επιπλέον υποστήριξη που μπορούν να παρέχουν οι σταθμοί βάσης που βρίσκονται γύρω από τους πρώτους. Για αυτούς τους σταθμούς βάσης ορίσαμε ότι πρέπει να λειτουργούν δυναμικά κατά αυτά τα χρονικά διαστήματα ώστε να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, που προκύπτει με την χρήση της συμβατικής λειτουργίας. Διαπιστώθηκε ότι με αυτή την μέθοδο είναι δυνατόν να επιτύχουμε επιπλέον μείωση της κατανάλωσης ενέργειας με μέγιστο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας 33.06%, για το οποίο η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών δεν ξεπερνά το όριο 1%.

Κεφάλαιο 8

Σύνοψη, συμπεράσματα και αποτελέσματα

8. Σύνοψη, συμπεράσματα και αποτελέσματα

Αρχικά στην διπλωματική εργασία γίνεται αναφορά σε διάφορα γεγονότα που έχουν σχέση με την κατανάλωση ενέργειας στον τομέα της ICT βιομηχανίας και πιο συγκεκριμένα στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών που είναι και το αντικείμενο της εν λόγω εργασίας. Είναι προφανές από τα δεδομένα που παρουσιάζονται ότι υπάρχει το κίνητρο για παρόχους κινητών επικοινωνιών να βελτιστοποιήσουν ακόμη περισσότερο την ενεργειακή αποδοτικότητα των δικτύων τους με διάφορες τεχνικές που έχουν σχέση με την σχεδίαση υλικού, την διάταξη του δικτύου και την λειτουργία του.

Στην συνέχεια γίνεται μια παρένθεση ώστε να αναφερθούμε σε διάφορα βασικά θέματα και τεχνολογίες των κινητών επικοινωνιών.

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αρχίζει με την παρουσίαση μερικών τεχνικών μεθόδων για εξοικονόμηση ενέργειας που μπορούν να εφαρμοστούν σήμερα, ή σε σύντομο χρονικό διάστημα στο μέλλον. Οι τεχνικές που παρουσιάζουμε είναι η κατάσταση ύπνου των σταθμών βάσης και η προσαρμογή των φυσικών παραμέτρων, όπως η ισχύς εκπομπής, οι οποίες δίνουν την δυνατότητα διαχείρισης ενός κινητού δικτύου πρόσβασης για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ενώ θα διατηρούνται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι απαιτήσεις των χρηστών. Αυτόν τον συγκεκριμένο τομέα ακολούθησε και η εργασία μας. Άλλες τεχνικές με τις οποίες υπάρχει δυνατότητα να εξοικονομηθεί ενέργεια είναι βελτίωση του υλικού των εξοπλισμών των σταθμών βάσης, οι διάφορες διατάξεις του δικτύου έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ενεργειακή αποδοτικότητα, η συνεργασία μεταξύ παρόχων κινητών δικτύων πρόσβασης, τα πράσινα κέντρα δεδομένων, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κ.α.

Στην συνέχεια της εργασίας αναπτύχθηκε το μοντέλο του συστήματος. Στο συγκεκριμένο κομμάτι της διπλωματικής έγινε αναφορά σε διάφορες μαθηματικές εξισώσεις που συνθέτοντας τις δημιουργούμε τον αλγόριθμο για την βάση των προσομοιώσεων της εργασίας. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε αναφέρεται στο DL και ο αλγόριθμος βασίστηκε στις εξισώσεις ισχύος και ποιότητας της ζεύξης της τεχνολογίας UMTS. Λήφθηκαν επίσης υπόψη η ευαισθησία του δέκτη με παραμέτρους της τεχνολογίας που αναφέρθηκε και το μοντέλο διάδοσης για τον υπολογισμό των απωλειών και των αποστάσεων μεταξύ πομπού και δέκτη το οποίο περιγράφεται από το COST Walfish-Ikegami. Στη συνέχεια έγιναν διάφορες προσομοιώσεις για την εκτίμηση της χωρητικότητας μιας κυψέλης που χαρακτηρίζεται από όλα τα παραπάνω, τα αποτελέσματα έδειξαν πώς διαφοροποιείται η χωρητικότητα ενός σταθμού βάσης όταν σε μια κυψέλη υπάρχουν χρήστες που κατανέμονται με κανονική κατανομή με μέση τιμή το κέντρο της κυψέλης και διακύμανση την ακτίνα κάλυψης της κυψέλης ή ομοιόμορφη κατανομή μέσα στην περιοχή της κυψέλης. Η χωρητικότητα είναι προφανώς αυξημένη στην κανονική κατανομή αφού οι περισσότεροι χρήστες βρίσκονται πιο κοντά στον πομπό.

Στο ίδιο κομμάτι της εργασίας παρουσιάζονται επίσης οι διάφορες διεργασίες που μοντέλου του συστήματος. Οι διεργασίες είναι τρεις, το σύστημα σερβιρίσματος best server το οποίο ενώνει έναν χρήστη σε ένα σταθμό βάσης όταν ο πρώτος λαμβάνει ισχύ από το δεύτερο η οποία είναι μεγαλύτερη από την ευαισθησία του δέκτη, ο περιορισμός των ράδιο-πόρων του συστήματος που θεωρεί ότι ένας χρήστης μπορεί να εξυπηρετηθεί από έναν σταθμό βάσης αν και μόνο αν υπάρχουν διαθέσιμοι ράδιο-πόροι σε αυτόν τον σταθμό βάσης και ο επαναληπτικός αλγόριθμος προσαρμογής ισχύος που προσαρμόζει την ισχύ των σταθμών βάσης του δικτύου στις απαιτήσεις του φορτίου κίνησης κάθε χρονική στιγμή. Εδώ εκτελέσαμε μια προσομοίωση για να παρακολουθήσουμε την

ορθότητα του αλγορίθμου προσαρμογής ισχύος. Τέλος, το μοντέλο του συστήματος χαρακτηρίζεται από αφίξεις χρηστών - σε ένα δίκτυο - με διαδικασία poisson και θεωρούμε ότι ένας χρήστης παραμένει στο δίκτυο για χρονική διάρκεια που περιγράφεται από εκθετική κατανομή.

Στο επόμενο κομμάτι της διπλωματικής αναφερθήκαμε στην κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης. Το κομμάτι αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο αφού με τις μαθηματικές εξισώσεις που αναφέρονται μπορούμε να εκτιμήσουμε την κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης ενός δικτύου, εισάγοντας τις στο μοντέλο του συστήματος που αναφέρθηκε. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό των σταθμών βάσης και στο ποια είναι η συμβολή του κάθε περιεχομένου μέσα σε αυτόν ως προς την συνολική κατανάλωση ενέργειας που παρατηρείται. Εδώ δείχνουμε το block διάγραμμα των περιεχομένων του σταθμού βάσης το οποίο είναι σημαντικό για την κατανόηση της εσωτερικής διάταξής του και την κατανομή της εισερχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στα περιεχόμενά του. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα μαθηματικών εξισώσεων, τα μοντέλα αυτά αρχικά περιγράφονται με αναλυτικές παραμέτρους, ενώ στην συνέχεια διαμορφώνονται σε πιο συμπυκνωμένες/απλές μαθηματικές εξισώσεις. Είναι γνωστό ότι οι εξισώσεις των μοντέλων κατανάλωσης ενέργειας είναι γραμμικές σε σχέση με την ισχύ εκπομπής εξόδου. Γι' αυτό και είναι ξεκάθαρο ότι όσο αυξάνεται η ισχύς εκπομπής αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας. Επομένως, ένας σταθμός βάσης που έχει οριστεί ώστε να αυξάνει την ακτίνα κάλυψής του με βάση την διαχείριση των σταθμών βάσης θα καταναλώνει επιπλέον ενέργεια σε σχέση με αυτήν που κατανάλωνε στην προηγούμενη κατάστασή του. Τέλος, για την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας των σταθμών βάσης υιοθετούνται οι απλές μαθηματικές εξισώσεις για λόγους συμβατότητας και απλότητας, αφού αυτές αποτελούνται από απλές παραμέτρους και συγκεκριμένα για τους Micro BSs λαμβάνουν υπόψη το φορτίο κίνησης, το οποίο είναι μια σημαντική παράμετρος στην εργασίας μας.

Στη συνέχεια της διπλωματικής εκτελέστηκαν διάφορες προσομοιώσεις και πάρθηκαν αποτελέσματα που παρουσιάζουν διάφορα ζητήματα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στα κινητά δίκτυα σταθμών βάσης. Εξετάστηκαν διάφορες τοπολογίες δικτύων ως προς την κατανάλωση ενέργειάς τους, όπως η υβριδική που αποτελείται από Macro BSs και Micro BSs και η ομοιογενής τοπολογία εξαγωνικών και τετραγωνικών Micro BSs. Αρχικά παρουσιάσαμε την ενεργειακή αποδοτικότητα των παραπάνω τοπολογιών, και δείχθηκε ότι με την εισαγωγή μερικών Micro BSs σε ένα δίκτυο με Macro BSs είναι δυνατόν να αυξηθεί η βέλτιστη απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών Macro BSs αλλά με μια ελάχιστη αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας, ακόμη έγινε σαφές ότι η εξαγωνική τοπολογία είναι περισσότερο αποδοτική ενεργειακά σε σχέση με την τετραγωνική, αφού με την ίδια ισχύ εκπομπής μπορεί να καλύψει περισσότερο εμβαδόν. Συγκρίνοντας όμως την κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την χωρητικότητα και την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών, παρατηρήσαμε ότι, η τετραγωνική διάταξη να μην καταναλώνει περισσότερο σε σχέση με την εξαγωνική αλλά παρουσιάζει μικρότερη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να εξυπηρετήσει περισσότερους χρήστες. Ο λόγος είναι ότι, με την τετραγωνική τοπολογία απαιτούνται περισσότεροι σταθμοί βάσης για την κάλυψη μιας περιοχής από 'τι θα χρειαζόνταν με την εξαγωνική, και ότι στην πρώτη οι σταθμοί βάσης είναι αρκετά πυκνά διατεταγμένοι. Επιπλέον, εισάγουμε ένα πρότυπο κίνησης μιας ημέρας το οποίο παρουσιάζει υψηλή κίνηση κατά την διάρκεια της ημέρας και χαμηλή κατά την διάρκεια της νύκτας. Με βάση αυτό εξάγουμε διάφορα αποτελέσματα για την συμπεριφορά της κατανάλωσης ενέργειας και της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας των χρηστών καθ' όλη της διάρκεια της ημέρας. Παρατηρούμε ότι το δίκτυο καταναλώνει σημαντική ενέργεια κατά την διάρκεια χαμηλής κίνησης, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να υπάρξει μείωση αυτής της κατανάλωσης ενέργειας με διάφορες μεθόδους διαχείρισης των σταθμών βάσης.

Το τελευταίο κομμάτι της διπλωματικής εισάγει τις μεθόδους διαχείρισης των σταθμών βάσης. Αρχικά γίνεται αναφορά στην διεργασία της διαχείρισης των σταθμών βάσης, συγκεκριμένα αυτή η διεργασία αναφέρεται στην λειτουργία των σταθμών βάσης που χαρακτηρίζονται από δυναμικότητα, δηλαδή έχουν την δυνατότητα να μεταβούν σε κατάσταση ύπνου ή να αυξήσουν την ακτίνα κάλυψής τους παραμένοντας σε ενεργή κατάσταση ανάλογα με μια απόφαση η οποία βασίζεται στο φορτίο κίνησης που αισθάνονται οι σταθμοί βάσης στην περιοχή τους. Στην διεργασία συλλέγονται δεδομένα για ένα αρκετά μικρό χρονικό διάστημα και στη συνέχεια αποφασίζεται η κατάσταση του σταθμού βάσης για την περίοδο του σεβριρίσματος. Οι μέθοδοι διαχείρισης των σταθμών βάσης που εξετάστηκαν είναι η δυναμική, η στατική και η υβριδική η οποία λαμβάνει τα χαρακτηριστικά της από τις δυο προηγούμενες. Η δυναμική μέθοδος εφαρμόστηκε σε υβριδικό δίκτυο αλλά και ομοιογενές με Micro BSs, για το πρώτο παρατηρήθηκε ότι οι Micro BSs είναι δυνατόν να μην αξιοποιούνται καθόλου κατά την διάρκεια εκτός της κίνησης αιχμής, αφού οι Macro BSs έχουν την δυνατότητα να καλύψουν όλες τις ανάγκες των χρηστών για αυτές τις ώρες, ενώ κατά την διάρκεια κίνησης αιχμής μόνο μερικοί Micro BSs απαιτούνται για τις απαιτήσεις του δικτύου, επομένως σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μείωση κατανάλωσης ενέργειας και σε ώρες αιχμής, το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας που πετύχαμε είναι 8.49% για όλη την διάρκεια της ημέρας, από την άλλη μεριά, στο ομοιογενές δίκτυο παρατηρήθηκε ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας με 9.07% αλλά υπήρχε σημαντική αύξηση της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας των χρηστών η οποία ξεπερνά το επιτρεπτό όριο, για την μείωση της διακοπής λειτουργίας αλλάξαμε την χρονική στιγμή της απόφασης έτσι ώστε να συλλέγονται περισσότερες πληροφορίες και παρατηρήσαμε, να μεν την μείωση της διακοπής λειτουργίας αλλά και την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση ενέργειας 4.25% σε σχέση με την συμβατική λειτουργία. Στη συνέχεια, ελέγχουμε την στατική διαχείριση των σταθμών βάσης, σε αυτήν την μέθοδο ένας προκαθορισμένος αριθμός σταθμών βάσης παραμένει σε ενεργή κατάσταση κατά την διάρκεια χαμηλής κίνησης. Αυτοί οι σταθμοί βάσης επιλέγονται έτσι έστω η περιοχή που μελετάμε να μπορεί να καλυφθεί πλήρως, για να επιτευχθεί αυτό πρέπει οι συγκεκριμένοι σταθμοί βάσης να αυξήσουν την ακτίνα κάλυψής τους στο διπλάσιο. Το στιγμιότυπο του δικτύου κατά τις ώρες χαμηλής κίνησης αποτελείται από 14 σταθμοί βάσης σε ενεργή κατάσταση από τους 46 συνολικά, με αυτό επιτυγχάνεται ένα σημαντικό ποσοστό της εξοικονόμησης της ενέργειας 27.95% σε σχέση με την συμβατική λειτουργία. Τέλος, αναπτύσσεται μια νέα υβριδική μέθοδος η οποία έχει ως στόχο την επιπλέον αύξηση της εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτή η διαχείριση των σταθμών βάσης χρησιμοποιεί τους σταθμούς βάσης από την στατική διαχείριση έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης κάλυψη του δικτύου και επιπλέον κάνει χρήση των υπόλοιπων σταθμών βάσης δυναμικά με στόχο την αύξηση της χωρητικότητας στις χρονικές περιόδους όπου η στατική μέθοδος δεν μπορεί να υποστηρίξει τις απαιτήσεις των χρηστών. Με αυτήν την μέθοδο παρατηρήσαμε ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας 33.06% σε σχέση με την συμβατική λειτουργία, το οποίο είναι αυξημένο κατά 5.11% σε σχέση με αυτό της στατικής διαχείρισης των σταθμών βάσης. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των χρηστών συνεχίζει να παραμένει χαμηλή και συγκεκριμένα κάτω από το επιθυμητό όριο.

9. Αναφορές

- [1] Gilhousen, K.S.; Jacobs, I.M.; Padovani, R.; Viterbi, A.J.; Weaver, L.A., Jr.; Wheatley, C.E., III; , "On the capacity of a cellular CDMA system," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.40, no.2, pp.303-312, May 1991
- [2] Gronsund, P.; Hai Ngoc Pham; Engelstad, P.E.; , "Towards dynamic spectrum access in primary OFDMA systems," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on* , vol., no., pp.848-852, 13-16 Sept. 2009
- [3] Kelif, J.-M.; Coupechoux, M.; , "Cell breathing, sectorization and densification in cellular networks," *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks, 2009. WiOPT 2009. 7th International Symposium on* , vol., no., pp.1-7, 23-27 June 2009
- [4] Deruyck, M.; Vereecken, W.; Tanghe, E.; Joseph, W.; Pickavet, M.; Martens, L.; Demeester, P.; , "Power consumption in wireless access network," *Wireless Conference (EW), 2010 European* , vol., no., pp.924-931, 12-15 April 2010
- [5] Zhisheng Niu; Yiqun Wu; Jie Gong; Zexi Yang; , "Cell zooming for cost-efficient green cellular networks," *Communications Magazine, IEEE* , vol.48, no.11, pp.74-79, November 2010
- [6] Chiaraviglio, L.; Ciullo, D.; Meo, M.; Marsan, M.A.; , "Energy-efficient management of UMTS access networks," *Teletraffic Congress, 2009. ITC 21 2009. 21st International* , vol., no., pp. 1-8, 15-17 Sept. 2009
- [7] Richter, F.; Fehske, A.J.; Fettweis, G.P.; , "Energy Efficiency Aspects of Base Station Deployment Strategies for Cellular Networks," *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009 IEEE 70th* , vol., no., pp.1-5, 20-23 Sept. 2009
- [8] NEC, "Green Radio. "NEC's Approach towards Energy-efficient Radio Access Networks"". White Paper, 2010.
- [9] M. A. Marsan and M. Meo, "Energy efficient management of two cellular access networks," *Proc. of ACM SIGMETRICS workshop*, 2009.
- [10] G. Koutitas and P. Demestichas, "A review of energy efficiency in telecommunication networks," *Proc. In Telecomm. Forum (TELFOR)*, pp. 1-4, 2009.
- [11] Schmitt, Gunter; , "The Green Base Station," *Telecommunication - Energy Special Conference (TELESCON), 2009 4th International Conference on* , vol., no., pp.1-6, 10-13 May 2009
- [12] Valerdi, D.; Qiang Zhu; Exadaktylos, K.; Suhua Xia; Arranz, M.; Rui Liu; Xu, D.; , "Intelligent energy managed service for green base stations," *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2010 IEEE* , vol., no., pp.1453-1457, 6-10 Dec. 2010
- [13] E. Oh, B. Krishnamachari, X. Liu, and Z. Niu, "Towards dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure," Accepted to *IEEE*

Commun. Mag., June 2010 (to appear)

- [14] Hamouda, S.; Godlewski, P.; Tabbane, S.; , "Downlink capacity estimation for UMTS network: Impact of users' position, service bit rates and cell radius," *Electronics, Circuits and Systems, 2005. ICECS 2005. 12th IEEE International Conference on* , vol., no., pp.1-4, 11-14 Dec. 2005
- [15] Maciej J. Nawrocki, Mischa Dohler, and A.H. Aghvami, "Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation: Theory and Practice," 2006: WILEY.
- [16] Mahmoud, A.S.H.; , "Downlink Traffic Power Characterization for Multi-Rate Wireless CDMA Data Networks," *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th* , vol., no., pp.1539-1542, Sept. 30 2007-Oct. 3 2007
- [17] Sipila, K.; Honkasalo, K.-C.; Laiho-Steffens, J.; Wacker, A.; , "Estimation of capacity and required transmission power of WCDMA downlink based on a downlink pole equation," *Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st* , vol.2, no., pp.1002-1005 vol.2, 2000
- [18] "Receiver Sensitivity Equation for Spread Spectrum Systems," 2002 Available from: <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/1140>.
- [19] S. Saunders and A. Aragon-Zavala, "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems," 2 ed. 2007: WILEY.
- [20] E. Damosso and L.M. Correia, *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems Communications, COST 231 Final Report*. 1999, Brussels, Belgium.
- [21] Schwengler, T.; Gilbert, M.; , "Propagation models at 5.8 GHz-path loss and building penetration ," *Radio and Wireless Conference, 2000. RAWCON 2000. 2000 IEEE* , vol., no., pp. 119-124, 2000
- [22] Correia, L.M.; , "A view of the COST 231-Bertoni-Ikegami model," *Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on* , vol., no., pp.1681-1685, 23-27 March 2009
- [23] Ericson, "Sustainable energy use in mobile communications," White Paper, 2007.
- [24] Etoh, M.; Ohya, T.; Nakayama, Y.; , "Energy Consumption Issues on Mobile Network Systems," *Applications and the Internet, 2008. SAINT 2008. International Symposium on* , vol., no., pp.365-368, July 28 2008-Aug. 1 2008
- [25] Arnold, O.; Richter, F.; Fettweis, G.; Blume, O.; , "Power consumption modeling of different base station types in heterogeneous cellular networks," *Future Network and Mobile Summit, 2010* , vol., no., pp.1-8, 16-18 June 2010
- [26] Hitroniks. "Free cooling for mobile base stations," Available from: www.hitroniks.com.

- [27] Richter, F.; Fettweis, G.; Gruber, M.; Blume, O.; , "Micro base stations in load constrained cellular mobile radio networks," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium on* , vol., no., pp.357-362, 26-30 Sept. 2010
- [28] Richter, Fred; Fehske, Albrecht J.; Marsch, Patrick; Fettweis, Gerhard P.; , "Traffic Demand and Energy Efficiency in Heterogeneous Cellular Mobile Radio Networks," *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st* , vol., no., pp.1-6, 16-19 May 2010
- [29] Fehske, A.J.; Richter, F.; Fettweis, G.P.; , "Energy Efficiency Improvements through Micro Sites in Cellular Mobile Radio Networks," *GLOBECOM Workshops, 2009 IEEE* , vol., no., pp.1-5, Nov. 30 2009-Dec. 4 2009
- [30] Richter, F.; Fettweis, G.; , "Cellular Mobile Network Densification Utilizing Micro Base Stations," *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.1-6, 23-27 May 2010
- [31] Marsan, M.A.; Chiaraviglio, L.; Ciullo, D.; Meo, M.; , "Optimal Energy Savings in Cellular Access Networks," *Communications Workshops, 2009. ICC Workshops 2009. IEEE International Conference on* , vol., no., pp.1-5, 14-18 June 2009
- [32] Anna Ferrer Bosch, "DYNAMIC BASE STATION ENERGY SAVING WITH RELAYS," UPC – Tsinghua University, July 2010
- [33] "Climate change: Commission welcomes final adoption of Europe's climate and energy package", EC press release Dec. 2008
- [34] "SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age", The Climate Group, GeSI. <http://www.smart2020.orgj>
- [35] M. Pickaret, W. Vereecken, S. Demeyer, P. Audenaert, B. Vermeulen, C. Develder, D. Colle, B. Dhoedt, P. Demeester, Worldwide Energy Needs for ICT: the Rise of Power-Aware Networking, IEEE ANTS 2008 conf., 15-17 December 2008, Bombay (India)
- [36] Global Action Plan, An inefficient truth, <http://globalactionplan.org.uk/>, Global Action Plan Rep., 2007
- [37] <http://green-broadband.blogspot.com/>
- [38] S. Pileri, Energy and communication: engine of the human progress, http://www.ega.it/intelec2007/img/Stefano_Pileri.pdf, Intelec Opening Keynote Speech, 2007
- [39] Y. Hua, Z. Niu, Q. Zhang and Y. Fang, Energy-aware Network Planning for Wireless Cellular Systems with Inter-cell Cooperation
- [40] G. Fettweis and E. Zimmermann, "ICT energy consumption–trends and challenges," in *Proc. of IEEE WPMC*, Lapland,

Finland, Sep. 8-11, 2008.

[41] <http://mobile-telecom-networks.com/>