



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μελέτη ενεργειακής απόδοσης κινητών τερματικών σε
ασύρματο ετερογενές περιβάλλον**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΓΚΑΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων : Μιλτιάδης Ε. Αναγνώστου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μελέτη ενεργειακής απόδοσης κινητών τερματικών σε ασύρματο ετερογενές περιβάλλον

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΓΚΑΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων : Μιλτιάδης Ε. Αναγνώστου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ____^η _____ 2014.

(Υπογραφή)

.....
Μιλτιάδης Ε. Αναγνώστου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Ευστάθιος Δ. Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Μιχαήλ Ε. Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

(Υπογραφή)

.....

ΠΑΓΚΑΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτρης Α. Πάγκαλος, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών πρόσβασης δικτύων, όπως τα ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς, τέταρτης γενιάς, τα δίκτυα WLAN κλπ, σε συνδυασμό με την ραγδαία εξέλιξη των κινητών τηλεφώνων, τα οποία είναι εφοδιασμένα με τις κατάλληλες διεπαφές πρόσβασης στα δίκτυα αυτά, έχουν δώσει τη δυνατότητα στο χρήστη να απολαμβάνει υπηρεσίες IP όπου βρίσκεται και όποτε το επιθυμεί.

Προς το παρόν στις περισσότερες έξυπνες συσκευές η κάθετη μεταπομπή (vertical handover) από το δίκτυο μίας τεχνολογίας σε δίκτυο κάποιας άλλης τεχνολογίας εναπόκειται σε μεγάλο βαθμό στο χρήστη. Στη διπλωματική αυτή εργασία διερευνάται η πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας στα κινητά τηλέφωνα που μπορεί να επιτευχθεί από την αυτοματοποίηση της παραπάνω επιλογής. Κατ' αυτόν τον τρόπο το ίδιο το κινητό τερματικό μπορεί να κινήσει τη διαδικασία μεταπομπής από τη μία τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Technology - RAT) σε κάποια άλλη, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή που εκτελείται και τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον και ως εκ τούτου να επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του.

Η εργασία αυτή επικεντρώθηκε στις ενεργειακά αποδοτικές μεταπομπές μεταξύ δικτύων WLAN, UMTS, HSPA+ και 4G-LTE. Η ραγδαία εξέλιξη και το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G) είναι ο λόγος που επιλέχθηκε το δίκτυο LTE, ενώ τα δίκτυα UMTS, HSPA+ και WLAN επιλέχθηκαν λόγω της ευρείας αποδοχής που τυγχάνουν σήμερα από τους χρήστες των έξυπνων συσκευών. Κατά τη διάρκεια της διατριβής αυτής, μελετήθηκε η ενδεχόμενη εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να προκύψει μέσω των κάθετων μεταπομπών, ανάλογα με την εφαρμογή που εκτελείται στο κινητό τερματικό και το δίκτυο στο οποίο επιλέγεται να συνδεθεί. Προκειμένου να γίνει αυτό χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα HMNToolSuite, στο οποίο ορίσαμε τα χαρακτηριστικά των παραπάνω δικτύων πρόσβασης και τα ενεργειακά μοντέλα ορισμένων εφαρμογών. Συγκεκριμένα τα μοντέλα αυτά προήλθαν από πραγματικές μετρήσεις, που λήφθηκαν μέσω εφαρμογής για κινητά τηλέφωνα λειτουργικού συστήματος Android. Με βάση τις μετρήσεις αυτές προτείναμε για τρεις διαφορετικές υπηρεσίες (VoiceCall, Streaming και FTP Download) ένα μοντέλο πρόβλεψης της κατανάλωσης ενέργειας στο κινητό τηλέφωνο με βάση την ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS του εκάστοτε σημείου ασύρματης πρόσβασης. Στη συνέχεια προσομοιώσαμε με τη βοήθεια του προγράμματος HMNToolSuite την κίνηση ενός χρήστη σε ένα ετερογενές περιβάλλον με διαφορετικά ασύρματα δίκτυα πρόσβασης, ώστε να παρατηρήσουμε ποια είναι η κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με την υπηρεσία που εκτελείται και τις εξωτερικές συνθήκες και πως μπορεί αυτή να βελτιωθεί ανάλογα με την πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής που επιλέγεται. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας. Ωστόσο η πιθανή αυτή εξοικονόμηση ενέργειας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάθε διαφορετικής συσκευής και τις προτεραιότητες του κάθε χρήστη.

Λέξεις Κλειδιά: <<κάθετη μεταπομπή, WLAN, 3G, 4G, UMTS, HSPA+, LTE κατανάλωση ενέργειας, εξοικονόμηση ενέργειας, έξυπνες συσκευές, διάρκεια ζωής μπαταρίας, αλγόριθμοι απόφασης κάθετης μεταπομπής>>

Abstract

The deployment of various wireless technologies recently, such as 3G wireless networks, 4G wireless networks and WLAN, in combination with the evolution of Mobile Terminals with multiple network interfaces, has allowed the user to enjoy access to IP-services anywhere and at anytime.

For the time being the handover between access points of different radio access technologies (vertical handover) is devolved on great extend to the user in most of the smartphones. In this diploma thesis we explore the potential energy savings that can be achieved in smartphones, by automating the choice of the preferred network interface. This way, the mobile terminal itself would be able to trigger vertical handovers from one radio access technology (RAT) to another depending on each particular service and on the environmental conditions, and hence it could extend its battery life.

In this work we have focused in energy efficient vertical handovers between wireless access networks, such as WLAN, UMTS, HSPA+ and 4G-LTE. The rapid growth and increasing interest in fourth generation networks (4G) has been the main reason why LTE has been chosen, while UMTS, HSPA+ and WLAN have been chosen due to the wide acceptance they receive from the smartphone users. During this diploma thesis we studied the potential energy savings that can be attained through vertical handovers depending on the application running in the mobile terminal and the selection of each wireless access network. For that we used the HMNToolSuite program in which we defined the technical aspects of the above mentioned radio access technologies and the energy models of certain applications. These models were derived from actual measurements, obtained by application for Android smartphones. Based on these measurements, we proposed for three different services (VoiceCall, Streaming and FTP Download) a predictive model for the energy consumption in the smartphone based on the received signal strength RSS of each wireless access point. Then we simulated the movement of a user in a heterogeneous wireless environment in order to observe the energy consumption according to the running application and the environmental conditions and to explore how it can be reduced with the selection of the appropriate vertical handover decision policy. The results show that significant energy savings can be achieved. However this potential energy savings is based largely on the specific technical characteristics of each different device and the priorities set by each user.

Keywords: <<vertical handover, WLAN, 3G, 4G, UMTS, HSPA+, LTE, energy consumption, energy savings, smartphones, battery lifetime, vertical handover decision algorithms>>

Περιεχόμενα

Μελέτη ενεργειακής απόδοσης κινητών τερματικών σε ασύρματο ετερογενές περιβάλλον	I
1 Εισαγωγή	9
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	10
1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας	11
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	13
2.1 Εξέλιξη της ασύρματης επικοινωνίας	13
2.1.1 Δίκτυο CDMA	15
2.1.2 Δίκτυο UMTS	16
2.1.3 Δίκτυο WLAN	17
2.1.4 Δίκτυο HSPA+ ή HSPA Evolved	18
2.1.5 Δίκτυο WiMAX	19
2.1.6 Δίκτυο 4G-LTE.....	21
2.2 Επισκόπηση διαδικασίας κάθετης μεταπομπής	22
2.2.1 Διαδικασία κάθετης μεταπομπής	23
2.2.2 Αιτίες εκτέλεσης και τύποι κάθετης μεταπομπής.....	24
2.2.3 Αλγόριθμοι απόφασης κάθετης μεταπομπής	26
2.2.4 Σύγκριση στρατηγικών απόφασης κάθετης μεταπομπής.....	35
2.3 Κινητά τερματικά (Mobile terminals).....	37
3 Κατανάλωση ενέργειας έξυπνων συσκευών.....	39
3.1 Μοντέλα μέτρησης κατανάλωσης ενέργειας στη σύγχρονη βιβλιογραφία ..	40
3.2 Πειραματική Συσκευή.....	43
3.3 Μεθοδολογία μέτρησης της κατανάλωσης ενέργειας.....	44
3.4 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων	49
3.5 Συμπεράσματα πειραματικών μετρήσεων.....	53
4 Περιβάλλον προσομοίωσης	59
4.1 Πρόγραμμα HMNToolSuite.....	60
4.2 Αλγόριθμοι απόφασης κάθετης μεταπομπής	68
4.3 Τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης	74

4.3.1	Πρότυπο UMTS	75
4.3.2	Πρότυπο 802.11 (WLAN)	75
4.3.3	Πρότυπο HSPA+.....	76
4.3.4	Πρότυπο 4G-LTE	77
4.4	Εισαγωγή μετρήσεων στο πρόγραμμα HMNToolSuite.....	78
5	Ανάλυση αποτελεσμάτων	81
5.1	Ανάλυση πρώτου σεναρίου προσομοίωσης.....	81
5.1.1	Κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές εφαρμογές.....	84
5.2	Κατανάλωση ενέργειας αλγορίθμου AUHO για διαφορετικά προφίλ χρήστη.....	87
5.2.1	Σενάριο 1 ^ο	89
5.2.2	Σενάριο 2 ^ο	96
6	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	105
6.1	Συμπεράσματα	105
6.2	Μελλοντική εργασία	107
	Βιβλιογραφία.....	109

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 2-1: ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΥΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ	14
ΕΙΚΟΝΑ 2-2: ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΛΗΨΕΩΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	15
ΕΙΚΟΝΑ 2-3: ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΤΑ ΠΙΟ ΔΙΑΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ [18]	20
ΕΙΚΟΝΑ 2-4: ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΥΡΟΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΤΗΝ Ε.Ε. 2012-2013[19].....	20
ΕΙΚΟΝΑ 2-5: ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΙΕΡΑΡΧΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΗΛΟΤΕΡΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ	31
ΕΙΚΟΝΑ 2-6: CONTEXT AWARE ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ .	34
ΕΙΚΟΝΑ 3-1: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ RSSI ΔΙΚΤΥΩΝ LTE, HSPA+, UMTS ΚΑΙ WLAN ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑ VOICECALL.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 3-2: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ RSSI ΔΙΚΤΥΩΝ LTE, HSPA+, UMTS ΚΑΙ WLAN ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑ STREAMING	51
ΕΙΚΟΝΑ 3-3: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ RSSI ΔΙΚΤΥΩΝ LTE, HSPA+, UMTS ΚΑΙ WLAN ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑ FTP DOWNLOAD	52
ΕΙΚΟΝΑ 3-4: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ LTE ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ STREAMING.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 4-1: NETWORK MAP CREATOR	61
ΕΙΚΟΝΑ 4-2: ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ	61
ΕΙΚΟΝΑ 4-3: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΟ HMNTTOOLSUITE	62
ΕΙΚΟΝΑ 4-4: ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (JITTER)	65
ΕΙΚΟΝΑ 4-5: ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΡΥΘΜΟ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ (THROUGHPUT)	65
ΕΙΚΟΝΑ 4-6: ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ (DELAY)	65
ΕΙΚΟΝΑ 4-7: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ $APAV_Q / APAV_L$ ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ	66
ΕΙΚΟΝΑ 4-8: ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ	67
ΕΙΚΟΝΑ 4-9: : ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ	67
ΕΙΚΟΝΑ 4-10: ΕΠΙΛΟΓΗ ΝΕΑΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΜΕΤΑΠΟΜΠΗΣ ΣΤΟ HMNTTOOLSUITE	69
ΕΙΚΟΝΑ 4-11: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ AUHO	73
ΕΙΚΟΝΑ 4-12: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ HMNTTOOLSUITE	74
ΕΙΚΟΝΑ 5-1: ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 1 - ΠΟΡΕΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΚΟΥ	82
ΕΙΚΟΝΑ 5-2: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [Joule/sec] ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΜΕΤΑΠΟΜΠΗΣ ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ VOICECALL, STREAMING ΚΑΙ FTP ΓΙΑ ΠΡΟΦΙΛ COST&QUALITY	85

ΕΙΚΟΝΑ 5-3: ΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [Joule], ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΘΕΤΩΝ ΜΕΤΑΠΟΜΠΩΝ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΗΣ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ APSV% ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΓΙΑ ΠΡΟΦΙΛ COST&QUALITY	86
ΕΙΚΟΝΑ 5-4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΥΗΟ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ ΧΡΗΣΤΗ	88
ΕΙΚΟΝΑ 5-5: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΥΗΟ ΩΣ ΠΡΟΣ ΧΡΟΝΟ [Joule/sec] ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ ΧΡΗΣΤΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ	90
ΕΙΚΟΝΑ 5-6: ΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [Joule], ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΘΕΤΩΝ ΜΕΤΑΠΟΜΠΩΝ ΚΑΙ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΔΕΙΚΤΗ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΡΗΣΤΗ APSV% ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ ΧΡΗΣΤΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΥΗΟ	91
ΕΙΚΟΝΑ 5-7: ΤΙΜΗ ΔΕΙΚΤΗ $APAV_{RSS}$ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΓΙΑ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΤΟ ΤΕΡΜΑΤΙΚΟ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ STREAMING ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ ΧΡΗΣΤΗ	93
ΕΙΚΟΝΑ 5-8: ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 2 - ΠΟΡΕΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΚΟΥ	96
ΕΙΚΟΝΑ 5-9: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΥΗΟ ΩΣ ΠΡΟΣ ΧΡΟΝΟ [Joule/sec] ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ ΧΡΗΣΤΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ	98
ΕΙΚΟΝΑ 5-10: ΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [Joule], ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΘΕΤΩΝ ΜΕΤΑΠΟΜΠΩΝ ΚΑΙ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΔΕΙΚΤΗ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΡΗΣΤΗ APSV% ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ ΧΡΗΣΤΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΥΗΟ	99

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 4G-LTE (ΕΚΔΟΣΗ 10)	22
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΦΟΥΝ ΤΙΣ ΤΡΕΧΟΥΣΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (CONTEXT) 33	
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΜΕΤΑΠΟΜΠΗΣ [12].....	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΟΙ 5 ΠΙΟ ΔΗΜΟΦΙΛΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ SMARTPHONES	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ [GB] ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΟΝΤΑΙ	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΝΔΕΣΗΣ [ΩΡΕΣ] ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ GALAXY S4 MINI	44
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΑΡΧΕΙΟ UEVENT ΣΤΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ANDROID.....	45
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: LOG ΑΡΧΕΙΟ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑ VOICECALL	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΚΩΔΙΚΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ [52] ...	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΛΟΓΩ ΚΑΘΕΤΗΣ ΜΕΤΑΠΟΜΠΗΣ	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ RATS ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ $APAV_Q$ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ VOICE CALL	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ $APAV_Q$ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ FTP	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ $APAV_L$ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ VOICE CALL.....	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 16: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ $APAV_L$ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ STREAMING.....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 17: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΟΥ UMTS	75
ΠΙΝΑΚΑΣ 18: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΟΥ WLAN	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 19: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΟΥ HSPA+.....	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 20: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΟΥ 4G-LTE.....	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 21: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΕΡΜΑΤΙΚΟΥ ΣΤΟ HMNTTOOLSUITE	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 22: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο)	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 23: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΟΥ ΤΕΡΜΑΤΙΚΟΥ MN1	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 24: ΒΑΡΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ RSS, COST, QUALITY ΚΑΙ LIFETIME ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ ΧΡΗΣΤΗ	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 25: ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΗΣΤΗ APSV ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΜΕΤΑΠΟΜΠΗΣ ($0 \leq APSV \leq 1$)	87
ΠΙΝΑΚΑΣ 26: ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ $APAV_R$ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ AUHO	92
ΠΙΝΑΚΑΣ 27: ΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ BASIC-RSS ΚΑΙ AUHO-R..	94
ΠΙΝΑΚΑΣ 28: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο)	97
ΠΙΝΑΚΑΣ 29: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΟΥ ΤΕΡΜΑΤΙΚΟΥ MN1	97
ΠΙΝΑΚΑΣ 30: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΡΟΦΙΛ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ AUHO ΜΕ BASIC-RSS ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ FTP	103
ΠΙΝΑΚΑΣ 31: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 300ΜΒΥΤΕ.....	106

Πίνακας συντομογραφιών και ακρονημίων

3G	Τρίτη γενιά τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας (3 rd Generation)
3GPP	3 rd Generation Partnership Project
4G	Τέταρτη γενιά τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας
ABC	Always Best Connected
ABS	Always Best Satisfied
AHP	Analytic Hierarchy Process
AP	Access Point
APAV	Access Point Acceptance Value
APSV	Access Point Satisfaction Value
AUHO	AUtonomic HandOver
BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CIR	Carrier to Interference Ratio
FTP	File Transfer Protocol
GRA	Grey Relational Analysis
GRC	Grey Relational Coefficient
GSM	Global System for Mobile
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LTE	Long-Term Evolution
MADM	Multiple Attribute Decision Making
MEW	Multiplicative Exponent Weighting
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PLR	Packet Loss Ratio
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SAW	Simple Additive Weighting
SIR	Signal to Interference Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VHD	Vertical Handover Decision
VHO	Vertical Handover
VoIP	Voice over Internet Protocol
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiBro	Wireless Broadband
Wi-Fi™	Wireless Fidelity, αποτελεί σήμα κατατεθέν της Wi-Fi Alliance και αφορά την τεχνολογία WLAN, η οποία συμμορφώνεται σύμφωνα με το πρότυπο 802.11 της IEEE.
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

1

Εισαγωγή

Λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των ασύρματων δικτύων πρόσβασης και της τάσης των χρηστών να επιδιώκουν την «πάντοτε καλύτερη σύνδεση» (Always Best Connected) [1] είναι αρκετά σύνηθες φαινόμενο να υπάρχουν σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία παραπάνω από μία διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Technology - RATs). Για παράδειγμα σε μία μεγάλη πόλη, όπως η Αθήνα, υπάρχει μεγαλύτερη από 97% και 46% πληθυσμιακή κάλυψη 3G και 4G αντίστοιχα [2], καθώς και εκατοντάδες σημεία σύνδεσης σε δίκτυα Wi-Fi. Από την άλλη πλευρά πρόσφατες έρευνες υποδεικνύουν ότι επτά χρόνια μετά από τότε που η Apple λάνσαρε το iPhone, δημιουργώντας έτσι μια νέα αγορά, το πλήθος των έξυπνων συσκευών ξεπέρασε το ένα δισεκατομμύριο παγκόσμιως και εκτιμάται να ξεπεράσει το 1,4 δις μέχρι το 2016 [3]. Από αυτά το 89% χρησιμοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας. Τα έξυπνα κινητά μεταφέρουν κατά μέσο όρο περισσότερα από 450 Mbytes το μήνα είτε μέσω κυψελωτών δικτύων, όπως τα δίκτυα 3G, 4G-LTE και WiMAX είτε μέσω δικτύων WLAN. Σήμερα όλα τα έξυπνα κινητά προσφέρουν τη δυνατότητα σύνδεσης σε τουλάχιστον δύο διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, ειδικά σε δίκτυα όπως είναι τα UMTS, HSPA, 4G-LTE και WLAN, αλλά και σε λιγότερο διαδεδομένα στην χώρα μας, όπως είναι το WiMAX.

Μέχρι πρόσφατα η απόφαση για κάθετη μεταπομπή (vertical handover) από το δίκτυο μίας τεχνολογίας σε δίκτυο κάποιας άλλης τεχνολογίας επαφίετο αποκλειστικά στο χρήστη. Ο χρήστης έπρεπε δηλαδή να αποφασίσει και να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει χειροκίνητα στη συσκευή του τις διεπαφές για το εκάστοτε ασύρματο δίκτυο στο οποίο επιθυμούσε να συνδεθεί. Συνεπώς ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνει ο χρήστης τις παραπάνω αποφάσεις επηρεάζει σημαντικά τη

συμπεριφορά του κινητού τερματικού σε ότι αφορά την κατανάλωση μπαταρίας και τη ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service). Το γεγονός αυτό δεν πέρασε απαρατήρητο από τη βιομηχανία κινητής τηλεφωνίας με αποτέλεσμα να έχουν χρηματοδοτηθεί σημαντικές έρευνες στην περιοχή αυτή τα τελευταία χρόνια. Πληθώρα μελετών έχει δημοσιευθεί από διάφορα πανεπιστήμια παγκοσμίως που περιγράφουν πώς οι κάθετες μεταπομπές μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης μπορούν να επιμηκύνουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών [4], να χρησιμοποιηθούν για την εξισορρόπηση του φορτίου των δικτύων [5] ή να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των κινητών τερματικών [6]. Το αντικείμενο αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον κυρίως για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G-LTE, WiMAX) στην κινητή τηλεφωνία, καθώς σε αυτά ενσωματώνονται διαφορετικές αρχιτεκτονικές με αποτέλεσμα να συγκεντρώνουν χαρακτηριστικά από διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Networks - RANs).

Κατά τη διάρκεια της διπλωματικής αυτής εργασίας θα αναλυθούν σε βάθος οι λεπτομέρειες που σχετίζονται με τα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης και ιδιαίτερα η διαδικασία κάθετης μεταπομπής από το ένα δίκτυο στο άλλο. Θα μελετηθούν επίσης διαφορετικές πολιτικές απόφασης κάθετης μεταπομπής και θα αξιολογηθούν αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας, που αποφέρουν στην πλευρά του κινητού τερματικού. Για την αξιολόγηση αυτή πήραμε αρχικά πραγματικές μετρήσεις μέσω εφαρμογής Android, με τις οποίες εξετάσαμε τη συμπεριφορά διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης ως προς την κατανάλωση ενέργειας που αποφέρουν στο κινητό τηλέφωνο, όταν εκτελούνται διαφορετικές υπηρεσίες. Στη συνέχεια εισήγαμε τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις αυτές στο πρόγραμμα HMNToolSuite, στο οποίο προσομοιώσαμε ένα ετερογενές ασύρματο περιβάλλον. Με βάση τις προσομοιώσεις αυτές διερευνήσαμε εν τέλει την εξοικονόμηση ενέργειας και ως εκ τούτου την επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας του κινητού τερματικού, που μπορεί να επιτευχθεί μέσω της επιλογής του κατάλληλου αλγορίθμου απόφασης κάθετης μεταπομπής (Vertical Handover Decision Algorithms).

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η γρήγορη ανάπτυξη και απότομη εξέλιξη των δικτύων τρίτης (UMTS, HSPA+) και τέταρτης γενιάς (4G-LTE, WiMAX) στην κινητή τηλεφωνία είναι ο λόγος που η διπλωματική αυτή εργασία εστιάζει στις κάθετες μεταπομπές μεταξύ των δικτύων αυτών και των διεπαφών του προτύπου IEEE 802.11 (Wi-Fi), το οποίο συγκεντρώνει και τη μεγαλύτερη προτίμηση από πλευρά χρηστών σήμερα. Υπάρχει επίσης και ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον από την πλευρά των διαχειριστών του δικτύου 4G-LTE για το πώς μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα δίκτυα Wi-Fi προς όφελος τους.

Είναι γνωστό ότι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των κινητών τηλεφώνων αποτελεί σήμερα μία από τις σημαντικότερες ανησυχίες των χρηστών με αποτέλεσμα να έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες τα τελευταία χρόνια σχετικά με την μεγιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας των κινητών τηλεφώνων [7]-[9]. Η εργασία αυτή ακολουθώντας την παραπάνω τάση εστιάζει επίσης στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κινητά τερματικά και αξιολογεί ορισμένους αλγόριθμους απόφασης κάθετης μεταπομπής ως προς την κατανάλωση ενέργειας που αποφέρουν στα τερματικά έτσι ώστε να διερευνηθεί το πώς μπορούν να συνεισφέρουν στην επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας αυτών.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Μετά την εισαγωγή και την διατύπωση του σκοπού θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια περιληπτικά τα στάδια εκτέλεσης της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, όπως θα παρατηρήσουμε, η υπόλοιπη διπλωματική εργασία διαχωρίζεται στα εξής πέντε κεφάλαια: Θεωρητικό υπόβαθρο, Κατανάλωση ενέργειας έξυπνων συσκευών, Περιβάλλον προσομοίωσης, Ανάλυση αποτελεσμάτων και τέλος Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.

Το δεύτερο κεφάλαιο, το οποίο τιτλοφορείται ως Θεωρητικό υπόβαθρο, αποτελεί μια εκτενή μελέτη βιβλιογραφίας, η οποία καλύπτει ένα ευρύ φάσμα της διαδικασίας κάθετης μεταπομπής και των χαρακτηριστικών των διαφορετικών RATs. Σκοπός του είναι να εξοικιώσει τον αναγνώστη με τις βασικές έννοιες του θέματος, οι οποίες είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη της διπλωματικής αυτής εργασίας. Αρχικά υπάρχει μια ανασκόπηση σχετικά με την εξέλιξη των ασύρματων δικτύων πρόσβασης. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε μια λεπτομερή περιγραφή της λειτουργίας των ασύρματων δικτύων που θα εξετάσουμε και των διαφορετικών στρατηγικών απόφασης κάθετης μεταπομπής που υπάρχουν στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Τέλος διατυπώνουμε μία σύγκριση των παραπάνω στρατηγικών και ορισμένα στατιστικά στοιχεία για τη λειτουργία των κινητών τερματικών.

Το τρίτο κεφάλαιο έχει τίτλο Κατανάλωση ενέργειας έξυπνων συσκευών. Στο κεφάλαιο αυτό ανατρέχουμε αρχικά στη σύγχρονη βιβλιογραφία και παραθέτουμε ορισμένες μεθόδους που έχουν διατυπωθεί όσον αφορά την πρόβλεψη και τη μέτρηση της κατανάλωσης ισχύος σε ένα κινητό τερματικό, όταν συνδέεται σε διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης. Στη συνέχεια καταγράφουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας. Με βάση τις μετρήσεις αυτές προτείνουμε στη συνέχεια ένα νέο μοντέλο πρόβλεψης της κατανάλωσης ισχύος της μπαταρίας του κινητού με βάση την ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS του ασύρματου δικτύου στο οποίο συνδέεται το κινητό. Τέλος

αναλύουμε υπό το πρίσμα της κατανάλωσης ισχύος, τη συμπεριφορά των τεσσάρων διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (WLAN, UMTS, HSPA+ και LTE) για τις τρεις υπηρεσίες (VoiceCall, Streaming, FTP Download) που εξετάσαμε στη διπλωματική αυτή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο με τίτλο Περιβάλλον προσομοίωσης παρουσιάζουμε τα εργαλεία που χρησιμοποιήσαμε ώστε να μελετήσουμε την κατανάλωση ισχύος που αποφέρουν διαφορετικοί αλγόριθμοι κάθετης μεταπομπής στο τερματικό. Αρχικά αναλύουμε τη λειτουργία του προγράμματος HMNToolSuite, το οποίο χρησιμοποιήσαμε για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τους διαφορετικούς αλγόριθμους κάθετης μεταπομπής και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (RATs), τα οποία εξετάσαμε στις προσομοιώσεις. Τέλος διατυπώνουμε τον τρόπο με τον οποίο επιλέξαμε να μετρήσουμε την κατανάλωση ισχύος από τη πλευρά του τερματικού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, όπως υποδηλώνει και ο τίτλος του, πραγματοποιούμε την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις. Αρχικά αναλύουμε τα σενάρια που υλοποιήσαμε, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα δεδομένα που λάβαμε από τις προσομοιώσεις σχετικά με την κατανάλωση ισχύος στην πλευρά του τερματικού λόγω των διαφορετικών αλγορίθμων απόφασης κάθετης μεταπομπής και καταγράφουμε ορισμένα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά αυτών.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο, με τίτλο Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία, παραθέτουμε αρχικά συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διπλωματική αυτή εργασία και στη συνέχεια αναφέρουμε τη μελλοντική εργασία που μπορεί να αναπτυχθεί με βάση αυτή. Συγκεκριμένα αναφέρουμε τις βελτιώσεις που μπορεί να επιτευχθούν στις προσομοιώσεις και στις θεωρητικές υποθέσεις που πραγματοποιήσαμε αλλά και στην υλοποίηση των αλγορίθμων κάθετης μεταπομπής που εξετάσαμε, έτσι ώστε να προσεγγίσουν οι προσομοιώσεις σε μεγαλύτερο βαθμό τις πραγματικές συνθήκες και να είναι δυνατόν να εξαχθούν πιο ακριβή και ασφαλή συμπεράσματα.

2

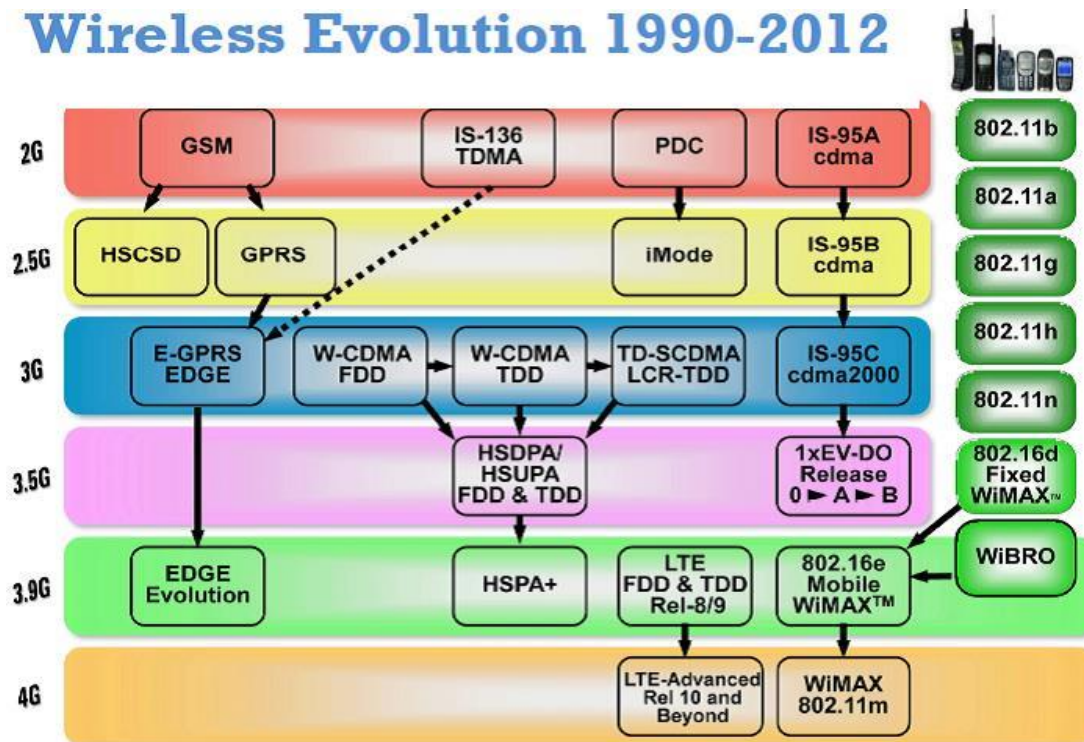
Θεωρητικό υπόβαθρο

Στις παρακάτω υποενότητες παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή καθώς και λεπτομέρειες για τα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης, τα κινητά τερματικά και τις διάφορες μεθόδους κάθετης μεταπομπής που υπάρχουν στη σημερινή βιβλιογραφία ώστε να αποκτήσει ο αναγνώστης όσο το δυνατόν καλύτερη κατανόηση επί του θέματος.

2.1 Εξέλιξη της ασύρματης επικοινωνίας

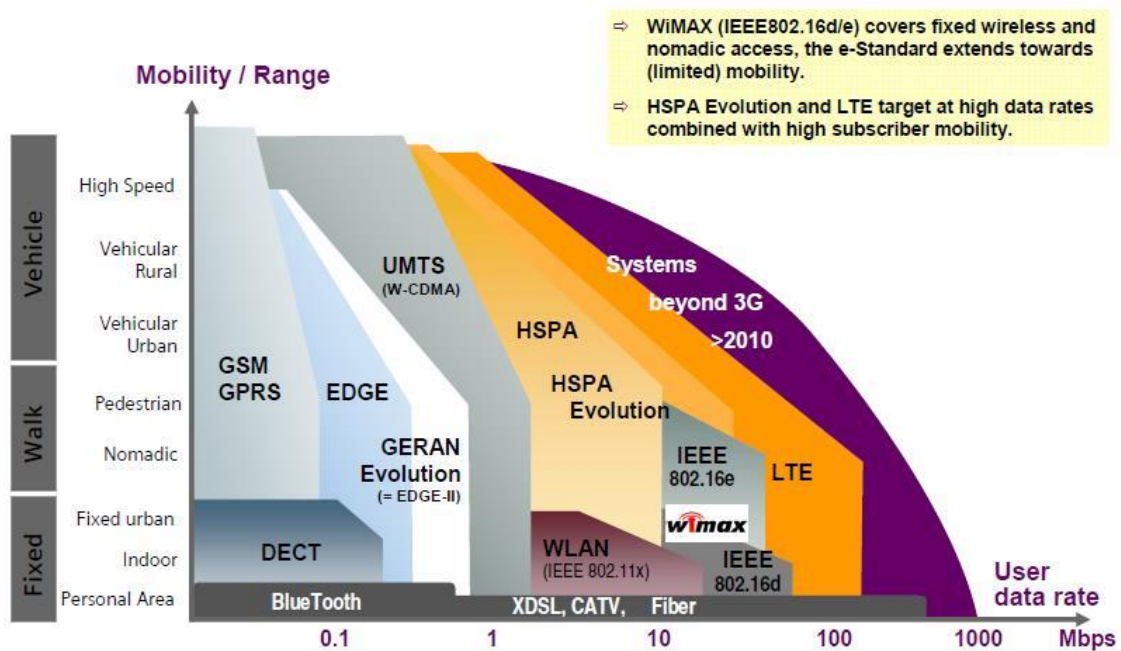
Τη δεκαετία του 1980, καθώς η κινητή τηλεφωνία εξελισσόταν με γρήγορους ρυθμούς ήδη από την προηγούμενη δεκαετία, τα κυψελωτά ασύρματα δίκτυα επιχειρούσαν τα πρώτα τους βήματα. Η ασύρματη επικοινωνία μετά την πρωτοφανή απήχηση που είχε στον κόσμο τα πρώτα χρόνια, πραγματοποιήσε σε σύντομο χρονικό διάστημα αλματώδη εξέλιξη και μέσα σε τρεις δεκαετίες κατάφερε να εξελίξει τα απλά δίκτυα πρώτης γενιάς σε ισχυρά ασύρματα δίκτυα τέταρτης γενιάς. Στην Εικόνα 2-1 στην επόμενη σελίδα παρακολουθούμε μία γραφική απεικόνιση της εξέλιξης αυτής [10].

Wireless Evolution 1990-2012



Εικόνα 2-1: Ιστορική εξέλιξη των ασύρματων δικτύων τηλεπικοινωνίας

Σχετικά με την ιστορική εξέλιξη των ασύρματων δικτύων τηλεπικοινωνίας, παρατηρούμε ότι το πέρασμα από τα δίκτυα πρώτης γενιάς στα δίκτυα δεύτερης γενιάς σηματοδότησε η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή μετάδοση, η οποία προσέφερε πλέον καλύτερες υπηρεσίες δεδομένων και πιο αποτελεσματική χρήση του ραδιοφάσματος [11]. Η εμπορική επιτυχία των ασύρματων δικτύων δεύτερης γενιάς ώθησε τις εταιρίες τηλεπικοινωνιών να ανακαλύψουν νέους τρόπους, ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των χρηστών για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Η ώθηση αυτή είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία και νέων εφαρμογών, όπως η ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο και οι βιντεοκλήσεις, οι οποίες βασίστηκαν με τη σειρά τους στα νέα ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς που αναπτύχθηκαν με τη μετάβαση στη νέα χιλιετία. Φτάνοντας πλέον στο σήμερα και στην παγκόσμια εξάπλωση του διαδικτύου, οι τηλεπικοινωνίες καλούνται να προσφέρουν στους χρήστες ασύλληπτες για τα παλιά δεδομένα ταχύτητες μετάδοσης και να ικανοποιήσουν τη συνθήκη τόσο της «πάντοτε βέλτιστης σύνδεσης» (Always Best Connected - ABC) [1], όσο και μια νέα τάση για «πάντοτε βέλτιστη ικανοποίηση» (Always Best Satisfied – ABS) [12] αναφορικά με τις υπηρεσίες που προσφέρουν. Σε αυτή την μεταβατική περίοδο οι τηλεπικοινωνίες τείνουν να αντικαταστήσουν τα παλιά ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς με νέα δίκτυα τέταρτης γενιάς, όπως το 4G-LTE και το WiMAX, τα οποία υπόσχονται απρόσκοπτη επικοινωνία και ευρυζωνική σύνδεση στο διαδίκτυο με υποστήριξη μεταφοράς δεδομένων, φωτογραφιών και βίντεο τόσο σε πραγματικό όσο και σε μη πραγματικό χρόνο. Στην Εικόνα 2-2 παρατηρούμε την εξέλιξη στα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης σχετικά με τον ρυθμό μετάδοσης που προσφέρουν [13].



Εικόνα 2-2: Εξέλιξη των ασύρματων δικτύων πρόσβασης ως προς την ταχύτητα λήψης δεδομένων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξετάσουμε κυψελωτά δίκτυα τρίτης αλλά και τέταρτης γενιάς, όπως το 4G-LTE, που αποτελεί το μέλλον στις τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης στην κινητή τηλεφωνία αλλά και το πρότυπο 802.11 (WLAN), το οποίο τυγχάνει σήμερα της μεγαλύτερης αποδοχής από πλευράς χρηστών.

2.1.1 Δίκτυο CDMA

Το πρωτόκολλο CDMA είναι μια μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης καναλιού, η οποία αναπτύχθηκε ως ανταγωνιστικό πρότυπο προς τα D-AMPS και GSM. Τα πρότυπα αυτά ήταν αρκετά συμβατικά καθώς και τα δύο χρησιμοποιούν FDM και TDM για την υποδιαίρεση του φάσματος σε κανάλια και των καναλιών σε χρονικές υποδοχές. Η Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Κώδικα CDMA (Code Division Multiple Access) λειτουργεί εντελώς διαφορετικά και παρόλο που στην αρχή υποστηρίχθηκε μόνο από μία εταιρία (την Qualcomm), η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σήμερα από διάφορες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας και θεωρείται η βάση για τα κινητά συστήματα τρίτης γενιάς. Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να μοιράζονται το ίδιο εύρος συχνοτήτων. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό χωρίς παρεμβολές στα σήματα των χρηστών το πρότυπο CDMA χρησιμοποιεί την τεχνική εξάπλωσης του φάσματος συχνοτήτων και ένα ειδικό σύστημα κωδικοποίησης. Τα συστήματα CDMA περιορίζονται ωστόσο από τις παρεμβολές και η επίδοση της ασύρματης ζεύξης εξαρτάται από την ικανότητα του δέκτη να αποδιαμορφώσει ένα σήμα παρουσία παρεμβολής. Το κύριο σχεδιαστικό

θέμα στα δίκτυα CDMA είναι η ελαχιστοποίηση της παρεμβολής πολλαπλής πρόσβασης και ο ρόλος του ελέγχου ισχύος για τον περιορισμό της παρεμβολής αυτής είναι καθοριστικός [14].

Η τεχνολογία CDMA έχει εξελιχθεί πλέον σε μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα τηλεπικοινωνιών. Αυτό αντικατοπτρίζεται και από το γεγονός ότι σχεδόν όλα τα πρότυπα τρίτης γενιάς (3G standards) βασίζονται σε τεχνολογίες CDMA. Οι τεχνικές εξάπλωσης φάσματος παρέχουν έναν τρόπο επέκτασης του φάσματος των μεταδιδόμενων σημάτων, έτσι ώστε αυτά να αποκτήσουν κάποια πλεονεκτήματα, που είναι μάλλον αδύνατον να αποκτηθούν διατηρώντας το συγκεκριμένο αρχικό φάσμα των μεταδιδόμενων σημάτων. Με την εξάπλωση φάσματος μπορούν επίσης να επιτευχθούν και άλλα σημαντικά οφέλη, όπως για παράδειγμα η δυνατότητα να μοιράζονται πολλοί χρήστες το ίδιο τηλεπικοινωνιακό μέσο ταυτόχρονα, τόσο στο χρόνο όσο και στη συχνότητα, χωρίς να εισάγεται σημαντική παρεμβολή μεταξύ τους. Τα κύρια χαρακτηριστικά της τεχνολογίας CDMA είναι τα ακόλουθα:

- Δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης.
- Προστασία από παρεμβολές λόγω πολλαπλών διαδρομών (multipath interference).
- Προστασία πληροφορίας (Privacy).
- Απόρριψη παρεμβολών.
- Προστασία έναντι κακόβουλων παρεμβολών (jamming).
- Μικρή πιθανότητα υποκλοπών (interception).
- Δυνατότητα συνύπαρξης με τα υπάρχοντα ραδιο-συστήματα.
- Μικρή εκπεμπόμενη ισχύς (σημαντικό για λόγους υγείας).

2.1.2 Δίκτυο UMTS

Τα συστήματα κινητών επικοινωνιών δεύτερης γενιάς, είχαν υλοποιηθεί ώστε να παρέχουν στους χρήστες φωνητικές υπηρεσίες. Στα χρόνια που ακολούθησαν, παρόλο που ενσωματώθηκαν διάφορες νέες υπηρεσίες δεδομένων, έγινε φανερό ότι τα δίκτυα αυτά δε μπορούσαν πλέον να προσφέρουν περισσότερες εφαρμογές. Η ανάγκη για εξέλιξη όσον αφορά στη χωρητικότητα, τη ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και την προσφορά νέων υπηρεσιών, έδωσε ώθηση στην υλοποίηση των συστημάτων τρίτης γενιάς. Η ύπαρξη μίας μόνο τεχνολογίας θα έκανε πολύ απλούστερη τη ζωή των επιχειρήσεων δικτύου και θα ενθάρρυνε περισσότερο κόσμο να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες αυτές.

Έγιναν πολλές προτάσεις, και μετά από κάποια διαλογή, καταλήξαν σε δύο κύριες λύσεις. Η πρώτη, η CDMA Ευρείας Ζώνης ή W-CDMA (Wideband CDMA) προτάθηκε από την Ericsson. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί εξάπλωση φάσματος άμεσης ακολουθίας, δουλεύει σε εύρος ζώνης 5Mhz και έχει σχεδιαστεί να

συνεργάζεται με δίκτυα GSM, αν και δεν είναι συμβατό προς τα πίσω με το GSM. Έχει όμως την ιδιότητα ότι ένας χρήστης μπορεί να βγει από μια κυψέλη W-CDMA και να μπει σε μια κυψέλη GSM χωρίς να χαθεί η κλήση του. Αυτό το σύστημα προωθήθηκε έντονα από την Ευρωπαϊκή Ένωση, η οποία το ονόμασε Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών ή UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Το αναταγωνιστικό πρότυπο ήταν το CDMA2000, που προτάθηκε από την Qualcomm. Και αυτό ακολουθεί σχεδίαση εξάπλωσης φάσματος άμεσης ακολουθίας, δεν έχει σχεδιαστεί όμως να συνεργάζεται με το GSM και δεν μπορεί να μεταβιβάζει κλήσεις σε μια κυψέλη GSM. Το σύστημα αυτό υποστηρίχθηκε αντίστοιχα από τις Η.Π.Α, οι οποίες ήθελαν ένα σύστημα το οποίο να είναι συμβατό με το σύστημα που να ήταν ήδη ευρέως διαδεδομένο στις Η.Π.Α (το IS-95) [15].

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του UMTS δικτύου ξεχωρίζουμε τους αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων και την ταυτόχρονη υποστήριξη μεγαλύτερου όγκου δεδομένων και φωνής. Πιο συγκεκριμένα, το UMTS δίκτυο στην αρχική του φάση, προσέφερε θεωρητικά ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 384 kbps σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται αυξημένη κινητικότητα του χρήστη. Αντίθετα, όταν ο χρήστης παραμένει ακίνητος οι ρυθμοί μετάδοσης αυξάνουν κατά πολύ φθάνοντας την τιμή των 2 Mbps. Σήμερα έχει υπάρξει περαιτέρω αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, ενώ παράλληλα ο οργανισμός 3GPP έχει θέσει σαν standard νέες τεχνολογίες, όπως το HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), το HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) και το HSPA+ (Evolved High-Speed Packet Access), οι οποίες αποτελούν ουσιαστικά εξέλιξη του UMTS.

2.1.3 Δίκτυο WLAN

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN είναι μια οικογένεια προτύπων του οργανισμού IEEE που αναπτύχθηκαν με σκοπό να επεκτείνουν στην ασύρματη περιοχή το πρωτόκολλο 802.3 (Ethernet), το οποίο αποτελεί το συνηθέστερο πρωτόκολλο ενσύρματης δικτύωσης υπολογιστών. Ο όρος Wi-Fi (Wireless Fidelity) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις συσκευές που βασίζονται στην προδιαγραφή IEEE 802.11 b/g/n και εκπέμπουν σε συχνότητες 2,4 και 5 GHz. Ωστόσο έχει επικρατήσει και ως όρος αναφερόμενος συνολικά στα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN. Κάθε συσκευή που χρησιμοποιεί το πρότυπο Wi-Fi μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα σημείο πρόσβασης ασύρματου δικτύου (Access Point - AP) ώστε να αποκτήσει πρόσβαση σε κάποιο πόρο του δικτύου, όπως είναι το διαδίκτυο. Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι επιτραπέζιοι ή φορητοί υπολογιστές, έξυπνες συσκευές αλλά ακόμη και τηλεοράσεις, φωτογραφικές μηχανές και συσκευές αναπαραγωγής μουσικής. Υπάρχουν πέντε διαδεδομένοι τύποι δικτύου WLAN που έχουν σχεδιαστεί τα τελευταία χρόνια: 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n και 802.11ac, κάθε ένας από τους οποίους λειτουργεί σε διαφορετικό εύρος συχνότητας και προσφέρει διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων [11].

- Το πρότυπο 802.11a (1999) λειτουργεί σε συχνότητες με εύρος ζώνης 5 GHz και προσφέρει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων έως 54 Mbps.
- Αντίστοιχα το πρότυπο 802.11b (1999) λειτουργεί σε συχνότητες με εύρος ζώνης 2,4 GHz και προσφέρει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων έως 11 Mbps.
- Το πρότυπο 802.11g (2003) μεταφέρει δεδομένα σε συχνότητες με εύρος ζώνης 2,4 GHz και προσφέρει ταχύτητες μετάδοσης έως 54 Mbps.
- Το πρότυπο 802.11n (2009) μπορεί να μεταφέρει δεδομένα μέχρι και με ταχύτητες 150 Mbps σε συχνότητες με εύρος ζώνης 2,4 GHz αλλά και 5 GHz.
- Τέλος το πρότυπο 802.11ac (2012) λειτουργεί αποκλειστικά σε συχνότητες με εύρος ζώνης 5 GHz και προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που ξεπερνούν τα 850 Mbps.

Στο περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιήσαμε τις προσομοιώσεις θεωρήσαμε δίκτυα WLAN τύπου 802.11n.

2.1.4 Δίκτυο HSPA+ ή HSPA Evolved

Το πρότυπο HSPA+ ή Evolved High-Speed Packet Access είναι ένα τεχνικό πρότυπο για ασύρματη, ευρυζωνική πρόσβαση. Το HSPA+ ενισχύει το ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο τρίτης γενιάς WCDMA (UMTS) προσφέροντας υψηλότερες ταχύτητες στον τελικό χρήστη, που είναι συγκρίσιμες με αυτές του νεότερου δικτύου τέταρτης γενιάς LTE (Long Term Evolution). Το HSPA+ ορίστηκε για πρώτη φορά από τον οργανισμό 3GPP ως τεχνικό πρότυπο στην έκδοση 7 με σκοπό να επεκταθεί περαιτέρω σε μεταγενέστερες εκδόσεις. Η τυποποίηση συνεχίστηκε μέχρι την έκδοση 10, στην οποία το HSPA+ εφαρμόζει κάποιες από τις τεχνικές που αναπτύχθηκαν για το LTE. Μερικές προβλέψεις υπολογίζουν ότι το πρότυπο HSPA θα έχει πάνω από 3,5 δισεκατομμύρια συνδρομητές μέχρι το τέλος του 2016, καθώς υπάρχουν μέχρι σήμερα 478 εμπορικές αναπτύξεις του HSPA σε 181 χώρες, συμπεριλαμβανομένων 240 δικτύων HSPA+ [16].

Το πρότυπο HSPA+ προσφέρει βελτιωμένη υποστήριξη και απόδοση σε διαδραστικές υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπως το Push-to-talk over Cellular (PoC), η κοινή χρήση εικόνων και βίντεο και οι υπηρεσίες βίντεο και φωνής μέσω πρωτοκόλλου Internet (VoIP), μέσω της εισαγωγής χαρακτηριστικών όπως οι κεραίες MIMO (Multiple Input - Multiple-Output), η Συνεχής Συνδεσιμότητα Πακέτων CPC (Continuous Packet Connectivity) και η διαμόρφωση ανώτερης τάξης (High Order Modulation). Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του HSPA+ περιλαμβάνουν τα εξής:

- Το HSPA+ αποτελεί στην ουσία μια απλή αναβάθμιση των δικτύων HSPA προστατεύοντας έτσι την επένδυση σε εγκαταστάσεις που έχει κάνει ο κάθε φορέας εκμετάλλευσης του δικτύου. Είναι επίσης συμβατό προς τα πίσω με το δίκτυο UMTS.
- Το HSPA+ αυξάνει σημαντικά την χωρητικότητα του HSPA και μειώνει τη χρονική υστέρηση (latency) κάτω από 50msec.
- Η πρώτη υλοποίηση του HSPA+ με 64 QAM έχει ήδη αναπτυχθεί εμπορικά και παρέχει μέγιστη θεωρητική ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων στη λήψη 21Mbps. Η ταχύτητα αυτή μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω με την χρήση κεραιών 2X2 MIMO αποδίδοντας θεωρητικές ταχύτητες έως 42Mbps στην λήψη και 11,5Mbps στην αποστολή δεδομένων.
- Το HSPA+ υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής και δεδομένων για τον ίδιο φορέα για όλο το εύρος του διαθέσιμου ραδιοφάσματος και μπορεί να προσφέρει τις υπηρεσίες αυτές ταυτόχρονα σε πολλούς χρήστες.

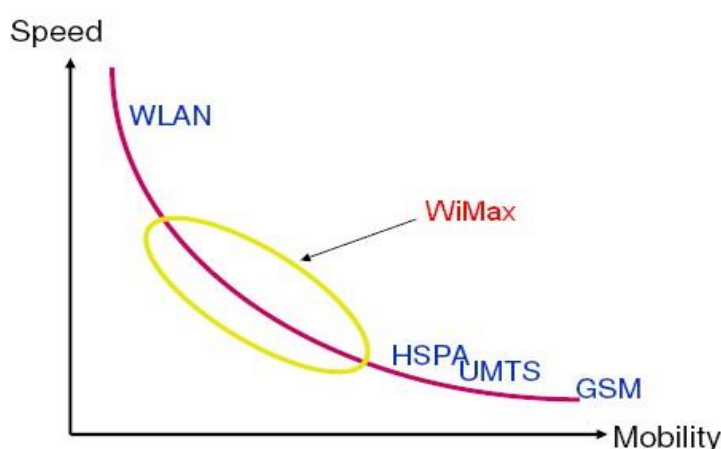
Το HSPA+ αποτελεί, όπως είδαμε, μια προσιτή και σταδιακή αναβάθμιση των υφιστάμενων δικτύων HSPA. Παρέχει έτσι ένα τεράστιο πλεονέκτημα για τους φορείς του δικτύου HSPA απέναντι στους φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου CDMA, οι οποίοι αδυνατούν ήδη να ανταγωνιστούν τις υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων του δικτύου HSPA και δεν έχουν να παρουσιάσουν στο μέλλον καμία εμπορικά βιώσιμη εξέλιξη των δικτύων EV-DO, που εκμεταλλεύονται σήμερα. Ο συνδυασμός αυτός απόδοσης και κόστους έχει οδηγήσει αρκετούς φορείς HSPA σήμερα, στο να χρησιμοποιούν το HSPA+ μαζί με 4G-LTE.

2.1.5 Δίκτυο WiMAX

Το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) είναι το εμπορικό όνομα που αναφέρεται σε κάθε σύστημα και εφαρμογή που χρησιμοποιεί το πρότυπο 802.16 της IEEE στη λειτουργία του. Το πρότυπο υιοθετήθηκε από την IEEE το 2003 για να καλύψει τις απαιτήσεις των χρηστών για ασύρματη πρόσβαση ευρείας ζώνης.

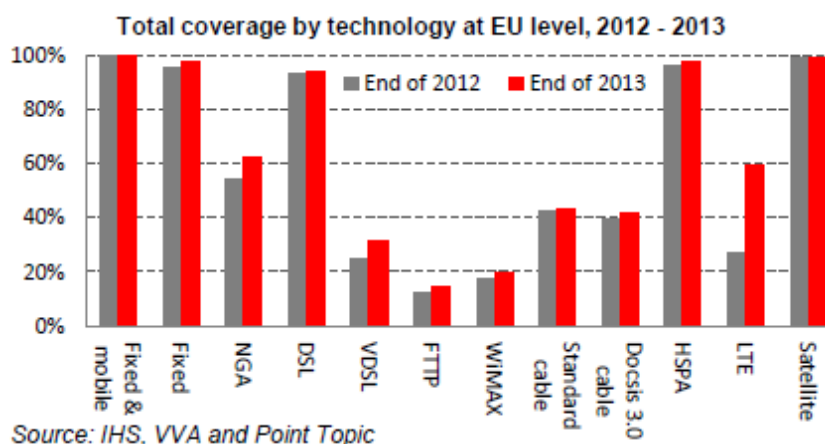
Το πρωτόκολλο WiMAX, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ασύρματα δίκτυα, επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων σε πολλαπλά φάσματα συχνότητας, μεγιστοποιώντας έτσι τη δυνατότητα μετάδοσης πέρα από τις συχνότητες των άλλων ασύρματων εφαρμογών [17]. Βασικός στόχος στον σχεδιασμό του WiMAX και ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά του, είναι η παροχή υπηρεσιών ευρυζωνικής πρόσβασης στο διαδίκτυο σε τελικούς χρήστες, με εξοπλισμό ιδιαίτερα εύκολο στην εγκατάστασή του. Με τον ίδιο τρόπο που μέχρι σήμερα εγκαθιστούσε κανείς στον υπολογιστή του μια κάρτα δικτύωσης WLAN, μπορεί να εγκαθιστά τώρα και μια κάρτα WiMAX, η οποία θα του επιτρέψει να χρησιμοποιήσει από τον οικιακό του χώρο, και όχι μόνο, τις ασύρματες υπηρεσίες που παρέχουν οι πάροχοι του δικτύου WiMAX. Το WiMAX λειτουργεί στην ουσία με παρεμφερή τρόπο με το Wi-Fi,

ωστόσο προσφέρει πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια. Συγκεκριμένα, ενώ το Wi-Fi εξασφαλίζει εμβέλεια επικοινωνίας μέχρι 100 μέτρα, το WiMax φθάνει τα 35 χιλιόμετρα ή και παραπάνω. Στην Ελλάδα άρχισε να λειτουργεί πιλοτικά δίκτυο WiMAX το Σεπτέμβριο του 2008 με δοκιμαστική εκπομπή στο Άγιο Όρος και ακολούθησε το εργαστήριο Ερευνάς και Ανάπτυξης τηλεπικοινωνιακών συστημάτων (PASIPHAΕ) τον Οκτώβριο του 2008 με δοκιμαστική πιλοτική εκπομπή για ερευνητικές - εκπαιδευτικές δραστηριότητες στο Ηρακλείο Κρήτης [18]. Στην Εικόνα 2-3 έχει σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της ταχύτητας ως προς την κίνηση των χρηστών για μερικά από τα πιο διαδεδομένα ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Από την εικόνα αυτή παρατηρούμε ότι το πρότυπο WiMAX αναπτύχθηκε για να καλύψει ένα σημαντικό κενό προσφέροντας υψηλές ταχύτητες σύνδεσης σε χρήστες, που απαιτούν ταυτόχρονα μεγάλο εύρος κάλυψης.



Εικόνα 2-3: Καμπύλη ταχύτητας ως προς κινητικότητα για τα πιο διαδεδομένα ασύρματα δίκτυα [18]

Κύριος αντίπαλος του προτύπου WiMAX είναι το πρότυπο 4G-LTE, που αναπτύχθηκε από τον οργανισμό 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Όπως βλέπουμε όμως από την παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2-4), το δίκτυο 4G-LTE έχει ξεπεράσει κατά πολύ πλέον το δίκτυο WiMAX στην Ευρώπη όσον αφορά το εύρος κάλυψης που προσφέρουν.



Εικόνα 2-4: Συνολικό εύρος κάλυψης διαφορετικών τεχνολογιών στην Ε.Ε. 2012-2013[19]

2.1.6 Δίκτυο 4G-LTE

Τα δίκτυα LTE (Long Term Evolution) αποτελούν ένα πρότυπο για ασύρματη επικοινωνία, το οποίο αναπτύχθηκε από τον οργανισμό 3GPP (3rd Generation Partnership Project) και τεκμηριώνεται στις εκδόσεις 8 και 10 της 3GPP, όπως θα δούμε παρακάτω [20]. Αποτελεί εξέλιξη των ασύρματων δικτύων GSM (Global System for Mobile) και UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) προς ένα δίκτυο ευρείας ζώνης με αυξημένη χωρητικότητα και μεγαλύτερη ταχύτητα δικτύου. Ιστορικά το πρώτο δημόσιο δίκτυο LTE που εγκαταστάθηκε στο κόσμο, ήταν στο Όσλο και τη Στοκχόλμη από την εταιρεία TeliaSonera στις 14 Δεκεμβρίου 2009. Παρόλο που το δίκτυο LTE αποτελεί φυσική εξέλιξη των δικτύων GSM/UMTS, το έχουν υιοθετήσει και πάροχοι άλλων δικτύων όπως το CDMA με παρόχους τις Verizon στη Β. Αμερική και au by KDDI στην Ιαπωνία. Έτσι, οι δημιουργοί του LTE φιλοδοξούν να αποτελέσει το πρώτο πραγματικά παγκόσμιο πρότυπο κινητής τηλεφωνίας [21] και να ξεπεράσει το αντίστοιχο ανταγωνιστικό πρότυπο τέταρτης γενιάς WiMAX, το οποίο αποτελεί φυσική συνέχεια των δικτύων τρίτης γενιάς στις Η.Π.Α. Η έκδοση 8 του δικτύου LTE αν και αναφερόταν ως σύστημα 4ης γενιάς κινητής τηλεφωνίας (4G) τυπικά δεν ίσχυε κάτι τέτοιο καθώς δεν ανταποκρινόταν στις απαιτήσεις που είχε ορίσει ο διεθνής οργανισμός ITU-R. Για το λόγο αυτό, το LTE αναβαθμίστηκε στην έκδοση 10 και μετονομάστηκε σε LTE Advanced για να πληροί τις προϋποθέσεις έτσι ώστε να θεωρείται σύστημα 4G. Τα πιο σημαντικά κίνητρα για την ανάπτυξη του LTE ήταν τα εξής [8]:

- Η ανάγκη για διατήρηση της ανταγωνιστικότητας του συστήματος 3G στο μέλλον.
- Η απαίτηση των χρηστών για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών.
- Η ανάγκη για ένα βελτιστοποιημένο σύστημα με ανταλλαγή πακέτων.
- Η συνεχής απαίτηση από τους χρήστες για χαμηλότερο κόστος.
- Η χαμηλότερη πολυπλοκότητα.
- Η αποφυγή του άσκοπου κατακερματισμού των τεχνολογιών για συνδεδεμένες και ασύνδετες ζώνες λειτουργίας.

Έτσι το πρότυπο LTE για να ικανοποιήσει τα παραπάνω αλλά και περαιτέρω απαιτήσεις των χρηστών έπρεπε να σχεδιαστεί κατ'αυτόν τον τρόπο ώστε να μπορεί να υποστηρίξει μια μεγάλη ποικιλία από υπηρεσίες, όπως η περιήγηση στο διαδίκτυο, υπηρεσίες FTP, video streaming, υπηρεσίες VoIP, διαδικτυακό παιχνίδι, υπηρεσίες βίντεο πραγματικού χρόνου κλπ. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά για το δίκτυο LTE – Advanced (Έκδοση 10), τα οποία χρησιμοποιήσαμε και για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας [20]:

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά 4G-LTE (Έκδοση 10)

Παράμετροι	LTE (3GPP Έκδοση 8)	LTE (3GPP Έκδοση 10)
Γενιά	3.9G	4G
Χρόνος πρώτης έκδοσης	2009	2011
Φυσικό στρώμα	DL: OFDMA UL: SCFDMA	DL: OFDMA UL: SCFDMA
Αμφίδρομη λειτουργία	TDD και FDD (Time και Frequency - Division Duplex)	TDD και FDD (Time και Frequency - Division Duplex)
Κινητικότητα χρήστη	μέχρι 350 km/h	μέχρι 350 km/h
Εύρος κάλυψης	έως 100 km	έως 100 km
Εύρος ζώνης καναλιού	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz	μέχρι 100 MHz
Μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων	DL: 300 Mbps (4x4 κεραίες) UL: 75 Mbps (2x4 κεραίες) σε συχνότητα 20MHz, FDD	DL: 1 Gbps (4x4 κεραίες) UL: 300 Mbps (2x4 κεραίες) σε συχνότητα 20MHz, FDD
φασματική απόδοση	DL: 1.91 bps / Hz (2x2) UL: 0.72 bps / Hz (1x2)	DL: 30 bps / Hz (2x2) UL: 15 bps / Hz (1x2)
υστέρηση (latency)	Στρώμα ζεύξης: < 5 ms Μεταπομπή: < 50 ms	Στρώμα ζεύξης: < 5 ms Μεταπομπή: < 50 ms
χωρητικότητα VoIP	80 χρήστες ανά τομέα / MHz (FDD)	80 χρήστες ανά τομέα / MHz (FDD)
λοιπά χαρακτηριστικά	Αρχιτεκτονική πλήρως βασισμένη σε IP συμβατό με 3G υποστήριξη ποιότητας υπηρεσιών QoS	Αρχιτεκτονική πλήρως βασισμένη σε IP συμβατό με 3G υποστήριξη ποιότητας υπηρεσιών QoS

Όπως παρατηρούμε η νεότερη έκδοση του συστήματος LTE προσφέρει ακόμη υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και καλύτερη φασματική αποδόση σε σχέση με την έκδοση 8. Σχετικά με την απήχηση των δικτύων LTE στον κόσμο, σύμφωνα με έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί από την IDATE ο αριθμός των συνδρομητών σε δίκτυα LTE το 2013 άγγιζε τα διακόσια εκατομμύρια, ενώ μέχρι το τέλος του 2017 θα είναι κοντά στο να ξεπεράσουν το ένα δισεκατομμύριο [22]. Για να καλύψουν μάλιστα τις ιδιαίτερες ανάγκες του κάθε συνδρομητή ο οργανισμός 3GPP έχει σχεδιάσει το σύστημα 4G-LTE με τέτοιο τρόπο ώστε να διαθέτει διαφορετικά μεγέθη κελιών δημιουργώντας έτσι ένα ολοκληρωμένο ετερογενές ασύρματο δίκτυο.

2.2 Επισκόπηση διαδικασίας κάθετης μεταπομπής

Στο υποκεφάλαιο που ακολουθούν θα δοθεί μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας της κάθετης μεταπομπής, τα αίτια εκτέλεσης της και διάφοροι τύποι

κάθετης μεταπομπής. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν συνοπτικά διαφορετικές στρατηγικές κάθετης μεταπομπής καθώς και ορισμένα στατιστικά στοιχεία για τα κινητά τερματικά.

2.2.1 Διαδικασία κάθετης μεταπομπής

Μεταπομπή προς ένα δίκτυο πρόσβασης είναι η διαδικασία μεταφοράς της σύνδεσης ενός κινητού τερματικού προς το δίκτυο αυτό, διατηρώντας όμως ενεργές και χωρίς διακοπή τις συνεδρίες του χρήστη (users sessions). Διακρίνουμε δύο είδη μεταπομπής: την κάθετη μεταπομπή και την οριζόντια μεταπομπή. Η *οριζόντια μεταπομπή* πραγματοποιείται μεταξύ σημείων πρόσβασης (π.χ. σταθμοί βάσης ενός κυψελωτού δικτύου τηλεπικοινωνίας) που ανήκουν στο ίδιο δίκτυο και προκαλείται, όταν ο δρομολογητής που εξυπηρετεί την πρόσβαση στο δίκτυο γίνει μη διαθέσιμος στο κινητό τερματικό εξαιτίας της κίνησής του. Αντίθετα η *κάθετη μεταπομπή* πραγματοποιείται μεταξύ σημείων πρόσβασης που υποστηρίζουν διαφορετικές τεχνολογίες και ανήκουν σε διαφορετικά δίκτυα (π.χ. ένα σημείο πρόσβασης WLAN και ένας σταθμός βάσης ενός κυψελωτού δικτύου) και συμβαίνει σε ετερογενή περιβάλλοντα πιο πολύ για λόγους διευκόλυνσης παρά για λόγους συνδεσιμότητας [23]. Η οριζόντια μεταπομπή πραγματοποιείται επομένως στα άκρα μιας κυψέλης της εμβέλειας ενός δικτύου, κάτι που δεν είναι απαραίτητα αλήθεια για την κάθετη μεταπομπή. Σε αντίθεση με τη διαδικασία της οριζόντιας μεταπομπής, όπου για την επιλογή του κατάλληλου σταθμού βάσης ελέγχεται μόνο η ισχύς λαμβανόμενου σήματος (RSS), στην περίπτωση της κάθετης μεταπομπής η επιλογή ανάμεσα στα διαθέσιμα δίκτυα είναι περισσότερο πολύπλοκη και χρειάζεται να γίνει επεξεργασία διαφορετικών πληροφοριών. Για το λόγο αυτό η διαδικασία κάθετης μεταπομπής αναλύεται σε τρία στάδια: το στάδιο συλλογής πληροφοριών, το στάδιο απόφασης μεταπομπής και το στάδιο εκτέλεσης της μεταπομπής, τα οποία περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω [24].

- i. *Στάδιο συλλογής πληροφοριών μεταπομπής (system discovery)*: Στο στάδιο αυτό συλλέγονται όλες οι πληροφορίες που απαιτούνται για την απόφαση σχετικά με το αν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί η μεταπομπή. Τέτοιες πληροφορίες αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υποψήφιων δικτύων, όπως π.χ. η ισχύς λαμβανόμενου σήματος (RSS), το εύρος ζώνης (bandwidth), ο ρυθμός διέλευσης (throughput), το φορτίο του συνδέσμου (link load) κλπ., αλλά και τα χαρακτηριστικά του κινητού τερματικού/χρήστη όπως είναι το επίπεδο μπαταρίας, η ταχύτητα της κίνησης του χρήστη και άλλες πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία του χρήστη.
- ii. *Στάδιο απόφασης μεταπομπής (handoff decision)*: Στο στάδιο αυτό εξετάζεται το αν και το πώς θα εκτελεστεί η μεταπομπή προς το καταλληλότερο δίκτυο και δίνει πληροφορίες στο επόμενο στάδιο. Το καταλληλότερο δίκτυο επιλέγεται από τον εκάστοτε αλγόριθμο απόφασης κάθετης μεταπομπής, ο οποίος εφαρμόζεται στο στάδιο αυτό χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που

έχουν συλλεχθεί στο προηγούμενο στάδιο ώστε να αξιολογήσει τα υποψήφια δίκτυα.

- iii. *Στάδιο εκτέλεσης της μεταπομπής (handoff execution):* Κατα τη διάρκεια αυτού του σταδίου οι συνδέσεις δρομολογούνται από το υπάρχον δίκτυο στο νέο δίκτυο με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην υπάρχουν ανωμαλίες ή διακοπές στις υπηρεσίες που παρέχονται στο τερματικό τη χρονική εκείνη στιγμή (seamless handover).

Η διαδικασία απόφασης κάθετης μεταπομπής επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας, καθώς απαντάει στο πότε και σε ποιο δίκτυο θα γίνει η μεταπομπή. Η επιλογή της κατάλληλης χρονικής στιγμής (handover initiation) ελαχιστοποιεί το κόστος σηματοδοσίας (signaling overhead), μπορεί να αποφύγει αχρείαστες μεταπομπές και να προβλέψει διακοπές σύνδεσης. Η επιλογή δικτύου (network selection) αντιστοιχεί τις απαιτήσεις των χρηστών στο κατάλληλο δίκτυο πρόσβασης. Για την επιλογή δικτύου αξιολογούνται διάφορα κριτήρια, όπως είναι οι προτιμήσεις των χρηστών, οι συνθήκες περιβάλλοντος και τα χαρακτηριστικά των δικτύων, οι απαιτήσεις της τρέχουσας εφαρμογής και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τερματικών. Όλα αυτά τα κριτήρια χρειάζεται να αξιολογηθούν και να συγκριθούν ώστε να αποφασιστεί αν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μεταπομπή προς νέο δίκτυο, το οποίο θα επιλεγεί εν τέλει από τον αλγόριθμο απόφασης κάθετης μεταπομπής. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας της παραπάνω επιλογής έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές κατηγορίες αλγόριθμων απόφασης κάθετης μεταπομπής, τις οποίες θα δούμε αναλυτικότερα σε επόμενο υποκεφάλαιο. Πρώτα όμως χρειάζεται να μελετηθούν οι αιτίες που μπορούν να εγείρουν την εκκίνηση της διαδικασίας μεταπομπής προς ένα νέο δίκτυο.

2.2.2 Αιτίες εκτέλεσης και τύποι κάθετης μεταπομπής

Η βασική ερώτηση είναι: Γιατί χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μια κάθετη μεταπομπή; Απαντώντας στην ερώτηση αυτή είναι δυνατό να χαρακτηρίσουμε τις κάθετες μεταπομπές ανάλογα με την αιτία που πυροδότησε την εκκίνηση της διαδικασίας τους [25].

Ο πρώτος τύπος κάθετης μεταπομπής είναι η *επιτακτική μεταπομπή (imperative handover)*. Τέτοιου τύπου μεταπομπές πυροδοτούνται όταν η ισχύς λαμβανόμενου σήματος RSS υποχωρήσει κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι με αποτέλεσμα το κινητό τερματικό να μην μπορεί να επικοινωνήσει μέσω του συνδέσμου (link). Τέτοιες μεταπομπές απαντώνται συχνά σε κυψελωτά δίκτυα ή σε δίκτυα WLAN. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι επιτακτική η ανάγκη για εκκίνηση της διαδικασίας κάθετης μεταπομπής καθώς δεν υπάρχει αρκετή ισχύς για να διατηρηθεί η επικοινωνία, ενώ αν δεν βρεθεί έγκαιρα κάποιο νέο δίκτυο πρόσβασης η τρέχουσα εφαρμογή πιθανότατα θα τερματίσει. Οι μεταπομπές αυτού του τύπου ελέγχονται κατά κύριο λόγο από τα κινητά τερματικά καθώς αυτά γνωρίζουν σε πραγματικό

χρόνο την ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS από τους σταθμούς βάσης των υποψήφιων δικτύων πρόσβασης και ως εκ τούτου μπορούν να προβλέψουν σε καλύτερο βαθμό την πιθανότητα να έχουν καλύτερη σύνδεση μετά τη μεταπομπή. Ωστόσο επιτακτικές μεταπομπές μπορούν να πυροδοτηθούν και από το ίδιο το δίκτυο για τα τερματικά κινητά για λόγους εξισορρόπησης του φορτίου του δικτύου. Αυτού του τύπου οι μεταπομπές αποβλέπουν στη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας του δικτύου και μπορούν επομένως να επιδράσουν αρνητικά στην απόδοση ορισμένων μεμονομένων κινητών τερματικών.

Ο δεύτερος τύπος κάθετης μεταπομπής είναι η *εναλλακτική μεταπομπή* (*alternative handover*). Τέτοιου τύπου μεταπομπές εκτελούνται όταν υπάρχει κάποιο άλλο δίκτυο το οποίο προσφέρει καλύτερες υπηρεσίες από το τρέχον δίκτυο, στο οποίο είναι συνδεδεμένο το κινητό τερματικό. Για παράδειγμα αν το κινητό τερματικό είναι συνδεδεμένο σε ένα δίκτυο πρόσβασης το οποίο προσφέρει χαμηλό εύρος ζώνης και επιχειρήσει να κάνει μια βιντεοκλήση τότε θα ήταν συνετό να αλλάξει και να συνδεθεί σε κάποιο άλλο σημείο πρόσβασης, της ίδιας ασύρματης τεχνολογίας πρόσβασης ή όχι, το οποίο θα προσφέρει υψηλότερο εύρος ζώνης. Υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις σχετικά με το πως μπορούν να διαχειριστούν οι εναλλακτικές μεταπομπές. Η πρώτη παρακολουθεί περιοδικά τα διαθέσιμα δίκτυα και ελέγχει αν υπάρχει κάποιο δίκτυο το οποίο είναι περισσότερο κατάλληλο για την συγκεκριμένη εφαρμογή που εκτελείται. Αντίθετα στη δεύτερη περίπτωση η εναλλακτική μεταπομπή πυροδοτείται από ένα συγκεκριμένο γεγονός. Για παράδειγμα αν το κινητό τερματικό επιθυμεί να κατεβάσει ένα μεγάλο αρχείο και το τρέχον σημείο πρόσβασης προσφέρει μόνο περιορισμένο εύρος ζώνης λήψης (*download bandwidth*), τότε μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία ανακάλυψης διαθέσιμων δικτύων. Αν κατά τη διαδικασία αυτή βρεθεί ένα καταλληλότερο δίκτυο πρόσβασης τότε θα πραγματοποιηθεί η μεταπομπή, ενώ σε διαφορετική περίπτωση το κινητό τερματικό θα διατηρήσει τη σύνδεση του στο τρέχον σημείο πρόσβασης.

Τέλος υπάρχει και ένας τρίτος τύπος κάθετης μεταπομπής που σχετίζεται με την *ισχύ του κινητού τερματικού* (*power-based handover*). Τέτοιου τύπου μεταπομπές πυροδοτούνται όταν το επίπεδο ισχύος της μπαταρίας του κινητού τερματικού υποχωρήσει κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι και έχουν ως σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας στο κινητό τερματικό. Το κατώφλι αυτό μπορεί να είναι σταθερό ή να μεταβάλλεται σχετικά με τις προτιμήσεις του χρήστη [8].

Επίσης η διαδικασία μεταπομπής μπορεί να χαρακτηριστεί με διάφορους τύπους ως προς τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται [23]. Μπορεί να είναι για παράδειγμα *σκληρή* (*hard*) αν το τερματικό συνδέεται σε ένα μόνο σημείο πρόσβασης κάθε χρονική στιγμή. Διαφορετικά χαρακτηρίζεται ως *ήπια* (*soft*) όταν το τερματικό είναι συνδεδεμένο σε δύο σημεία πρόσβασης ταυτόχρονα για ένα μικρό χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της μεταπομπής. Η διαδικασία μεταπομπής μπορεί να χαρακτηριστεί ακόμα ως *απαραγής* (*seamless*) όταν δεν γίνεται αντιληπτή από τον χρήστη, ενώ αν επιφέρει μικρή καθυστέρηση στη λειτουργία του κινητού

τερματικού χαρακτηρίζεται ως *γρήγορη* (*fast*) και αν έχει μικρό ποσοστό απωλειών πακέτων χαρακτηρίζεται ως *ομαλή* (*smooth*).

Ανεξάρτητα από τον τύπο της διαδικασίας μεταπομπής, η θέση του μηχανισμού απόφασης μεταπομπής μπορεί να βρίσκεται είτε στην οντότητα του δικτύου είτε στο ίδιο το τερματικό [23]. Έτσι διακρίνουμε τέσσερις περιπτώσεις:

- ✓ Όταν το δίκτυο έχει τον πρωταρχικό έλεγχο στη διαδικασία μεταπομπής (Network Controlled HandOver).
- ✓ Όταν το κινητό τερματικό έχει τον πρωταρχικό έλεγχο στη διαδικασία μεταπομπής (Mobile Controlled HandOver).
- ✓ Όταν το κινητό τερματικό συλλέγει πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από το δίκτυο σχετικά με την μεταπομπή (Mobile Assisted HandOver).
- ✓ Όταν το δίκτυο συλλέγει πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από το κινητό τερματικό σχετικά με την μεταπομπή (Network Assisted HandOver).

Παρατηρούμε επομένως ότι υπό το πρίσμα της εξοικονόμησης ενέργειας στα κινητά τερματικά, το οποίο αποτελεί και αντικείμενο αυτής της μελέτης, η διαδικασία της μεταπομπής, οι αιτίες πρόκλησής της, ο τύπος της αλλά και η θέση του μηχανισμού απόφασης μεταπομπής είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες. Για παράδειγμα όταν το κινητό τερματικό έχει τον πρωταρχικό έλεγχο (Mobile Controlled HandOver) καταναλώνει περισσότερη ενέργεια καθώς επιβαρύνεται με την εκτέλεση του αλγορίθμου απόφασης κάθετης μεταπομπής. Στην πραγματικότητα όσο πιο πολύπλοκος είναι ο αλγόριθμος αυτός τόσο περισσότερη θα είναι και η ισχύς που θα καταναλωθεί για την εκτέλεσή του. Αντίστοιχα αν το δίκτυο έχει τον πρωταρχικό έλεγχο και επιβάλλει τη μεταπομπή του κινητού τερματικού για λόγους εξισορρόπησης του φορτίου του δικτύου σε κάποιο άλλο δίκτυο με χειρότερα τεχνικά χαρακτηριστικά, μπορεί να οδηγήσει σε επανεκκίνηση της διαδικασίας κάθετης μεταπομπής στο τερματικό και επομένως στην επιβάρυνση της μπαταρίας του.

2.2.3 Αλγόριθμοι απόφασης κάθετης μεταπομπής

Η εξέλιξη στον τρόπο πρόσβασης των ασύρματων δικτύων συντέλεσε στον οραματισμό ενός ολοκληρωμένου ασύρματου ετερογενούς περιβάλλοντος, το οποίο θα περιλαμβάνει ένα σύνολο από διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης (RATs). Σε ένα τέτοιο περιβάλλον οι χρήστες θα μπορούν να αλλάζουν απρόσκοπτα από το ένα RAT στο άλλο με σκοπό τη μεγιστοποίηση του επίπεδου ικανοποίησής τους, ενώ παράλληλα οι πάροχοι θα μπορούν να ελέγχουν την υπερφόρτωση των υποσυστημάτων τους. Η ανάγκη επομένως για τη δημιουργία αλγορίθμων, που θα λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις των υπηρεσιών, τις προτιμήσεις των πελατών αλλά και τις προσφορές των παρόχων και θα υπόσχεται μια απρόσκοπτη μεταπομπή ανάμεσα στα δίκτυα διαφορετικών τεχνολογιών είναι επιτακτική. Καθώς το πρόβλημα αυτό απασχολεί τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών σχεδόν μία δεκαετία,

έχουν προταθεί πολλοί τέτοιοι αλγόριθμοι τα τελευταία χρόνια, τις κυριότερες κατηγορίες των οποίων παρουσιάζουμε παρακάτω [23].

- ***Στρατηγικές που βασίζονται στην ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS***

Σε αυτή την κατηγορία αλγορίθμων η ισχύς λαμβανόμενου σήματος, RSS (Received Signal Strength), χρησιμοποιείται ως το κύριο κριτήριο για την απόφαση κάθετης μεταπομπής. Διάφορες μελέτες έχουν αναπτυχθεί για να συγκρίνουν την τιμή του RSS του τρέχοντος σημείου πρόσβασης με αυτήν του υποψήφιου για μεταπομπή σημείου πρόσβασης [24, 25]. Καθώς το RSS αποτελεί και το μοναδικό κριτήριο για τις οριζόντιες μεταπομπές, υπάρχουν μελέτες που ασχολήθηκαν με τη σημασία του στη διαδικασία της μεταπομπής ήδη από τα μέσα της δεκαετία του '90, μετά τα πρώτα βήματα της βιομηχανίας της κινητής τηλεφωνίας. Συγκεκριμένα στο [26] παρατηρούμε ένα διαχωρισμό των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν το RSS ως βασικό κριτήριο για τις μεταπομπές σε πέντε υποκατηγορίες:

- αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν σχετικό RSS
- αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν σχετικό RSS με κατώφλι
- αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν σχετικό RSS με καθυστέρηση
- αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν σχετικό RSS με καθυστέρηση και κατώφλι, και
- αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν μηχανισμούς πρόβλεψης.

Στις κάθετες μεταπομπές το σχετικό RSS δεν αποτελεί ρεαλιστική εναλλακτική καθώς το RSS για διαφορετικού τύπου δίκτυα πρόσβασης δεν είναι δυνατό να συγκριθεί άμεσα λόγω της ανισότητας των τεχνολογιών που εμπλέκονται (π.χ. χρειάζονται διαφορετικά κατώφλια για διαφορετικές τεχνολογίες). Επιπλέον μαζί με το RSS στη διαδικασία κάθετης μεταπομπής χρειάζεται συχνά να συνδυάζονται κι άλλες παράμετροι των δικτύων, όπως το εύρος ζώνης, το χρηματικό κόστος που θέτουν οι πάροχοι, η παραμόρφωση του σήματος, η καθυστέρηση κλπ. Οι παραπάνω στρατηγικές χρησιμοποιήθηκαν ευρέως όσον αφορά τις οριζόντιες μεταπομπές λόγω της απλότητας της υλοποίησής τους. Στην περίπτωση των κάθετων μεταπομπών όμως οι στρατηγικές αυτές είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν λόγω της διαφορετικότητας των ασύρματων τεχνολογιών πρόσβασης. Ωστόσο το RSS αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα στη διαδικασία απόφασης κάθετης μεταπομπής, ο οποίος συμπεριλαμβάνεται και στους αλγόριθμους απόφασης κάθετης μεταπομπής, που συγκρίναμε στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε.

- ***Συναρτησιακές στρατηγικές***

Στην περίπτωση αυτή για κάθε δίκτυο που βρίσκεται στο εύρος κάλυψης του τερματικού του χρήστη υπολογίζεται η τιμή μιας συνάρτησης κόστους, η οποία

ισούται με το άθροισμα εμβαρών συναρτήσεων συγκεκριμένων παραμέτρων και έχει τη γενική μορφή [27]:

$$f_n = \sum_s \sum_i w_{s,i} \cdot p_{s,i}^n$$

όπου $p_{s,i}^n$ είναι το κόστος εξαιτίας της παραμέτρου i όταν προσφέρεται η υπηρεσία s στο δίκτυο n και $w_{s,i}$ το βάρος της i -οστής παραμέτρου που χρησιμοποιείται για την υπηρεσία s .

Ιστορικά η πρώτη συνάρτηση κόστους που προτάθηκε χρησιμοποιούσε τρεις παραμέτρους: το εύρος ζώνης B_n , την κατανάλωση ισχύος P_n και το χρηματικό κόστος C_n για $n = 1, 2, \dots, N$ διαθέσιμα δίκτυα και ως βέλτιστη λύση επιλεγόταν αυτό με την μικρότερη τιμή για τη συνάρτηση κόστους. Άλλες μελέτες χρησιμοποιούν μια συνάρτηση χρηστικότητα για την ποσοτικοποίηση των παραμέτρων ποιότητας των δικτύων και ως καταλληλότερο δίκτυο επιλέγεται αυτό που επιτυγχάνει την υψηλότερη βαθμολογία. Σε μια εναλλακτική εκδοχή, που συμπεριλαμβάνει τόσο το επίπεδο ικανοποίησης του χρήστη όσο και το κέρδος των παρόχων, η συνάρτηση χρηστικότητα μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$U(R_{ij}, R_{Di}) = w \cdot u_s(R_{ij}, R_{Di}) + (1 - w)u_p(R_{ij}, R_{Di})$$

όπου το $u_s(R_{ij}, R_{Di})$ αναφέρεται στο επίπεδο ικανοποίησης του χρήστη i όταν το τερματικό του συνδέεται στο RAT j , οπότε απολαμβάνει ρυθμό μετάδοσης R_{ij} ενώ έχει ζητήσει ρυθμό R_{Di} . Αντίστοιχα το $u_p(R_{ij}, R_{Di})$ αναφέρεται στο όφελος του RAT j , το οποίο μετριέται με βάση την προθυμία του χρήστη i να πληρώσει για τον ρυθμό μετάδοσης R_{ij} που λαμβάνει από το RAT [28]. Τέλος υπάρχουν και μελέτες που προτείνουν τη χρήση μιας συνάρτησης βέλτιστου κόστους για την αξιολόγηση του κάθε δικτύου διατηρώντας μια ισορροπία μεταξύ ικανοποίησης του χρήστη και αποδοτικότητας του δικτύου. Η συνάρτηση αυτή έχει την ιδιαιτερότητα ότι εφαρμόζεται δύο φορές, μια φορά για όλες τις ενεργές εφαρμογές του χρήστη ως σύνολο, και μία για κάθε μία από τις ενεργές εφαρμογές του χρήστη ξεχωριστά [27].

- **Στρατηγικές με επίκεντρο τον χρήστη**

Οι προτιμήσεις του χρήστη σε ότι αφορά το κόστος και την ποιότητα υπηρεσιών αποτελεί για αυτές τις στρατηγικές τη σημαντικότερη παράμετρο για την επιλογή δικτύου. Η πιο διαδεδομένη στρατηγική αυτού του τύπου αναθέτει τους χρήστες που ενδιαφέρονται για υψηλό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών, ανεξάρτητα του κόστους, σε κυψελωτά δίκτυα όπως το 3G, 4G-LTE ή WiMAX, ενώ τους χρήστες που προτιμούν το χαμηλό κόστος εις βάρος της ποιότητας υπηρεσιών στα διαθέσιμα δίκτυα Wi-Fi. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το επίπεδο των προσφερόμενων υπηρεσιών προτείνεται να συμπεριλαμβάνεται στις στρατηγικές αυτές μία συνάρτηση κόστους της μορφής $C = T_{WiFi} \cdot c_{WiFi}(h) + T_{3G} \cdot c_{3G}(h)$, όπου T_{WiFi} και T_{3G} είναι οι χρόνοι παραμονής σε δίκτυα Wi-Fi και 3G αντίστοιχα, και $c_{WiFi}(h)$ και $c_{3G}(h)$ τα

κόστη ανά ώρα για την σύνδεση του τερματικού σε δίκτυα Wi-Fi και 3G αντίστοιχα. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια αντίστοιχη συνάρτηση χρηστικότητας, που θα ποσοτικοποιεί τις προτιμήσεις του χρήστη σχετικά με το κόστος και την ποιότητα υπηρεσιών. Το πρόβλημα με την παραπάνω συνάρτηση κόστους είναι η απουσία ενός επαναληπτικού βρόγχου που θα ελέγχει και θα προσαρμόζεται σε τυχόν αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντος ή στις πολιτικές απόφασης κάθετης μεταπομπής του χρήστη [12].

Σε μία άλλη έρευνα η Ο. Ormond ανέλυσε τις προτιμήσεις των χρηστών για υπηρεσίες δεδομένων μη πραγματικού χρόνου χρησιμοποιώντας επίσης μια συνάρτηση χρηστικότητας [29]. Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος επιλογής δικτύου βασίζεται στον υπολογισμό της τιμής του πλεονάσματος του καταναλωτή, που ουσιαστικά είναι η διαφορά ανάμεσα στο αντικειμενικό κόστος για τη μεταφορά δεδομένων που πραγματοποιήσε ο χρήστης με το κόστος που χρεώνει ο πάροχος τον καταναλωτή για τη μεταφορά αυτή. Έτσι αν η τιμή που πρέπει να πληρώσει ο χρήστης για τη μεταφορά είναι λιγότερη από αυτήν που ήταν πρόθυμος να πληρώσει, τότε ίσως να τον ενδιαφέρει αυτή η εναλλακτική επιλογή που θα του κοστίζει θεωρητικά λιγότερο. Σημαντικός παράγοντας σε αυτή τη μέθοδο είναι η κατηγοριοποίηση των χρηστών με βάση τη διάθεσή τους απέναντι στο ρίσκο (ουδέτερη, υπέρ, ενάντια). Ωστόσο στην έρευνα αυτή δεν λαμβάνονται υπόψιν άλλοι παράγοντες που αφορούν το επίπεδο ικανοποίησης του χρήστη.

- **Στρατηγικές απόφασης μέσω πολλαπλών χαρακτηριστικών**

Το πρόβλημα απόφασης κάθετης μεταπομπής (vertical handover decision problem) αποτελεί χαρακτηριστικό πολυκριτηριακό πρόβλημα (MADM - Multiple Attribute Decision Making), καθώς καλούμαστε να επιλέξουμε την καλύτερη εναλλακτική από ένα πλήθος επιλογών, τις οποίες συγκρίνουμε με βάση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Οι πιο γνωστές μέθοδοι MADM είναι οι εξής: SAW (Simple Additive Weighting), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), MEW (Multiplicative Exponent Weighting) και GRA (Grey Relational Analysis) [24].

SAW και TOPSIS

Και στις δύο αυτές μεθόδους χρησιμοποιείται ασαφής λογική για την αναπαράσταση της σχετικής πληροφορίας, που προκύπτει από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υποψήφιων δικτύων πρόσβασης και τις προτιμήσεις των χρηστών. Σε πρώτη φάση μετατρέπονται οι παραπάνω σχετικές πληροφορίες σε πραγματικούς αριθμούς, ενώ σε δεύτερη φάση χρησιμοποιούνται κλασικές μέθοδοι MADM για να προσδιοριστεί η κατάταξη των υποψήφιων δικτύων. Στη μέθοδο SAW το συνολικό σκορ για κάθε υποψήφιο δίκτυο υπολογίζεται από το σταθμισμένο

άθροισμα όλων των τιμών των χαρακτηριστικών του δικτύου αυτού. Ενώ στη μέθοδο TOPSIS το δίκτυο που επιλέγεται είναι αυτό που έχει την μικρότερη σχετική απόσταση από την ιδανική λύση (και επομένως πιο μακριά από την χειρότερη λύση). Την ιδανική λύση αποτελεί ένα δίκτυο πρόσβασης, για το οποίο θεωρούμε ότι για κάθε χαρακτηριστικό λαμβάνει την καλύτερη δυνατή τιμή.

GRA

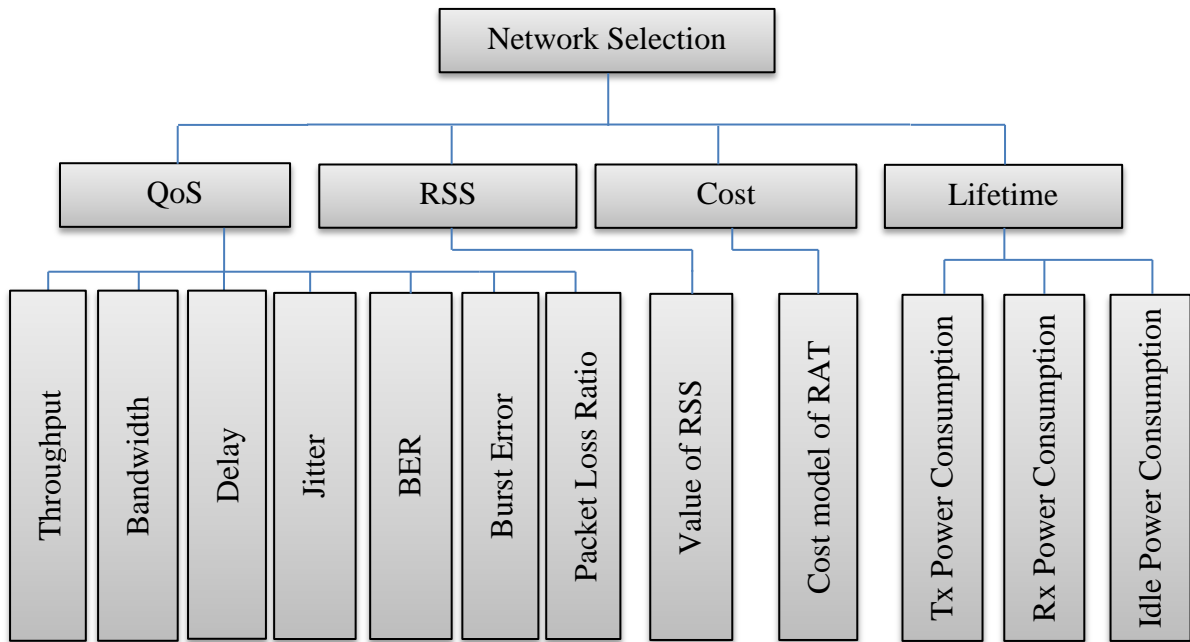
Η κατάταξη των δικτύων με τη μέθοδο GRA χτίζεται με βάση τις γκριζες σχέσεις σε σχέση με ένα θετικό ιδανικό δίκτυο. Αρχικά απαιτείται μια διαδικασία κανονικοποίησης ώστε να επεξεργαστούν οι παράμετροι κόστους και κέρδους των υποψήφιων δικτύων πρόσβασης και έπειτα υπολογίζεται ένας δείκτης Grey Relational Coefficient (GRC) για κάθε δίκτυο. Ο GRC αποτελεί ένα δείκτη περιγραφής ομοιότητας για τα υποψήφια δίκτυα σε σχέση με το ιδανικό δίκτυο. Προφανώς το δίκτυο που επιλέγεται είναι αυτό με το μεγαλύτερο δείκτη GRC, δηλαδή τη μεγαλύτερη ομοιότητα με το ιδανικό δίκτυο.

MEW

Είναι μια ακόμα μέθοδος MADM, η οποία χρησιμοποιεί ένα πίνακα $N \times M$ για να επιλέξει το καταλληλότερο δίκτυο, όπου N είναι ο αριθμός των υποψήφιων δικτύων και M ο αριθμός των χαρακτηριστικών του κάθε δικτύου. Με βάση τον πίνακα αυτό και το βάρος που έχει το κάθε χαρακτηριστικό υπολογίζεται το συνολικό σκορ για κάθε δίκτυο καθώς επίσης και το σκορ του θετικού ιδανικού δικτύου. Τέλος υπολογίζεται ο λόγος R_i για κάθε δίκτυο ως προς το ιδανικό και κατ' αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται το καταλληλότερο δίκτυο.

Σε μελέτη που έγινε για την σύγκριση των παραπάνω μεθόδων προέκυψε ότι η μέθοδος GRA προσφέρει ελαφρώς μεγαλύτερο εύρος ζώνης και μικρότερες καθυστερήσεις. Αντίστοιχα σε άλλη μελέτη ως βέλτιστη λύση έχει προταθεί ο συνδυασμός της αναλυτικής ιεραρχικής διαδικασίας (AHP) και της μεθόδου GRA για την βέλτιστη επιλογή βαρών για τα χαρακτηριστικά και για την κατάταξη των υποψήφιων δικτύων αντίστοιχα.

Για την απόδοση των παραπάνω μεθόδων, έχει αποδειχθεί ότι σημαντικό ρόλο κατέχει ο τρόπος με τον οποίο διανέμονται τα βάρη σε κάθε χαρακτηριστικό και για το λόγο αυτό συχνά στη βιβλιογραφία οι παραπάνω στρατηγικές συνδυάζονται σε πρώτο στάδιο με την αναλυτική ιεραρχική διαδικασία (AHP). Στην Εικόνα 2-5 παρατηρούμε τη διαδικασία αναλυτικής ιεραρχίας για την αξιολόγηση και τελικά την επιλογή ενός δικτύου ασύρματης πρόσβασης.



Εικόνα 2-5: Αναλυτική ιεραρχική διαδικασία για την επιλογή του καταλληλότερου δικτύου πρόσβασης

Παρόλο που το πρόβλημα απόφασης κάθετης μεταπομπής είναι αρκετά περίπλοκο η μέθοδος AHP φαίνεται να είναι η πλέον κατάλληλη για να αναλύσει το αρχικό πρόβλημα σε μικρότερα, απλούστερα και περισσότερο ευεπίλυτα προβλήματα. Η διαδικασία AHP βασίζεται σε 3 βήματα:

- a. Αναλύει το αρχικό πρόβλημα απόφασης σε διαφορετικά στάδια ιεραρχίας.
- b. Συγκρίνει κάθε παράγοντα με όλους τους υπόλοιπους που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο μέσω ενός πίνακα συγκρίσεων ζευγαριών (pairwise comparison matrix).
- c. Υπολογίζει το άθροισμα των γινομένων των βαρών που λαμβάνονται σε κάθε στάδιο και επιλέγει ως βέλτιστη λύση αυτό με το μεγαλύτερο άθροισμα

- **Στρατηγικές που χρησιμοποιούν ασαφή λογική και νευρωνικά δίκτυα**

Η ασαφής λογική (fuzzy logic) και τα νευρωνικά δίκτυα (neural networks) χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις τεχνικές MADM για την ανάπτυξη εξελιγμένων αλγορίθμων απόφασης τόσο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όσο και για εφαρμογές μη πραγματικού χρόνου. Οι κλασικές μέθοδοι MADM δεν μπορούν να διαχειριστούν αποδοτικά προβλήματα απόφασης, τα οποία διαχειρίζονται δεδομένα με σχετικές τιμές. Αντίθετα η ασαφής λογική προσφέρει τη δυνατότητα για διαχείριση ανακριβών δεδομένων και ταυτόχρονα μπορεί να συνδυάζει και να αξιολογεί πολλαπλά κριτήρια παράλληλα. Από την άλλη στρατηγικές που αξιοποιούν

νευρωνικά δίκτυα έχουν προταθεί για την αξιοποίηση των περιορισμών εύρους ζώνης που θέτουν οι χρήστες και έχει αποδειχθεί ότι η αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων αποδίδει καλύτερα από τους παραδοσιακούς αλγόριθμους απόφασης κάθετης μεταπομπής, σε ότι αφορά την καθυστέρηση της μεταπομπής και τον αριθμό των αχρειαστων μεταπομπών [30].

Γενικά τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούν μια χρήσιμη εναλλακτική στρατηγική για την επιλογή της κατάλληλης χρονικής στιγμής που συμφέρει να γίνει η μεταπομπή, ενώ η ασαφής λογική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή τόσο της κατάλληλης χρονικής στιγμής όσο και του βέλτιστου δικτύου πρόσβασης. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία έχει προταθεί και συνδυασμός των δύο αυτών τεχνικών, στην οποία τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του πλήθους των χρηστών μετά τη μεταπομπή, ενώ η ασαφής λογική χρησιμοποιείται για την ανάλυση των χαρακτηριστικών των δικτύων (εύρος ζώνης, προβλεπόμενος αριθμός χρηστών και ταχύτητα του κινητού τερματικού) και είναι υπεύθυνη για την τελική επιλογή δικτύου, το οποίο επιλέγεται μέσω κανόνων IF-THEN.

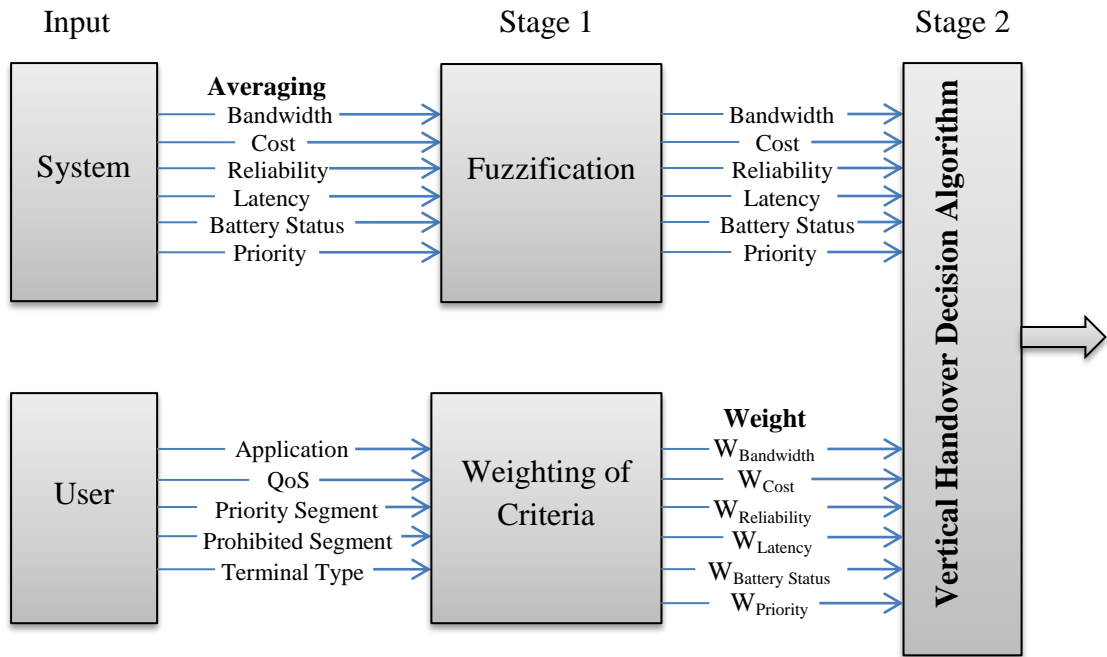
- ***Στρατηγικές με επίγνωση του περιβάλλοντος***

Οι στρατηγικές με επίγνωση του περιβάλλοντος (context-aware strategies) χρησιμοποιούν πληροφορίες σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητών τερματικών και των δικτύων πρόσβασης, καθώς επίσης και πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον, προκειμένου να λάβουν ευφυείς και αποδοτικές αποφάσεις. Τέτοιου τύπου στρατηγικές διαχειρίζονται τις πληροφορίες αυτές σε πρώτο στάδιο και έπειτα αξιολογούν τις συνθήκες για το αν χρειάζεται ή όχι να γίνει μεταπομπή και ποιο είναι το καταλληλότερο δίκτυο πρόσβασης. Οι πληροφορίες που συλλέγονται στο πρώτο στάδιο μπορούν να αφορούν το κινητό τερματικό (τεχνικά χαρακτηριστικά, τοποθεσία, κλπ), τους χρήστες (κόστος, επίπεδο ασφάλειας, κλπ), τα δίκτυα πρόσβασης (κάλυψη, ποιότητα υπηρεσιών, κλπ), τους παρόχους των δικτύων (κέρδος, ισορροπία φορτίου του δικτύου, κλπ) και τις εφαρμογές που εκτελούν οι χρήστες (απαιτήσεις σχετικά με την ποιότητα των υπηρεσιών, τύπος εφαρμογών, κλπ). Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να διαχωριστούν σε στατικές και δυναμικές. Στην πρώτη κατηγορία εμπίπτουν πληροφορίες όπως οι προτιμήσεις των χρηστών και τα χρηματικά κόστη για την πρόσβαση στα διαφορετικά ασύρματα δίκτυα πρόσβασης, οι οποίες λαμβάνουν και διατηρούν έπειτα μια σταθερή τιμή. Ενώ στη δεύτερη κατηγορία, τα δυναμικά κριτήρια μετρούνται είτε στην πλευρά των σταθμών βάσης είτε στην πλευρά των τερματικών των χρηστών και αφορούν κρίσιμες μετρήσεις των οποίων οι τιμές πρέπει να ανανεώνονται συχνά. Στον Πίνακα 2, που ακολουθεί, διαχωρίζουμε τις σημαντικότερες πληροφορίες που διαχειρίζονται οι στρατηγικές με επίγνωση του περιβάλλοντος στις δύο αυτές κατηγορίες καθώς και ανάλογα με την πηγή προέλευσης τους (τερματικά, δίκτυα πρόσβασης κλπ).

Πίνακας 2: Πληροφορίες που περιγράφουν τις τρέχουσες συνθήκες (context)

	<i>Στατικά</i>	<i>Δυναμικά</i>
<i>Χρήστες</i>	Κόστος, ασφάλεια, ποιότητα υπηρεσιών	-
<i>Δίκτυα</i>	Εύρος ζώνης, κάλυψη, θόρυβος, παραμόρφωση σήματος, ποιότητα συνδέσμου, επίπεδα ασφάλειας	Φορτίο συνδέσμου, εύρος ζώνης, καθυστέρηση, θόρυβος, παραμόρφωση σήματος, ρυθμός φορέα προς παρεμβολές CIR, ρυθμός σφάλματος ανά bit BER, διαθέσιμα σημεία πρόσβασης, ρυθμός σήματος προς παρεμβολές SIR, RSS
<i>Τερματικά</i>	Τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευής, διαθέσιμες διεπαφές δικτύου	Επίπεδο μπαταρίας, ταχύτητα, πληροφορίες τοποθεσίας, χρόνος σύνδεσης στο δίκτυο
<i>Εφαρμογές</i>	Ικανότητα προσαρμογής, τύποι υπηρεσιών και απαιτήσεις, ελάχιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης, κατανάλωση ισχύος, μέγιστος ρυθμός απωλειών και καθυστέρησης, προδιαγραφές κυκλοφορίας	Τύπος τρέχουσας εφαρμογής και αντίστοιχα χαρακτηριστικά με στατικά
<i>Πάροχοι</i>	Κέρδος, ασφάλεια, προτεραιότητα χρηστών	Ισορροπία φορτίου, τρέχουσα ποιότητα υπηρεσιών

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι στη σύγχρονη βιβλιογραφία που ακολουθούν την ιδέα στρατηγικών που βασίζονται στην επίγνωση του περιβάλλοντος (context aware). Ο αλγόριθμος AUHO, που προτείνεται στο [12], τον οποίο χρησιμοποιήσαμε ως βασικό μέτρο σύγκρισης στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε για τη διπλωματική αυτή εργασία, είναι ένας αλγόριθμος με επίγνωση του περιβάλλοντος (context aware), όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο αναλυτικότερα. Εμπίπτει στην κατηγορία αυτή, καθώς χρησιμοποιεί αρκετές πληροφορίες από τον Πίνακα 2 για να αποφασίσει αν χρειάζεται να γίνει μεταπομπή προς κάποιο νέο δίκτυο και ποιο δίκτυο είναι το καταλληλότερο για την εκάστοτε υπηρεσία που εκτελείται στο τερματικό. Στην Εικόνα 2-6 φαίνεται η δομή ενός αλγορίθμου με επίγνωση του περιβάλλοντος που χρησιμοποιεί πληροφορίες, όπως το εύρος ζώνης (bandwidth), το κόστος (cost), η αξιοπιστία του δικτύου (reliability), η κατάσταση της μπαταρίας (battery status) κ.λπ., για την επιλογή του καταλληλότερου δικτύου για να γίνει η μεταπομπή.



Εικόνα 2-6: Context aware αλγόριθμος για την επιλογή δικτύου πρόσβασης

Παρά το ευρύ ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας που καλύπτει την περιοχή αυτή στη σύγχρονη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν παρά ελάχιστοι context aware αλγόριθμοι που να ενσωματώνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα (energy efficiency) ως κριτήριο για την απόφαση κάθετης μεταπομπής [31]-[33]. Οι υπάρχουσες στρατηγικές επιτυγχάνουν εξοικονόμηση ενέργειας είτε α) μέσω της ελαχιστοποίησης του απαιτούμενου χρόνου για σάρωση και εντοπισμό των διαθέσιμων δικτύων WLAN [32], είτε β) μέσω της επιλογής του περισσότερο ενεργειακά αποδοτικού δικτύου πρόσβασης το οποίο προκύπτει ανάλογα με τις τρέχουσες συνθήκες κίνησης [31, 33].

Η κατανάλωση ενέργειας στην πλευρά του κινητού τερματικού μπορεί να συσχετιστεί με μια πληθώρα στατικών και δυναμικών παραμέτρων. Τέτοιες μπορεί να είναι η απόσταση του κινητού τερματικού από το σημείο πρόσβασης στο οποίο είναι συνδεδεμένο, οι παράμετροι κατανάλωσης ενέργειας των ασύρματων δικτύων πρόσβασης, τα ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε κινητού τερματικού που αφορούν την κατανάλωση ενέργειας σε αυτό, ο χρόνος διατήρησης της σύνδεσης στο εκάστοτε ασύρματο δίκτυο πρόσβασης κλπ. Στο [34] παρατηρούμε ότι η κατανάλωση ενέργειας μετριέται από άποψη χρόνου παραμονής της σύνδεσης στο εκάστοτε δίκτυο πρόσβασης με βάση ορισμένες σταθερές τιμές που αφορούν τις ξεχωριστές διεπαφές του κινητού τερματικού και τις εφαρμογές που εκτελούνται σε αυτό. Παρόμοια με αυτόν τον τρόπο επιλέξαμε να μετρήσουμε και εμείς την κατανάλωση ενέργειας στην πλευρά του κινητού τερματικού, όπως θα δούμε και στο κεφάλαιο 3.

2.2.4 Σύγκριση στρατηγικών απόφασης κάθετης μεταπομπής

Όπως αναφέραμε κα προηγουμένως οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι απόφασης μεταπομπής που βασίζονται μόνο στην τιμή του RSS δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ετερογενές περιβάλλον, στο οποίο υπερκαλύπτονται διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, καθώς δεν λαμβάνουν υπόψιν τις προτιμήσεις του χρήστη αλλά ούτε χρησιμοποιούν πληροφορίες από το περιβάλλον για την απόφαση κάθετης μεταπομπής. Μια στρατηγική απόφασης κάθετης μεταπομπής περιλαμβάνει πολύπλοκους συνδυασμούς και συμβιβασμούς. Στον Πίνακα 3 συνοψίζουμε τις στρατηγικές απόφασης κάθετης μεταπομπής που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο και τις συγκρίνουμε ως προς διάφορα χαρακτηριστικά.

Όπως παρατηρούμε από τον παρακάτω Πίνακα δεν υπάρχει τέλεια στρατηγική απόφασης κάθετης μεταπομπής, αλλά όλες οι στρατηγικές προσφέρουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης, όπως είναι η ασαφής λογική ή τα νευρωνικά δίκτυα, χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανάλυση πολύπλοκων προβλημάτων και προσφέρουν συνήθως υψηλή αποδοτικότητα αλλά και πολυπλοκότητα. Αντίθετα οι στρατηγικές που χρησιμοποιούν αλγόριθμους με επίγνωση του περιβάλλοντος, προσπαθούν να διασφαλίσουν ότι η υψηλή ευελιξία και η θεώρηση των προτιμήσεων του χρήστη είναι εξίσου σημαντικές με την αποδοτικότητα του αλγορίθμου για την επιλογή του καταλληλότερου δικτύου σε ένα ετερογενές ασύρματο περιβάλλον. Σε ότι αφορά την πολυπλοκότητα των μηχανισμών απόφασης κάθετης μεταπομπής, το οποίο συνδέεται άρρηκτα και με την κατανάλωση ενέργειας στο κινητό τερματικό, οι στρατηγικές που υλοποιούνται με τη βοήθεια νευρωνικών δικτύων είναι οι περισσότερο πολύπλοκες λόγω της σύνθετης τοπολογίας τους. Αντίθετα οι στρατηγικές με επίγνωση του περιβάλλοντος χρησιμοποιούν συχνά κλασικές μεθόδους MADM ή απλές συναρτήσεις, με αποτέλεσμα να είναι λιγότερο πολύπλοκες, πιο εύκολα υλοποιήσιμες και επομένως λιγότερο ενεργοβόρες. Τέλος οι στρατηγικές που χρησιμοποιούν ασαφή λογική έχουν τα πλεονεκτήματα ότι μπορούν να διαχειριστούν δεδομένα με σχετικές τιμές καθώς και ότι μπορούν να συνδυάζουν και να αξιολογούν πολλαπλά κριτήρια ταυτόχρονα. Η μέθοδος AUHO (AUtonomic HandOver) αποτελεί μια πολύ καλή υλοποίηση καθώς συνδυάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα των προηγούμενων στρατηγικών και για το λόγο αυτό την επιλέξαμε ως βασικό μέτρο σύγκρισης στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε.

Πίνακας 3: Σύγκριση στρατηγικών απόφασης κάθετης μεταπομπής [12]

Handover decision approach	Traditional RSS-based	CF	UC	MAD	AI	CA	AUHO
Multi criteria	No	Yes	Yes	Yes	Yes (FL) No (NN)	Yes	Yes
User Consideration	No	Low	High	Medium	Medium	High	High
Efficiency	Low	Medium	Medium	High	High	High	High
Flexibility	Low	High	High	High	Medium	High	High
Implementation Complexity	Low	Low	Low	Medium	High	Medium	High
Service type supported	Non-real-time	Non-real-time Real-time	Non-real-time	Non-real-time Real-time	Non-real-time Real-time	Non-real-time Real-time	Multiple types of services
Information model	No	No	No	No	No	No	Yes
Personalization	No	No	Yes	No	No	No	Yes
Feedback control loop	No	No	No	No	No	Yes	Yes
Objective	FR	FR	NFR	FR	FR	FR	FR and NFR

CF: Cost Function, UC: User Centric, MAD: Multiple Attribute Decision, AI: AI-based, CA: Context Aware, AUHO: προτεινόμενος αλγόριθμος
FR: Functional Requirements, NFR: Non-Functional Requirements

2.3 *Κινητά τερματικά (Mobile terminals)*

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, η διπλωματική αυτή εργασία έχει ως σκοπό να συγκρίνει διαφορετικούς αλγόριθμους απόφασης κάθετης μεταπομπής σε ένα περιβάλλον με διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες (RATs), ως προς την κατανάλωση ενέργειας που αποφέρουν στο κινητό τερματικό. Με τον όρο κινητό τερματικό αναφερόμαστε σήμερα ως επί το πλείστον σε smartphones και tablets. Η εταιρία GO-Gulf δημοσίευσε πρόσφατα μια πολύ ενδιαφέρουσα έρευνα, που περιείχε διάφορα στατιστικά στοιχεία σχετικά με την χρήση των smartphones για το 2012 [35]. Συγκεκριμένα στην έρευνα αυτή αναφερόταν ότι υπάρχουν προς το παρόν 1,08 δις smartphones παγκόσμια ενώ εννιά στους δέκα χρήστες τα χρησιμοποιούν σε καθημερινή βάση. Σε ό,τι αφορά τον τρόπο χρήσης αυτών, παρατηρούμε στην ίδια έρευνα ότι οι πιο συνηθισμένες δραστηριότητες για τους χρήστες των smartphones είναι οι εξής: ανταλλαγή γραπτών μηνυμάτων, περιήγηση στο διαδίκτυο, παιχνίδια, ανταλλαγή μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομίου (emails), χρησιμοποίηση διάφορων εφαρμογών, εισαγωγή σε ιστοσελίδες κοινωνικής δικτύωσης και αναπαραγωγή μουσικής/βίντεο.

Σχετικά με το προτιμώμενο λογισμικό στα smartphones παρατηρούμε ότι τα Android κατέχουν το 46,9% της παγκόσμιας αγοράς [36], στη δεύτερη θέση πλέον ακολουθούν τα iPhone με 28,7% [37], ενώ την τρίτη και τέταρτη θέση κατέχουν οι εταιρίες RIM (BlackBerry Ltd) και Microsoft με μερίδια 16,6% και 5,2% αντίστοιχα της αγοράς [38, 39]. Μια ακόμη σημαντική λεπτομέρεια στην ίδια έρευνα, η οποία σχετίζεται και με το αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής αυτής εργασίας, αναφέρεται στο ποια είναι η κατανάλωση δεδομένων και ποιος ο αριθμός των εφαρμογών που κατεβάζονται για κάθε πλατφόρμα λογισμικού. Σύμφωνα με την έρευνα οι χρήστες κινητών με λογισμικό Android καταναλώνουν το μεγαλύτερο ποσό (582 MByte/μήνα) ενώ οι χρήστες iPhone ακολουθούν με κατανάλωση 492 MByte/μήνα. Ωστόσο συγκρίνοντας το μερίδιο αγοράς που κατέχουν οι χρήστες iPhone έναντι αυτών που χρησιμοποιούν Android παρατηρούμε ότι η κατανάλωσή τους είναι μεγαλύτερη αναλογικά, το οποίο επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι οι χρήστες iPhone κατεβάζουν κατά μέσο όρο 48 εφαρμογές ανά μήνα ενώ οι χρήστες Android μόλις 35.

Καθώς η διπλωματική αυτή εργασία εστιάζει κυρίως στις μεταπομπές μεταξύ κυψελωτών δικτύων τρίτης (UMTS, HSPA+) και τέταρτης γενιάς (4G-LTE) και δικτύων WLAN, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, σε ό,τι αφορά την κατανάλωση ενέργειας, η ανάλυση των εφαρμογών που τείνουν να χρησιμοποιούνται περισσότερο στα δίκτυα αυτά. Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποίησε η εταιρία Informa telecoms & media τα δίκτυα WLAN αποτελούν την πρώτη επιλογή των χρηστών για σύνδεση και μεταφορά δεδομένων ξεπερνώντας τα κυψελωτά δίκτυα, κατ' αναλογία τέσσερα προς ένα πολλές φορές [40]. Στον Πίνακα 4 παρατηρούμε ποιες είναι οι πέντε πιο δημοφιλείς υπηρεσίες για κυψελωτά δίκτυα και για δίκτυα Wi-Fi.

Πίνακας 4: Οι 5 πιο δημοφιλείς εφαρμογές για smartphones

Κυβελωτά δίκτυα	Δίκτυα WLAN
Περιήγηση (Browsing)	Περιήγηση (Browsing)
Facebook	YouTube
Φορητό σημείο πρόσβασης (Tethering)	Video και Audio Streaming
YouTube	Λήψη δεδομένων (Downloads)
Λήψη δεδομένων (Downloads)	iPlayer

Από τις υπηρεσίες αυτές, όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο, εμείς επιλέξαμε να εξετάσουμε τις εξής:

- *VoIP (Voice over IP)*: Το VoIP ή τηλεφωνία μέσω διαδικτύου είναι μια υπηρεσία, η οποία προσφέρει φωνητική συνομιλία σε πραγματικό χρόνο με σχετικά καλή ποιότητα πλέον και στην ουσία χωρίς κόστος. Για να το καταφέρει αυτό χρησιμοποιεί το Internet Protocol (IP) για να μεταδώσει τη φωνή σε μορφή πακέτου πάνω από το IP δίκτυο. Μπορεί να μην εμφανίζεται στον παραπάνω Πίνακα στις πέντε πιο δημοφιλείς υπηρεσίες κάποια εφαρμογή VoIP, ωστόσο όταν μιλάμε για τηλεπικοινωνίες δεν χωράει αμφιβολία ότι η φωνητική συνομιλία αποτελεί μια υπηρεσία πρωταρχικής σημασίας. Ενδεικτικό της ανάπτυξης των εφαρμογών VoIP είναι το γεγονός ότι αναλυτές της εταιρίας Infonetics Research διόρθωσαν πρόσφατα προηγούμενες δηλώσεις τους ισχυρίζοντας ότι τα συνολικά έσοδα για τους παρόχους υπηρεσιών VoIP θα ξεπεράσουν τα 76,1 δισεκατομμύρια δολάρια το 2015 [41].
- *Audio και Video Streaming*: Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες οι υπηρεσίες streaming πολυμεσικού περιεχομένου σε πραγματικό χρόνο αυξάνουν διαρκώς τη δημοτικότητά τους μεταξύ των χρηστών κινητής τηλεφωνίας, και προβλέπεται να λαμβάνουν περισσότερο από το 66% της παγκόσμιας διακίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας μέχρι το 2017 (πάνω από 51% το 2012) [42]. Εφαρμογές όπως του Youtube και Netflix αποτελούν καθημερινότητα για εκατομμύρια χρήστες παγκοσμίως, γεγονός που απεικονίζεται και στον Πίνακα 4.
- *FTP Download*: Όπως παρατηρούμε και από τον Πίνακα 4 η λήψη αρχείων/δεδομένων στα κινητά τηλέφωνα αποτελεί μια από τις πέντε πιο δημοφιλείς εφαρμογές τόσο για τα κυβελωτά δίκτυα όσο και για δίκτυα WLAN. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής, επιλέξαμε να ασχοληθούμε με τη λήψη δεδομένων μέσω του πρωτοκόλλου FTP, όπως θα δούμε αναλυτικότερα και στο επόμενο κεφάλαιο.

3

Κατανάλωση ενέργειας έξυπνων συσκευών

Τα τελευταία χρόνια με την ραγδαία εξέλιξη στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και την ανάπτυξη των έξυπνων συσκευών, η κατανάλωση ενέργειας αποτέλεσε σημείο κλειδί για τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών. Πληθώρα ερευνών έχει αναπτυχθεί σχετικά με τον έλεγχο και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας τόσο για την πλευρά των παρόχων τηλεπικοινωνιών όσο και για την πλευρά των χρηστών. Σε ότι αφορά τους παρόχους τηλεπικοινωνιών, η ανεπανάληπτη έκρηξη του όγκου δεδομένων, που μεταφέρονται μέσω των όλο και αναβαθμιζόμενων πολυμεσικών εφαρμογών, έχει προκαλέσει σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας στις εγκαταστάσεις και τα δίκτυα. Σύμφωνα με έρευνα της εταιρείας Digital Power Group, το επικοινωνιακό σύστημα καταναλώνει ετησίως 1.500 τεραβατώρες, το οποίο αντιστοιχεί στο 10% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας [43]. Χαρακτηριστικό του μεγέθους του προβλήματος αυτού αποτελεί το γεγονός, ότι τα κινητά τηλέφωνα και συσκευές σε παγκόσμιο επίπεδο απαιτούν περισσότερη ενέργεια από όση η Γερμανία και η Ιαπωνία συνολικά μαζί. Για τους δε χρήστες, η χρησιμοποίηση έξυπνων συσκευών τόσο για ψυχαγωγικούς σκοπούς όσο και για τη διεκπεραίωση εργασιών, τις οποίες παλαιότερα κάνανε παραδοσιακά σε υπολογιστές, έχει αναδείξει τον περιορισμένο χρόνο λειτουργίας τους ως τη σημαντικότερη ίσως αδυναμία τους σε σύγκριση με τους υπολογιστές. Αν και η ενεργειακή κατανάλωση των συσκευών αποτελεί μικρό μέρος της συνολικής ενεργειακής απαίτησης του τηλεπικοινωνιακού τομέα, είναι προφανές ότι ενδιαφέρει ιδιαίτερα τον κάθε χρήστη. Το άδειασμα της μπαταρίας και η ολοένα συχνότερη αναζήτηση του φορτιστή αποτελούν όλο και πιο συχνά συμπτώματα της χρήσης των σύγχρονων κινητών τηλεφώνων. Ως εκ τούτου η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στις έξυπνες συσκευές αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προτεραιότητες για τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών, με αποτέλεσμα

να έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες τα τελευταία χρόνια στον τομέα αυτό [7]-[9]. Η μεγαλύτερη μερίδα των ερευνών αυτών στοχεύει στην υλοποίηση ενεργειακά αποδοτικών λύσεων, οι οποίες θα μεγιστοποιήσουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των τερματικών. Η εργασία αυτή ακολουθώντας την παραπάνω τάση, εστιάζει επίσης στο πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας στα κινητά τερματικά και ιδιαίτερα στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, που μπορεί να επιτευχθεί στο πλαίσιο των κάθετων μεταπομπών. Συγκεκριμένα στην εργασία αυτή θα αξιολογήσουμε ορισμένους αλγόριθμους απόφασης κάθετης μεταπομπής, ως προς την κατανάλωση ενέργειας που αποφέρουν στο κινητό τερματικό, έτσι ώστε να διερευνηθεί το πως μπορούν να συνεισφέρουν στην επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας αυτού.

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρουμε αρχικά ορισμένες μεθοδολογίες και μοντέλα, που έχουν προταθεί στη σύγχρονη βιβλιογραφία για τη μέτρηση και την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας στα κινητά τηλέφωνα. Στη συνέχεια παραθέτουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά της πειραματικής συσκευής, που χρησιμοποιήσαμε για να πάρουμε πραγματικές μετρήσεις της κατανάλωσης ενέργειας της συσκευής, όταν αυτή συνδέεται σε διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RATs). Τέλος αναπτύσσουμε ένα προσεγγιστικό μοντέλο πρόβλεψης της κατανάλωσης ενέργειας του κινητού τηλεφώνου και συγκρίνουμε τα ασύρματα δίκτυα, που εξετάσαμε στις πειραματικές μετρήσεις, ως προς την κατανάλωση ενέργειας που αποφέρουν στο κινητό τηλέφωνο.

3.1 Μοντέλα μέτρησης κατανάλωσης ενέργειας στη σύγχρονη

βιβλιογραφία

Η μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα κινητό τερματικό αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία καθώς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, που συνδέονται τόσο με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής όσο και με τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον αλλά και τη συμπεριφορά του κάθε χρήστη ξεχωριστά. Με την ευρεία διάδοση των έξυπνων συσκευών, η κίνηση στην κινητή τηλεφωνία αυξήθηκε εντυπωσιακά. Οι έξυπνες συσκευές (smartphones) έχουν αναδειχθεί πλέον σε πλατφόρμες με ισχυρές υπολογιστικές ικανότητες, που παράγουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων. Έχουν γίνει έτσι αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας ζωής, με αποτέλεσμα να έχουν περιορίσει το χρόνο χρήσης των επιτραπέζιων υπολογιστών. Οι άνθρωποι τείνουν να χρησιμοποιούν πλέον τα smartphones και τα tablets για να διεκπεραιώσουν ενέργειες, τις οποίες παλαιότερα έκαναν παραδοσιακά σε υπολογιστές, τηλεοράσεις και κονσόλες παιχνιδιών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα στοιχεία που έδωσαν στη δημοσιότητα δύο από τις πιο διαδεδομένες ιστοσελίδες: το facebook και το amazon [44, 45]. Σύμφωνα με το πρώτο από τον

Μάρτιο του 2012 οι αμερικάνοι χρήστες αφιερώνουν περισσότερο χρόνο για πρόσβαση στην ιστοσελίδα του facebook από τα smartphones τους παρά από τον υπολογιστή τους, ενώ σύμφωνα με το δεύτερο τον Αύγουστο του 2012 οι πωλήσεις των ηλεκτρονικών βιβλίων στην ιστοσελίδα του amazon ξεπέρασαν για πρώτη φορά τις πωλήσεις των έντυπων βιβλίων.

Από τα παραπάνω δεν είναι δύσκολο να καταλήξει κανείς, στο ότι η κατανάλωση ενέργειας που οφείλεται στη χρήση των smartphones έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Για να κατανοήσει κανείς την ποσότητα της ενέργειας που καταναλώνεται από τις έξυπνες συσκευές σήμερα, η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει το διεθνές σύστημα επικοινωνίας παγκόσμια ισούται με την ηλεκτρική ενέργεια που χρειαζόταν ο πλανήτης, για όλες τις χρήσεις, το 1985. Συγκεκριμένα σύμφωνα με έρευνα της εταιρείας Digital Power Group, το επικοινωνιακό σύστημα καταναλώνει ετησίως 1.500 τεραβατώρες (Twh, δηλαδή ένα δισεκατομμύριο κιλοβατώρες), το οποίο αντιστοιχεί στο 10% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας [43]. Ας σημειωθεί ότι με μια τεραβατώρα ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται η ηλεκτροδότηση περίπου 90.000 κατοικιών για έναν ολόκληρο χρόνο.

Με τη ραγδαία ανάπτυξη όμως νέων και καινοτόμων εφαρμογών για τις έξυπνες συσκευές, η πρόοδος στην τεχνολογία των μπαταριών δεν διατηρήθηκε στον ίδιο ρυθμό με τις αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις αυτών. Ως εκ τούτου τα τελευταία χρόνια η μέτρηση και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κινητά τηλέφωνα αποτελεί σημαντικό θέμα για τις εταιρίες τηλεπικοινωνιών. Οι έρευνες, που μελετούν την εξοικονόμηση ενέργειας στα κινητά τερματικά στη σύγχρονη βιβλιογραφία, διαχωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες. Στην *πρώτη κατηγορία* εμπίπτουν οι έρευνες που έχουν γίνει με σκοπό την εύρεση θεωρητικών μοντέλων για την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας στα κινητά τερματικά, ενώ στη *δεύτερη κατηγορία* ανήκουν οι έρευνες που έχουν αντικείμενο μελέτης την εύρεση στρατηγικών μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας στα κινητά τερματικά. Η παρούσα διπλωματική εργασία εμπίπτει στην πρώτη κατηγορία, καθώς συγκρίνουμε τη συμπεριφορά διαφορετικών αλγόριθμων απόφασης κάθετης μεταπομπής σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας που αποφέρουν στην πλευρά του κινητού τερματικού. Αρκετές έρευνες έχουν ασχοληθεί ήδη με την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας του κινητού τερματικού κατά την σύνδεσή του σε διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης. Στο [46] ο Junxian Huang και άλλοι ερευνητές κατέληξαν εμπειρικά σε ένα μοντέλο εκτίμησης της κατανάλωσης ενέργειας του τερματικού όταν συνδέεται σε δίκτυα 4G-LTE και WLAN, που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P = a_u t_u + a_d t_d + \beta$$

όπου a_u , a_d (mW/Mbps) και β (mW) είναι αριθμητικοί συντελεστές και t_u και t_d οι ρυθμοί διέλευσης (throughput) σε Mbps για τη ζεύξη ανόδου (uplink) και καθόδου (downlink) αντίστοιχα.

Παρόμοια στο [47] οι Aaron Carroll και Gernot Heiser κατέληξαν έπειτα από πειραμάτα σε ορισμένα μοντέλα για την κατανάλωση ενέργειας για διάφορες εφαρμογές (video, sms, voice call κλπ) όταν συνδέονται σε δίκτυο 3G. Συγκεκριμένα ανέπτυξαν βάσει πειραμάτων ορισμένα μοντέλα για την κατανάλωση ενέργειας ως προς το χρόνο για διάφορες εφαρμογές, όπως βλέπουμε παρακάτω:

$$E_{\text{audio}}(t) = 0,32W \times t$$

$$E_{\text{video}}(t) = (0,45W + P_{\text{BL}}) \times t$$

$$E_{\text{sms}}(t) = (0,3W + P_{\text{BL}}) \times t$$

$$E_{\text{call}}(t) = 1,05W \times t$$

$$E_{\text{web}}(t) = (0,43W + P_{\text{BL}}) \times t$$

$$E_{\text{email}}(t) = (0,61W + P_{\text{BL}}) \times t$$

όπου P_{BL} είναι η κατανάλωση ενέργειας λόγω της φωτεινότητας της οθόνης σε Watt. Όσες εφαρμογές δεν συνυπολογίζουν τον όρο P_{BL} θεωρείται ότι εκτελούνται με κλειστή την οθόνη.

Στο [48] ο G. Kalic και άλλοι αναπτύξανε ενεργειακά μοντέλα για τα δίκτυα Bluetooth, Wi-Fi και 3G συναρτήσει του χρόνου σύνδεσης της συσκευής στο δίκτυο και του μεγέθους των δεδομένων που μεταφέρονται (Πίνακες 5,6). Στις παρακάτω σχέσεις το y αναφέρεται στο ποσοστό της μπαταρίας που θα καταναλωθεί, όταν η συσκευή είναι συνδεδεμένη στο εκάστοτε δίκτυο για κάποιο χρονικό διάστημα ή για να μεταφέρει μια συγκεκριμένη ποσότητα δεδομένων.

Πίνακας 5: Κατανάλωση ενέργειας ως συνάρτηση της ποσότητας των δεδομένων [GB] που μεταφέρονται

	Download	Upload
Bluetooth	$y = 24,58x + 0,18$	$y = 17,09x - 0,53$
Wifi	$y = 17,01x - 0,93$	$y = 17,31x - 2,28$
3G	$y = 31,74x + 2,15$	$y = 71,27x - 0,03$

Πίνακας 6: Κατανάλωση ενέργειας ως συνάρτηση του χρόνου σύνδεσης [ώρες] στο δίκτυο

	Download	Upload
Bluetooth	$y = 9,53x - 0,39$	$y = 9,01x + 0,84$
Wifi	$y = 18,09x + 0,17$	$y = 21,24x - 2,68$
3G	$y = 20,59x - 1,09$	$y = 15,31x + 2,67$

Τέλος στο [49] η Karina Gomez και άλλοι ερευνητές πρότειναν μια διαφορετική σχέση για την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας στο τερματικό όταν συνδέεται σε δίκτυα Wi-Fi και WiMAX για αποστολή και λήψη δεδομένων, που δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{WiFi} \left\{ \begin{array}{l} f_{Tx}(x) = \begin{cases} 0,024x + 4,62 & , \text{αν } 0 \leq x \leq 32 \text{ Mb/s,} \\ 5,396 & , \text{αν } 32 \leq x \leq 54 \text{ Mb/s,} \end{cases} \\ f_{Rx}(x) = \begin{cases} 0,016x + 4,677, & \text{αν } 0 \leq x \leq 32 \text{ Mb/s,} \\ 5,193 & , \text{αν } 32 \leq x \leq 54 \text{ Mb/s,} \end{cases} \\ \text{με } s = 1280 \text{ bytes} \end{array} \right.$$

Αντίστοιχα ορίζεται και η εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας για δίκτυα WiMAX.

$$\text{WiMAX} \left\{ \begin{array}{l} f_{Tx}(x) = \begin{cases} 0,024x + 4,62 & , \text{αν } 0 \leq x \leq 32 \text{ Mb/s,} \\ 5,396 & , \text{αν } 32 \leq x \leq 54 \text{ Mb/s,} \end{cases} \\ f_{Rx}(x) = \begin{cases} 0,016x + 4,677, & \text{αν } 0 \leq x \leq 32 \text{ Mb/s,} \\ 5,193 & , \text{αν } 32 \leq x \leq 54 \text{ Mb/s,} \end{cases} \\ \text{με } s = 1280 \text{ bytes} \end{array} \right.$$

Οι παραπάνω έρευνες όπως παρατηρούμε στηρίχθηκαν σε πειράματα που έγιναν σε πραγματικές συνθήκες σε διάφορες έξυπνες συσκευές. Όπως έχουμε αναφέρει η εκτίμηση της πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας ενός κινητού τερματικού αποτελεί πολύπλοκη διαδικασία καθώς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και διαφέρει από συσκευή σε συσκευή. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρήσαμε αντίστοιχα και εμείς να αναπτύξουμε ένα θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την κατανάλωση ισχύος της μπαταρίας του κινητού τηλεφώνου, όταν συνδέεται σε διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RATs).

3.2 Πειραματική Συσκευή

Το κινητό τερματικό που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις ήταν το Samsung Galaxy S4 mini. Πρόκειται για ένα σύγχρονο έξυπνο τηλέφωνο τέταρτης γενιάς (4G), το οποίο έγινε διαθέσιμο στην ελληνική αγορά τον Ιούλιο του 2013. Λειτουργεί υπό λογισμικό Android και διαθέτει οθόνη υψηλής ευκρίνειας (high-resolution) καθώς και όλα τα τυπικά περιφερειακά στοιχεία των αντίστοιχων μοντέρνων έξυπνων συσκευών. Η συσκευή αυτή επιλέχθηκε, επειδή αποτελεί ένα σύγχρονο έξυπνο τηλέφωνο, που υποστηρίζει σύνδεση σε ασύρματα δίκτυα δεύτερης (GSM/GPRS/EDGE), τρίτης (UMTS/HSPA+) αλλά και τέταρτης γενιάς (LTE) και επειδή το λογισμικό Android παρέχει τη δυνατότητα να αντλήσουμε άμεσα πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της μπαταρίας του τηλεφώνου, όπως θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής αυτής καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7).

Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά Galaxy S4 mini

Τεχνικές προδιαγραφές Samsung S4 mini (GT-I9195)	
Κατασκευαστής	Samsung Electronics
Όνομα μοντέλου	Galaxy S4 mini (GT-I9195)
Διαστάσεις	124,6 * 61,3 * 8,9 mm
Βάρος	107 g
SoC	Qualcomm Snapdragon 400
CPU	1,7 GHz dual-core Krait 300
Μνήμη RAM	1,5 GB
Σκληρός δίσκος	8 GB (5 GB διαθέσιμα στο χρήστη)
SD - Card	SanDisk 2GB
Κάρτα γραφικών	Adreno 305
Συμβατά δίκτυα	2G GSM/GPRS/EDGE 3G UMTS/HSPA+ 4G LTE
Οθόνη	4,3 ίντσες RGB Super AMOLED 540x960 px qHD (256 PPI) Corning Gorilla Glass
Λειτουργικό σύστημα	Android 4.2.2 "Jelly Bean"
Μπαταρία	3,8 V Li-ion, 7,22 Wh

3.3 Μεθοδολογία μέτρησης της κατανάλωσης ενέργειας

Προς το παρόν οι περισσότερες έξυπνες συσκευές, όπως και το έξυπνο κινητό που χρησιμοποιήσαμε στις μετρήσεις μας (Πίνακας 7), τροφοδοτούνται από μπαταρίες ιόντων λιθίου [50]. Οι μπαταρίες αυτές έχουν γίνει δημοφιλείς, επειδή μπορούν να προσφέρουν πολλαπλάσιες ποσότητες ενέργειας και ταυτόχρονα μικρότερο μέγεθος από άλλου τύπου μπαταρίες. Αυτή τη στιγμή οι χημικοί μηχανικοί δεν μπορούν να αυξήσουν επαρκώς το ποσό ενέργειας, που δημιουργείται από τις χημικές αντιδράσεις στις μπαταρίες και επομένως ο μοναδικός τρόπος για τη δημιουργία πιο ισχυρών μπαταριών είναι να αυξήσουν το μέγεθός τους. Ωστόσο αυτό δεν συνάδει με την εξέλιξη των κινητών τηλεφώνων και τη μοντέρνα σχεδίασή τους, η οποία αφήνει ελάχιστο χώρο διαθέσιμο για τη μπαταρία. Οι κατασκευαστές καλούνται επομένως να βρουν μια χρυσή τομή μεταξύ του μεγέθους του κινητού τηλεφώνου, των τεχνικών χαρακτηριστικών του και της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, ώστε να προσφέρουν τη μέγιστη ικανοποίηση στους χρήστες. Εφόσον δεν είναι προς το παρόν εφικτή η δημιουργία πιο ισχυρών μπαταριών στο ίδιο μέγεθος, πολλές έρευνες και μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην εύρεση των περισσότερο ενεργοβόρων λειτουργιών στα κινητά τηλέφωνα, αλλά και στο πως μπορεί να περιοριστεί η κατανάλωση ενέργειας σε αυτά, ώστε να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια λειτουργίας τους.

Συμμερίζοντας την ανάγκη αυτή για περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κινητά τηλέφωνα, σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι να συγκρίνουμε διαφορετικούς αλγόριθμους απόφασης κάθετης μεταπομπής, ώστε να βρούμε ποιος μπορεί να αποφέρει τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, όταν ένα κινητό τηλέφωνο κινείται σε ένα ασύρματο ετερογενές περιβάλλον και συνδέεται σε διαφορετικά ασύρματα δίκτυα. Για να πραγματοποιήσουμε την αξιολόγηση αυτή πήραμε μετρήσεις για τρεις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RATs), που προσφέρει το δίκτυο γνωστού παρόχου στην Ελλάδα (UMTS, HSPA+ και LTE), και για ένα ασύρματο δίκτυο WLAN. Επίσης για κάθε ένα από τα παραπάνω δίκτυα εξετάσαμε τρεις διαφορετικές υπηρεσίες (VoIP, Streaming και FTP), όπως θα δούμε αναλυτικότερα και στην επόμενη ενότητα. Τις μετρήσεις αυτές τις πήραμε με τη βοήθεια εφαρμογής για Android, που αναπτύχθηκε σε συνεργασία με το εργαστήριο Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών της σχολής ΗΜΜΥ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την εφαρμογή αυτή μπορεί ο χρήστης να καταγράψει διάφορες πληροφορίες σχετικά με τη θέση του κινητού τηλεφώνου, το ασύρματο δίκτυο στο οποίο συνδέεται, την ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS αλλά και πληροφορίες, που αφορούν τη μπαταρία του κινητού τηλεφώνου, όπως η τάση στα άκρα της μπαταρίας του κινητού και η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τη μπαταρία. Τις πληροφορίες αυτές τις αντλήσαμε από ένα ειδικό αρχείο με όνομα uevent (/sys/class/power_supply/battery/uevent), που προσφέρει το λειτουργικό σύστημα Android [51]. Οι πληροφορίες που εμπεριέχονται στο αρχείο αυτό, ενδέχεται να διαφέρουν από συσκευή σε συσκευή. Το ίδιο ισχύει και για την συχνότητα ενημέρωσής του, η οποία γίνεται αυτόματα από τον οδηγό συσκευής της μπαταρίας (battery device driver) του Android, και μπορεί να είναι από ένα εκατοστό του δευτερολέπτου έως και 30-40 δευτερόλεπτα. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 8), παρουσιάζουμε ένα τυχαίο στιγμιότυπο του αρχείου αυτού, ώστε να εξηγήσουμε ποιες πληροφορίες από αυτές χρησιμοποιήσαμε.

Πίνακας 8: Αρχείο uevent στο λειτουργικό Android

Πληροφορίες αρχείου uevent για Samsung Galaxy S4 mini

```
POWER_SUPPLY_NAME=battery
POWER_SUPPLY_STATUS=Discharging
POWER_SUPPLY_CHARGE_TYPE=N/A
POWER_SUPPLY_HEALTH=Good
POWER_SUPPLY_PRESENT=1
POWER_SUPPLY_ONLINE=1
POWER_SUPPLY_TECHNOLOGY=Li-ion
POWER_SUPPLY_VOLTAGE_MAX_DESIGN=4350
POWER_SUPPLY_VOLTAGE_MIN_DESIGN=3400
POWER_SUPPLY_VOLTAGE_NOW=3677
POWER_SUPPLY_CAPACITY=21
POWER_SUPPLY_CURRENT_MAX=0
POWER_SUPPLY_CURRENT_NOW=-0.2848
POWER_SUPPLY_TEMP=381
POWER_SUPPLY_ENERGY_FULL=1940000000
POWER_SUPPLY_CHARGE_NOW=1433041
```

Για τον υπολογισμό της στιγμιαίας ισχύος της μπαταρίας του κινητού τηλεφώνου χρησιμοποιήσαμε τον τύπο:

$$P = V * I \quad (1)$$

όπου οι μονάδες μέτρησεις είναι για το P: Watt, για το V: Volt και για το I: Ampere. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επομένως για τον υπολογισμό της στιγμιαίας ισχύος είχαμε το εξής:

$$P[W] = \frac{POWER_SUPPLY_VOLTAGE_NOW * POWER_SUPPLY_CURRENT_NOW}{10^3} \quad (2)$$

όπου το POWER_SUPPLY_VOLTAGE_NOW μετριέται σε mVolt και το POWER_SUPPLY_CURRENT_NOW σε Ampere. Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας στο κινητό τηλέφωνο χρησιμοποιήσαμε επομένως τον παραπάνω τύπο και τις πληροφορίες από το αρχείο uevent. Με τη βοήθεια της παραπάνω εφαρμογής καταγράψαμε τις δύο αυτές τιμές, ενόσω ήμασταν συνδεδεμένοι σε κάποιο δίκτυο και κινούμασταν σε ένα χώρο, στον οποίο συνυπήρχαν διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RATs). Η καταγραφή των πληροφοριών γινόταν σε ένα .csv αρχείο, κάθε φορά που το κινητό τηλέφωνο άλλαζε γεωγραφική θέση (με βάση το GPS) ή μεταβαλλόταν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος RSS. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε ένα τυχαίο δείγμα από τις μετρήσεις, που πήραμε, όταν με το κινητό τηλέφωνο εκτελούσαμε μια υπηρεσία VoIP (Πίνακας 9). Πιο αναλυτικά σχετικά με τον τρόπο, με τον οποίο εκτελέσαμε τις τρεις υπηρεσίες (VoIP, Streaming και FTP Download) σε πραγματικό περιβάλλον, θα δούμε στο επόμενο υποκεφάλαιο.

Πίνακας 9: Log αρχείο της εφαρμογής για υπηρεσία VoiceCall

Μέτρηση τιμών για υπηρεσία VoiceCall για κυψελωτά δίκτυα																		
SImOperator	Location Area Code	Cell ID	Network Type	Latitude	Longitude	Altitude	Speed	Accuracy	RSS	Date	IMEI	Battery Level	Battery Voltage	Battery Temp	Battery Health	Battery Status	Current	Wifi Signal Strength
20201	3050	34475625	3	3.803.755.812	2.373.341.356	136	25,25	5	-63	2014_4_13_18_6_56	3,519E+14	88	4117	363	2	3	-0,2903	-200
20201	3050	34475625	3	3.803.733.449	2.373.329.341	136	26,5	5	-63	2014_4_13_18_6_57	3,519E+14	88	4117	363	2	3	-0,265	-200
20201	3050	34475621	15	3.803.733.449	2.373.329.341	136	26,5	5	-65	2014_4_13_18_6_57	3,519E+14	88	4117	363	2	3	-0,6294	-200
20201	3050	34475621	15	3.803.712.886	237.331.575	138	27	5	-65	2014_4_13_18_6_58	3,519E+14	88	4117	363	2	3	-0,5056	-200
20201	3050	34475621	15	3.803.690.168	2.373.301.182	137	28	6	-65	2014_4_13_18_6_59	3,519E+14	88	4117	363	2	3	-0,4306	-200
20201	3050	34475621	15	3.803.672.402	2.373.287.173	137	25,75	5	-65	2014_4_13_18_7_0	3,519E+14	88	4117	363	2	3	-0,5121	-200
20201	3050	34475621	15	3.803.672.402	2.373.287.173	137	25,75	5	-67	2014_4_13_18_7_0	3,519E+14	88	4117	363	2	3	-0,4575	-200
20201	3050	34475621	15	3.803.652.156	2.373.272.197	137	25,75	5	-67	2014_4_13_18_7_1	3,519E+14	88	4117	363	2	3	-0,5778	-200
Μέτρηση τιμών για υπηρεσία VoiceCall για δίκτυα WLAN																		
20201	4009	13314	13	380.956.894	23.806.128	0	0	28	-59	2014_4_16_12_24_31	3,519E+14	88	4029	280	2	3	-0,3499	-50
20201	4009	13314	13	380.957.626	23.805.967	0	0	23	-63	2014_4_16_12_19_55	3,519E+14	89	4095	292	2	3	-0,3626	-51
20201	4009	13314	13	380.957.626	23.805.967	0	0	23	-63	2014_4_16_12_19_57	3,519E+14	89	4095	292	2	3	-0,2662	-51
20201	4009	13314	13	380.957.626	23.805.967	0	0	23	-65	2014_4_16_12_19_58	3,519E+14	89	4095	292	2	3	-0,3821	-53
20201	4009	13314	13	380.957.626	23.805.967	0	0	23	-61	2014_4_16_12_19_59	3,519E+14	89	4095	292	2	3	-0,3396	-53
20201	4009	13314	13	380.957.626	23.805.967	0	0	23	-55	2014_4_16_12_20_4	3,519E+14	89	4095	292	2	3	-0,308	-53
20201	4009	13314	13	380.957.626	23.805.967	0	0	23	-57	2014_4_16_12_20_6	3,519E+14	89	4095	292	2	3	-0,3511	-53
20201	4009	13314	13	380.956.894	23.806.128	0	0	28	-57	2014_4_16_12_24_7	3,519E+14	88	4029	280	2	3	-0,3106	-54
20201	4009	13314	13	380.956.894	23.806.128	0	0	28	-57	2014_4_16_12_24_8	3,519E+14	88	4029	280	2	3	-0,355	-54

* Στο πρώτο μισό έχουμε μετρήσεις για κυψελωτά δίκτυα και η πληροφορία για την ισχύ λαμβανόμενου σήματος (RSS) βρίσκεται στην στήλη RSS, ενώ στο δεύτερο μισό έχουμε μετρήσεις για δίκτυο WLAN και η πληροφορία για το RSS βρίσκεται στην στήλη Wifi Signal Strength.

Από το παραπάνω αρχείο με κόκκινο χρώμα είναι οι στήλες, οι οποίες περιέχουν πληροφορίες, που χρησιμοποιήσαμε για να βγάλουμε μια σχέση ανάμεσα στην ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS και την κατανάλωση ισχύος, όπως αυτή υπολογίζεται με βάση τη σχέση (2). Συγκεκριμένα χρειαστήκαμε όπως παρατηρούμε τις εξής πληροφορίες:

- Τύπος δικτύου (*Network Type*): Είναι ένας κωδικός, ο οποίος υποδηλώνει σε ποια τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης (RAT) είναι συνδεδεμένο το κινητό τηλέφωνο τη δεδομένη χρονική στιγμή. Η επεξήγηση των κωδικών γίνεται στον παρακάτω πίνακα (*Πίνακας 10*).
- Ισχύς λαμβανόμενου σήματος (*RSS*): Είναι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος RSS, που λαμβάνει το κινητό τηλέφωνο, όταν είναι συνδεδεμένο σε κάποιο κυψελωτό δίκτυο.
- Τάση Μπαταρίας (*Battery Voltage*): Είναι η ηλεκτρική τάση (διαφορά δυναμικού), που παρατηρείται στα άκρα της μπαταρίας του κινητού τηλεφώνου τη δεδομένη χρονική στιγμή και μετριέται σε mVolt.
- Ένταση ρεύματος (*Current*): Είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, που διαρρέει τη μπαταρία του κινητού τηλεφώνου τη δεδομένη χρονική στιγμή και μετριέται σε Ampere.
- Ισχύς λαμβανόμενου σήματος δικτύου WiFi (*WiFi Signal Strength*): Είναι η τιμή του λαμβανόμενου σήματος RSS, που λαμβάνει το κινητό τηλέφωνο, όταν είναι συνδεδεμένο σε κάποιο δίκτυο WLAN.

Πίνακας 10: Κωδικοί διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης [52]

Κωδικός	Τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης (RAT)
0	ΑΓΝΩΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ
1	GPRS
2	EDGE
3	UMTS
4	CDMA
5	EVDO_0
6	EVDO_A
7	1xRTT
8	HSDPA
9	HSUPA
10	HSPA
11	IDEN
12	EVDO_B
13	LTE
14	EHRPD
15	HSPA+

* Με έντονη γραμματοσειρά είναι τα RATs, τα οποία είχαμε τη δυνατότητα να εξετάσουμε.

3.4 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη ενότητα συνολικά εξετάσαμε τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης και τρεις διαφορετικές υπηρεσίες. Οι υπηρεσίες, που εκτελέσαμε στο κινητό κατά την διάρκεια των μετρήσεων, ήταν οι εξής:

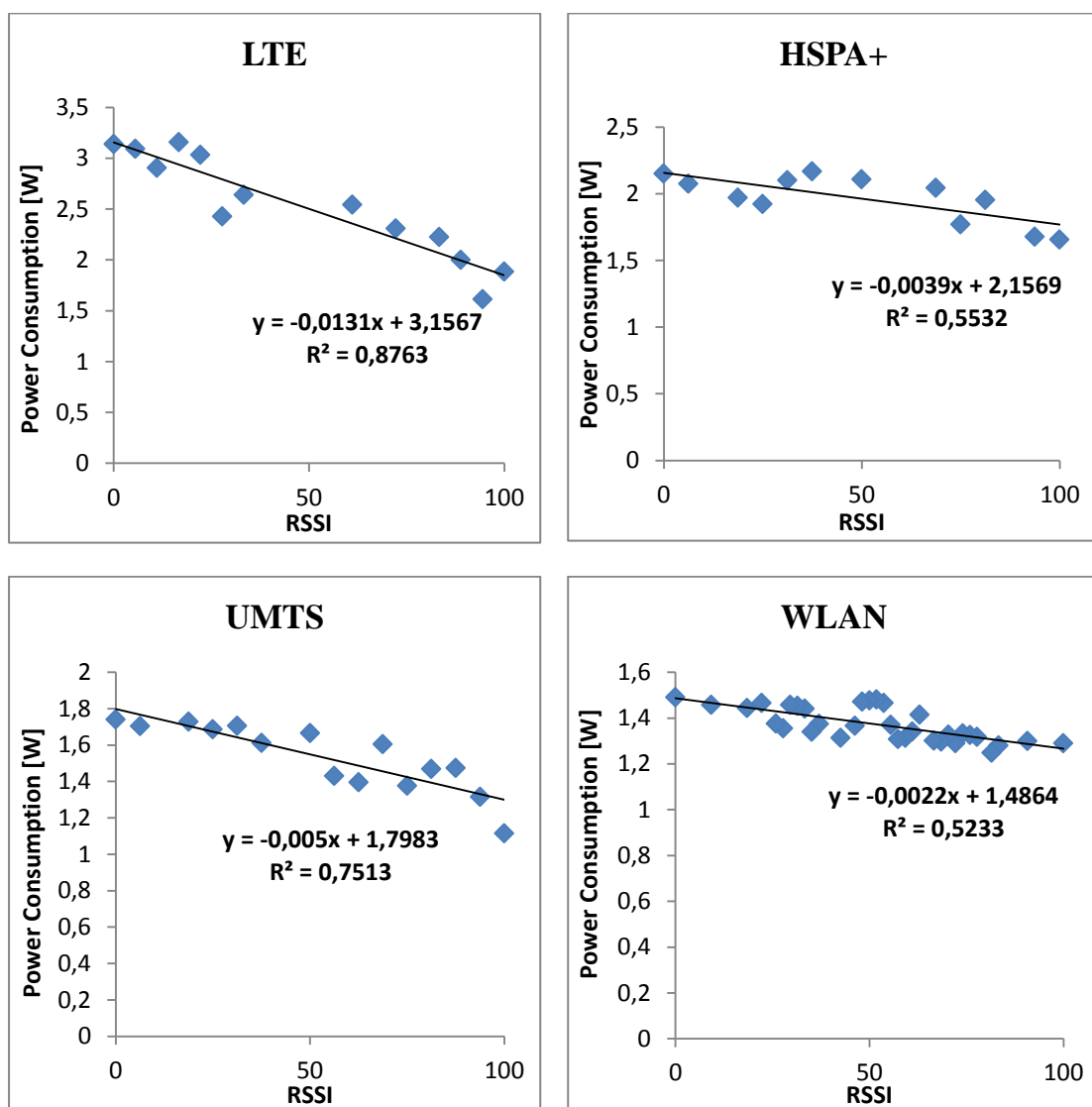
- *VoiceCall (VoIP)*
- *Streaming*, και
- *FTP Download*.

Χρησιμοποιώντας την εφαρμογή που αναπτύξαμε, αποφύγαμε στο μέγιστο την επαφή με το κινητό τηλέφωνο ή την διασύνδεσή του με άλλου τύπου όργανα για τις μετρήσεις, τα οποία θα επέφεραν κάποια αλλοίωση στα αποτελέσματα. Για κάθε μια από τις τρεις υπηρεσίες που εξετάσαμε, πρώτα ανοίγαμε την εφαρμογή μας, η οποία έτρεχε στο βάθος, και μετά εκτελούσαμε την εκάστοτε υπηρεσία, για την οποία επιθυμούσαμε να πάρουμε μετρήσεις. Καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων η οθόνη ήταν ανοιχτή και στο 25% της μέγιστης φωτεινότητας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν, καθώς κινούμασταν σε ένα περιβάλλον στο οποίο συνυπήρχαν διαφορετικά RATs γνωστού παρόχου τηλεπικοινωνιών (UMTS, HSPA+ και LTE), ενώ οι μετρήσεις για δίκτυο WLAN γίναν μέσω σύνδεσης σε οικιακό δίκτυο Wi-Fi.

Με βάση τις μετρήσεις αυτές σχεδιάσαμε τις γραφικές παραστάσεις (*Εικόνες 3-1, 3-2, 3-3*), στις οποίες στον άξονα-x έχουμε την ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS, όπως αυτή εκφράζεται ποσοτικά μέσω του δείκτη RSSI (Received Signal Strength Indicator) [53], και στον άξονα-y την κατανάλωση ισχύος $P[W]$, όπως την υπολογίσαμε με βάση τη σχέση (2), που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα. Ο δείκτης RSSI χρησιμοποιήθηκε για λόγους συμφωνίας με το πρόγραμμα HMNToolSuite. Η τιμή 0 δόθηκε στην χαμηλότερη τιμή RSS, που εντοπίσαμε στις μετρήσεις μας, η οποία και για τα τέσσερα δίκτυα ήταν περίπου -110dBm, ενώ η τιμή 100 δόθηκε στην υψηλότερη τιμή RSS, που εντοπίσαμε στις μετρήσεις, η οποία ήταν περίπου -60dBm. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη RSSI, τόσο ισχυρότερη είναι η ισχύς λαμβανόμενου σήματος, που ποιάνει το κινητό από το δίκτυο, στο οποίο είναι συνδεδεμένο. Για την ανάπτυξη του προσεγγιστικού μοντέλου για την κατανάλωση ισχύος στο κινητό τηλέφωνο, υπολογίσαμε μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων μια πολυωνυμική σχέση της μορφής $y = ax + b$, που συνδέει την κατανάλωση ισχύος P με την ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSSI. Στη σχέση αυτή το y αναφέρεται στην στιγμιαία κατανάλωση ισχύος $P[W]$ και το x στην ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSSI. Στη συνέχεια εισήγαμε τις σχέσεις αυτές στο πρόγραμμα HMNToolSuite, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

- **VoiceCall**

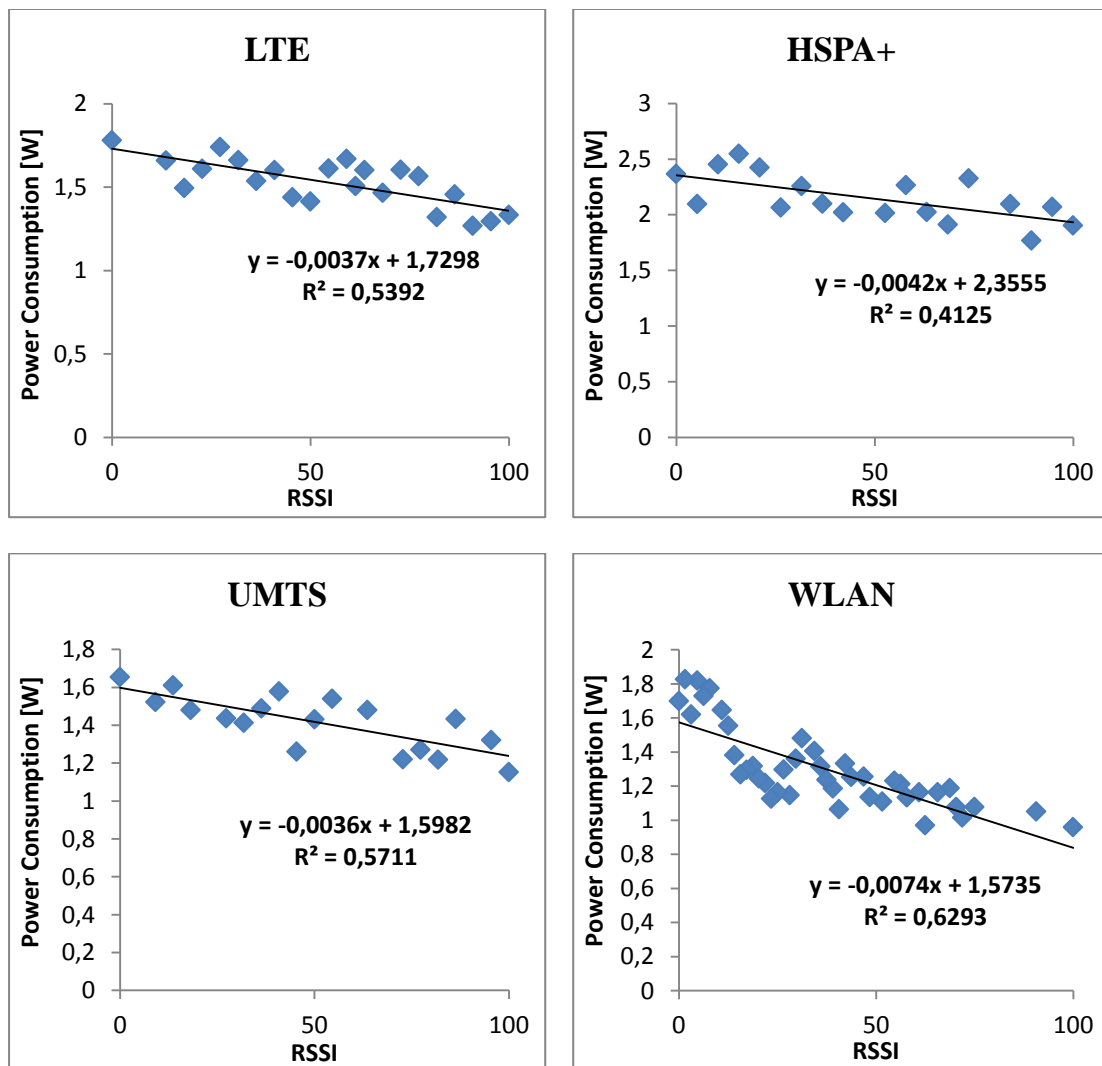
Για να εκτελέσουμε κλήσεις (εισερχόμενες και εξερχόμενες) μέσω ασύρματου δικτύου χρησιμοποιήσαμε την εφαρμογή Viber, η οποία διατίθεται δωρεάν για κινητά Android και iPhone [54]. Συνολικά πραγματοποιήσαμε πάνω από είκοσι κλήσεις, με διάρκεια από πέντε μέχρι δέκα λεπτά. Συγκεκριμένα πραγματοποιήσαμε κλήσεις προς άλλους χρήστες, τόσο του εσωτερικού όσο και του εξωτερικού, καθώς κινούμασταν σε ένα ασύρματο ετερογενές περιβάλλον. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την κατανάλωση ενέργειας της υπηρεσίας VoIP (Voice over IP) για τα τέσσερα διαφορετικά ασύρματα δίκτυα, φαίνονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις (Εικόνα 3-1).



Εικόνα 3-1: Κατανάλωση ενέργειας ως προς RSSI δικτύων LTE, HSPA+, UMTS και WLAN για υπηρεσία VoiceCall

- **Streaming**

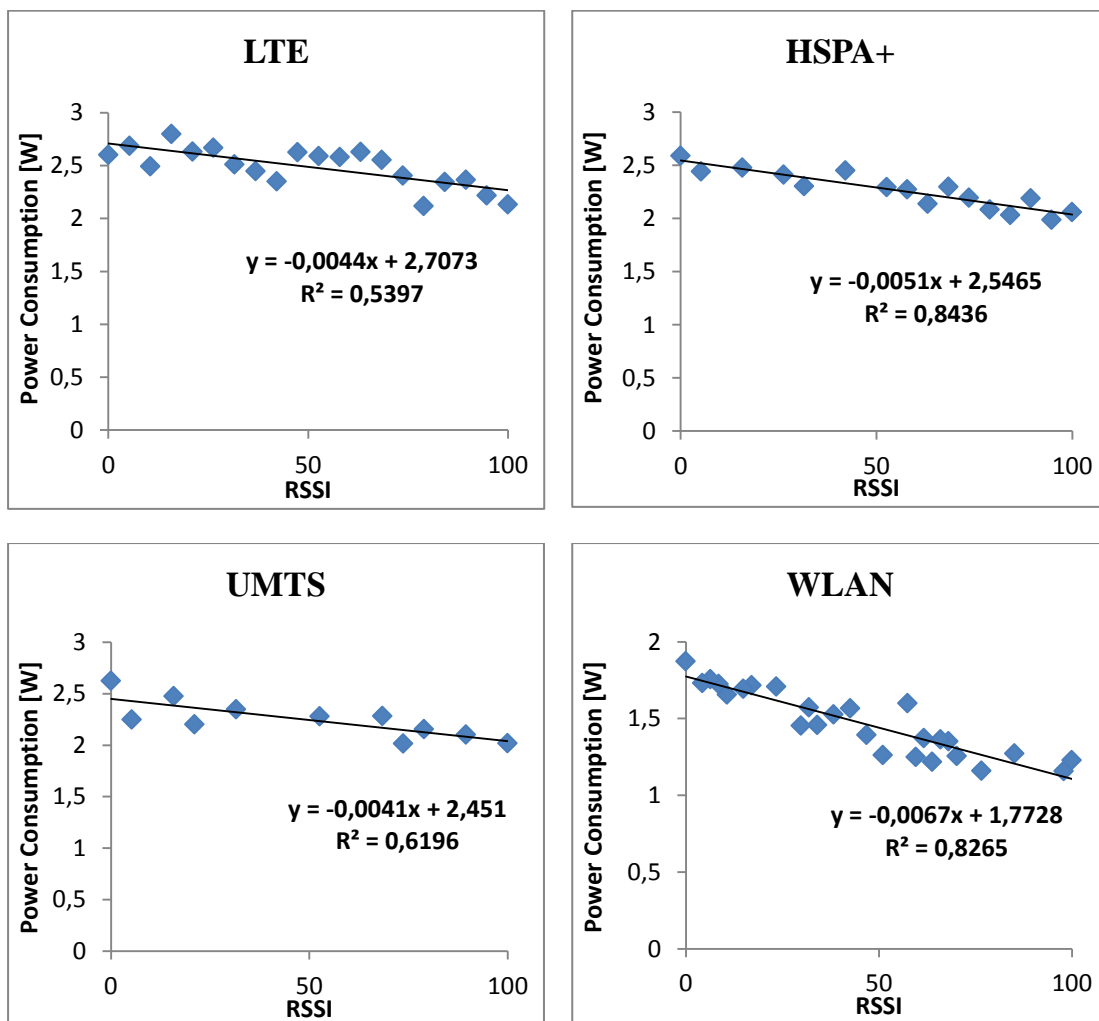
Αντίστοιχα για να προσομοιάσουμε μια υπηρεσία Streaming χρησιμοποιήσαμε την εφαρμογή YouTube, η οποία διατίθεται επίσης δωρεάν για κινητά Android και iPhone [55]. Σε αυτή την περίπτωση πήραμε μετρήσεις κάνοντας ζωντανό streaming multimedia περιεχομένου μεγέθους 3MB έως 8MB, ενόσω κινούμασταν σε ένα ασύρματο ετερογενές περιβάλλον με διαφορετικά RATs. Συγκεκριμένα κάναμε streaming οπτικοακουστικού περιεχομένου και ως έξοδο ήχου χρησιμοποιήσαμε τα ακουστικά του κινητού τηλεφώνου με μέγιστη ένταση στον ήχο. Όπως και για τις άλλες υπηρεσίες πρώτα ανοίγαμε την εφαρμογή για την καταγραφή της κατανάλωσης ενέργειας στο κινητό και στη συνέχεια κάναμε streaming του περιεχομένου, ώστε να πάρουμε μετρήσεις καθόλη τη διάρκεια αυτού. Τα αποτελέσματα, από τις μετρήσεις που πήραμε σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας για την υπηρεσία Streaming για τα τέσσερα διαφορετικά ασύρματα δίκτυα, φαίνονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις (Εικόνα 3-2).



Εικόνα 3-2: Κατανάλωση ενέργειας ως προς RSSI δικτύων LTE, HSPA+, UMTS και WLAN για υπηρεσία Streaming

- **FTP Download**

Η τρίτη υπηρεσία, για την οποία πήραμε μετρήσεις ήταν το FTP Download. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήσαμε την εφαρμογή AndFTP, η οποία διατίθεται επίσης δωρεάν για κινητά Android [56]. Η εφαρμογή αυτή παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας και διαχείρισης ftp server και ftp client, και στη συνέχεια την λήψη δεδομένων από τον server στον client μέσω πρωτοκόλλου FTP. Και σε αυτή την περίπτωση πήραμε μετρήσεις, ενόσω κινούμασταν σε ένα ασύρματο ετερογενές περιβάλλον με διαφορετικά RATs. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν πάνω από είκοσι μετρήσεις για λήψη αρχείων μεγέθους 10MB, 50MB και 100MB. Όπως και για τις προηγούμενες εφαρμογές πρώτα γινόταν εκκίνηση της εφαρμογής για την καταγραφή της κατανάλωσης ενέργειας στο κινητό και στην συνέχεια συνδεόμασταν στον ftp server για την λήψη του αρχείου, ώστε να μετρήσουμε την συνολική επιπλέον κατανάλωση ισχύος, που απαιτείται για την λήψη αρχείου μέσω πρωτοκόλλου FTP. Τα αποτελέσματα, από τις μετρήσεις για την κατανάλωση ενέργειας για υπηρεσία FTP Download για τα τέσσερα ασύρματα δίκτυα, φαίνονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις (Εικόνα 3-3).



Εικόνα 3-3: Κατανάλωση ενέργειας ως προς RSSI δικτύων LTE, HSPA+, UMTS και WLAN για υπηρεσία FTP Download

- **Επιβάρυνση λόγω κάθετης μεταπομπής**

Τέλος με βάση τις μετρήσεις, που πήραμε για τα διαφορετικά RATs, μετρήσαμε και την επακριβή επιβάρυνση στην κατανάλωση ισχύος της μπαταρίας του κινητού, όταν πραγματοποιείται κάθετη μεταπομπή. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν, ότι η κάθετη μεταπομπή από ή προς δίκτυο HSPA+ επιφέρει μια ελάχιστα μεγαλύτερη επιβάρυνση στην κατανάλωση ισχύος, ενώ η μικρότερη επιβάρυνση παρατηρήθηκε, όταν υπήρχε κάθετη μεταπομπή ανάμεσα στα δίκτυα LTE και UMTS. Αντίστοιχες μελέτες έχουν καταδείξει λίγο διαφορετικές τιμές για την επιβάρυνση, που επιφέρει η διαδικασία κάθετης μεταπομπής στο κινητό. Για παράδειγμα στο [57] οι Hyun-Ho Choi και Dong-Ho Cho υπολόγισαν μια σταθερή επιβάρυνση της τάξεως των 0,22 Watt, ανεξάρτητα με το ποια ασύρματα δίκτυα εμπλέκονται στην διαδικασία της κάθετης μεταπομπής. Ενώ στο [58] οι G.P. Perrucci, F.H.P Fitzek και J. Widmer υπολόγισαν ότι η επιβάρυνση στην κατανάλωση ισχύος του τερματικού, όταν συμβαίνει κάθετη μεταπομπή από δίκτυο 2G σε δίκτυο 3G είναι 1,389 Watt, ενώ όταν συμβαίνει κάθετη μεταπομπή από δίκτυο 3G σε δίκτυο 2G είναι 0,591 Watt. Οι διαφορές παρατηρούμε ότι είναι μικρές και δεν αλλοιώνουν σημαντικά την γενική εικόνα της κατανάλωσης ισχύος στο κινητό. Στον πίνακα που ακολουθεί παραθέτουμε τα αποτελέσματα σχετικά με την επιβάρυνση στην κατανάλωση ισχύος του κινητού, όταν γίνεται κάθετη μεταπομπή, με βάση τις μετρήσεις που πήραμε για τις τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης που εξετάσαμε (Πίνακας 11).

Πίνακας 11: Κατανάλωση ισχύος λόγω κάθετης μεταπομπής

Κάθετη μεταπομπή	Κατανάλωση ισχύος [W]
LTE ↔ UMTS	0,2
LTE ↔ HSPA+	0,5
HSPA+ ↔ UMTS	0,5
WLAN ↔ UMTS	0,3
WLAN ↔ LTE	0,4
WLAN ↔ HSPA+	0,5

3.5 Συμπεράσματα πειραματικών μετρήσεων

Με βάση τις μετρήσεις και τα μοντέλα, που αναπτύξαμε παραπάνω μπορούμε να αξιολογήσουμε τώρα τα διαφορετικά RATs αλλά και τις διαφορετικές εφαρμογές ως προς την κατανάλωση ενέργειας, που αποφέρουν στο κινητό τηλέφωνο. Από τις γραφικές παραστάσεις της προηγούμενης ενότητας έχουμε συνολικά τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12). Ο δείκτης R^2 ονομάζεται συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination), έχει εύρος τιμών από 0,0 μέχρι 1,0 και υποδεικνύει

πόσο καλά τα δεδομένα ταιριάζουν σε ένα στατιστικό μοντέλο. Η τιμή 1 αναφέρεται στην απόλυτη ταύτιση του στατιστικού μοντέλου με τα πραγματικά δεδομένα. Όπως παρατηρούμε στις σχέσεις που βγάλαμε για τα μοντέλα προσέγγισης της κατανάλωσης ισχύος ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 λαμβάνει τιμές από 0,41 έως 0,88, που σημαίνει ότι έχουμε ικανοποιητική ταύτιση των θεωρητικών μοντέλων με τα πραγματικά δεδομένα.

Πίνακας 12: Μοντέλα κατανάλωσης ισχύος για διαφορετικά RATs και εφαρμογές

	VoiceCall	Streaming	FTP
LTE	$y = -0,0131x + 3,1567$ $R^2 = 0,8763$	$y = -0,0037x + 1,7298$ $R^2 = 0,5392$	$y = -0,0044x + 2,7073$ $R^2 = 0,5397$
HSPA+	$y = -0,0039x + 2,1569$ $R^2 = 0,5532$	$y = -0,0042x + 2,3555$ $R^2 = 0,4125$	$y = -0,0051x + 2,5465$ $R^2 = 0,8436$
UMTS	$y = -0,005x + 1,7983$ $R^2 = 0,7513$	$y = -0,0036x + 1,5982$ $R^2 = 0,5711$	$y = -0,0041x + 2,451$ $R^2 = 0,6196$
WLAN	$y = -0,0022x + 1,4864$ $R^2 = 0,5233$	$y = -0,0074x + 1,5735$ $R^2 = 0,6293$	$y = -0,0067x + 1,7728$ $R^2 = 0,8265$

Αξιολογώντας τα τέσσερα RATs ως προς την κατανάλωση ισχύος, που αποφέρουν στην μπαταρία του κινητού, με βάση τον παραπάνω πίνακα για τις τρεις διαφορετικές εφαρμογές πραγματοποιούμε τις εξής παρατηρήσεις:

- Το δίκτυο **WLAN** είναι το πιο οικονομικό σε ό,τι αφορά την κατανάλωση ισχύος στο κινητό και για τις τρεις εφαρμογές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά την μεταφορά των αρχείων, το πρότυπο WLAN περνάει κατευθείαν στο στάδιο της αδράνειας, κατά το οποίο η κατανάλωση ισχύος είναι πολύ μικρή [59]. Έναν ακόμη λόγο αποτελεί το γεγονός, ότι το στάδιο ανίχνευσης και σύνδεσης στο διαθέσιμο σταθμό βάσης, το οποίο συμβάλλει σημαντικά στην κατανάλωση ισχύος, παραλείφθηκε στις μετρήσεις. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων επιθυμία μας ήταν να μετρήσουμε επακριβώς την κατανάλωση ισχύος της λειτουργίας τριών εφαρμογών, όταν κινούμασταν σε ένα ασύρματο ετερογενές περιβάλλον, καθώς και την ισχύ που απαιτείται για τις κάθετες μεταπομπές μεταξύ των διαφορετικών RATs και όχι την ισχύ που απαιτείται για τη σύνδεση σε κάθε ένα από τα RATs. Καθώς ο χρόνος ζωής των μπαταριών είναι ένα μόνιμο πρόβλημα στις φορητές ασύρματες συσκευές, το πρότυπο 802.11 έχει δώσει αρκετή σημασία στο ζήτημα διαχείρισης ισχύος. Συγκεκριμένα ο σταθμός βάσης μπορεί να κατευθύνει έναν κινητό σταθμό έτσι ώστε να μεταπέσει σε κατάσταση νάρκης μέχρι να τον «αφυπνίσει» ρητά ο σταθμός βάσης ή ο χρήστης [15]. Επιπλέον οι περισσότερες σύγχρονες

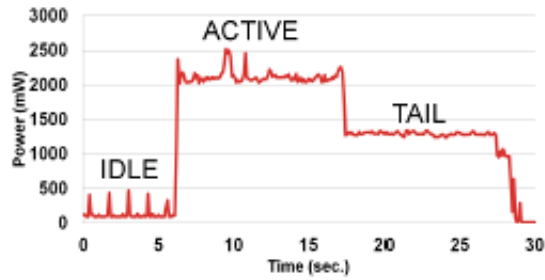
έξυπνες συσκευές όταν συνδέονται σε δίκτυα WLAN χρησιμοποιούν τη λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας (Power Save Mode), η οποία περιορίζει σημαντικά το κόστος διατήρησης της σύνδεσης στο δίκτυο.

- Το δίκτυο **4G-LTE** είναι το πιο ενεργοβόρο από τα τέσσερα δίκτυα για τις εφαρμογές VoiceCall και FTP και το δεύτερο πιο ενεργοβόρο για την εφαρμογή Streaming. Το γεγονός αυτό είναι φυσιολογικό, καθώς το δίκτυο LTE προσφέρει σημαντικά αυξημένες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και μεγαλύτερο εύρος κάλυψης, με αποτέλεσμα ο επεξεργαστής του κινητού να δουλεύει σε υψηλότερες συχνότητες και να καταναλώνει περισσότερη ισχύ. Ωστόσο η αυξημένη κατανάλωση ισχύος του δικτύου LTE οφείλεται και σε άλλους λόγους, που δεν σχετίζονται μόνο με την υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων [60]. Όλες οι σύγχρονες συσκευές, που υποστηρίζουν σύνδεση σε δίκτυο 4G-LTE, χρησιμοποιούν την τεχνολογία MIMO (Multiple Input - Multiple Output), με την οποία αποστέλλουν και λαμβάνουν πολλαπλές παράλληλες μεταδόσεις και όχι μόνο ένα σήμα. Προς το παρόν οι σύγχρονες συσκευές είναι εφοδιασμένες με δύο κεραίες για την μετάδοση δύο σημάτων παράλληλα και κάθε μια απαιτεί τον δικό της ενισχυτή ισχύος. Επίσης, με τον τρόπο που έχουν δομηθεί τα σύγχρονα δίκτυα τέταρτης γενιάς, η σύνδεση σε αυτά απαιτεί παράλληλα σύνδεση και στο αντίστοιχο δίκτυο τρίτης γενιάς του παρόχου. Έτσι η συσκευή είναι ταυτόχρονα συνδεδεμένη σε δύο δίκτυα με αποτέλεσμα να καταναλώνει περισσότερη ισχύ για την διατήρηση της σύνδεσης. Μάλιστα οι συσκευές, που υποστηρίζουν πρόσβαση σε δίκτυο 4G-LTE, είναι «συνεξαρτώμενες», με την έννοια ότι σαρώνουν συνεχώς τις συχνότητες των ραδιοκυμάτων, ακόμα κι αν η οθόνη είναι κλειστή, για να προσδιορίσουν σε ποιο σταθμό βάσης συμφέρει να συνδεθούν. Ως εκ τούτου όσο πιο πολλά είναι τα διαθέσιμα RATs, τόσο πιο πολλές επιλογές έχει η συσκευή να ελέγξει και να αξιολογήσει. Τέλος ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας της υψηλής κατανάλωσης ισχύος του δικτύου 4G-LTE κρύβεται πίσω από τον λόγο που κάθε νέα ασύρματη τεχνολογία προσφέρει γρηγορότερες ταχύτητες μετάδοσης από την προηγούμενη. Καθώς εφευρίσκονται διαρκώς νέοι τρόποι να χωρέσουν περισσότερα bits πληροφορίας στην κυματομορφή, η αποκωδικοποίησή της γίνεται ταυτόχρονα όλο και πιο πολύπλοκη. Έτσι οι επεξεργαστές αναγκάζονται να χρησιμοποιήσουν περισσότερη υπολογιστική ισχύ του τηλεφώνου για τη διαμόρφωση και την αποδιαμόρφωση των ραδιοκυμάτων, το οποίο έχει αντίκτυπο με την σειρά του και στην κατανάλωση ισχύος.

Σε ότι αφορά τώρα τις τρεις διαφορετικές εφαρμογές, που εξετάσαμε κατά την διάρκεια των μετρήσεων παρατηρούμε, ότι στην περίπτωση της εφαρμογής Streaming το δίκτυο 4G-LTE αποτελεί την δεύτερη πιο ενεργοβόρα λύση μετά το δίκτυο HSPA+. Αυτό οφείλεται στον τρόπο που πήραμε τις μετρήσεις. Όπως αναφέραμε και στο

υποκεφάλαιο 3.4 για την εφαρμογή Streaming, πρώτα ενεργοποιούσαμε την εφαρμογή για την καταγραφή της κατανάλωσης ενέργειας στο κινητό και στη συνέχεια κάναμε streaming κάποιου πολυμεσικού περιεχομένου μέσω της εφαρμογής Youtube. Αφού τελείωνε το βίντεο τερματίζαμε στην συνέχεια και την εφαρμογή καταγραφής μετρήσεων. Οι δημοφιλείς υπηρεσίες video streaming σήμερα, όπως το YouTube και το Netflix χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο HTTP με προσαρμογή στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (HTTP adaptive bitrate). Ένας διακομιστής βίντεο (video server) περιέχει πολλά αρχεία, που κωδικοποιούν το ίδιο περιεχόμενο σε πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου και η ικανότητα του επεξεργαστή της συσκευής του πελάτη αξιολογούνται από το πρόγραμμα αναπαραγωγής βίντεο της συσκευής και ρυθμίζεται κατάλληλα η ποιότητα ροής του βίντεο. Τα αρχεία βίντεο στον διακομιστή κατακερματίζονται σε μικρά τμήματα (fragments), και στη συνέχεια μεταδίδονται σειριακά στον πελάτη μέσω του πρωτοκόλλου HTTP. Ανεξάρτητα από τη μορφή και το μέγεθος του βίντεο, ο διακομιστής ωθεί το περιεχόμενο που ζητήθηκε στην συσκευή του πελάτη, όσο οι συνθήκες του δικτύου το επιτρέπουν. Έτσι τελικά αν ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό αναπαραγωγής του βίντεο, αυτό αποθηκεύεται προσωρινά τοπικά στη συσκευή του πελάτη και αναπαράγεται στη συνέχεια.

Όσον αφορά τώρα τις μετρήσεις που πήραμε, στην περίπτωση του 4G-LTE λόγω της πολύ υψηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων που προσφέρει (~1800Kbyte/sec) συγκρητικά με την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων του δικτύου HSPA+ (~800Kbyte/sec), η συσκευή θα κατεβάσει και θα αποθηκεύσει τοπικά το περιεχόμενο πολύ γρήγορα και μετά θα το αναπαράγει απευθείας (buffering), χωρίς δηλαδή τη διασύνδεση στο δίκτυο. Όπως παρατηρούμε και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3-4), η κατανάλωση ισχύος για να κατεβάσει και να αποθηκεύσει το περιεχόμενο μια συσκευή, που είναι συνδεδεμένη σε δίκτυο 4G-LTE, ισούται με το επίπεδο Active. Όταν σταματήσει η μεταφορά δεδομένων, η συσκευή περνάει στην κατάσταση TAIL, κατά την οποία αναπαράγει πλέον το περιεχόμενο, που είναι αποθηκευμένο τοπικά, με πολύ μικρότερη κατανάλωση ισχύος. Τέλος στην κατάσταση Idle περνάει η συσκευή, όταν λήξει ο χρονοδιακόπτης T_{Tail} και στην κατάσταση αυτή προφανώς υπάρχει ελάχιστη κατανάλωση ισχύος [42]. Είναι επομένως λογικό στην περίπτωση της εφαρμογής Streaming το δίκτυο 4G-LTE να προσφέρει μικρότερη κατανάλωση ισχύος από το δίκτυο HSPA+ (Πίνακας 12), καθώς η συσκευή το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα θα είναι στις καταστάσεις Idle και Tail, κατά τις οποίες η κατανάλωση ισχύος είναι μικρότερη.



Εικόνα 3-4: Κατανάλωση ισχύος LTE για εφαρμογή Streaming

- Όσον αφορά τα δίκτυα **HSPA+** και **UMTS** παρατηρούμε ότι αποτελούν συνήθως τις μέσες λύσεις, πέρα από την εφαρμογή Streaming όπου το HSPA+ έχει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς το δίκτυο UMTS λόγω της χαμηλής του ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων (~300Kbyte/sec) δεν επιβαρύνει σημαντικά τη μπαταρία της συσκευής με αποτέλεσμα να αποτελεί και για τις τρεις εφαρμογές τη δεύτερη λιγότερο ενεργοβόρα λύση μετά το δίκτυο WLAN.

4

Περιβάλλον προσομοίωσης

Αφού εξετάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο την κατανάλωση ισχύος για διαφορετικές εφαρμογές και διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης σε πραγματικές συνθήκες, στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε τον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος HMNToolSuite που χρησιμοποιήσαμε για τις προσομοιώσεις, τους διαφορετικούς αλγόριθμους κάθετης μεταπομπής που θα συγκρίνουμε, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο εισήγαμε στο πρόγραμμα τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις του προηγούμενου κεφαλαίου. Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι απόφασης κάθετης μεταπομπής θα αξιολογηθούν στη συνέχεια στο επόμενο κεφάλαιο ως προς την κατανάλωση ισχύος που αποφέρουν στο κινητό τερματικό, ώστε να διερευνηθούν ποια είναι τα χαρακτηριστικά, που πρέπει να έχει ένας αλγόριθμος απόφασης κάθετης μεταπομπής και ποιες πληροφορίες πρέπει να λαμβάνει υπόψιν, ώστε να επιλέγει τα κατάλληλα ασύρματα δίκτυα που θα αποφέρουν την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος στο κινητό τερματικό.

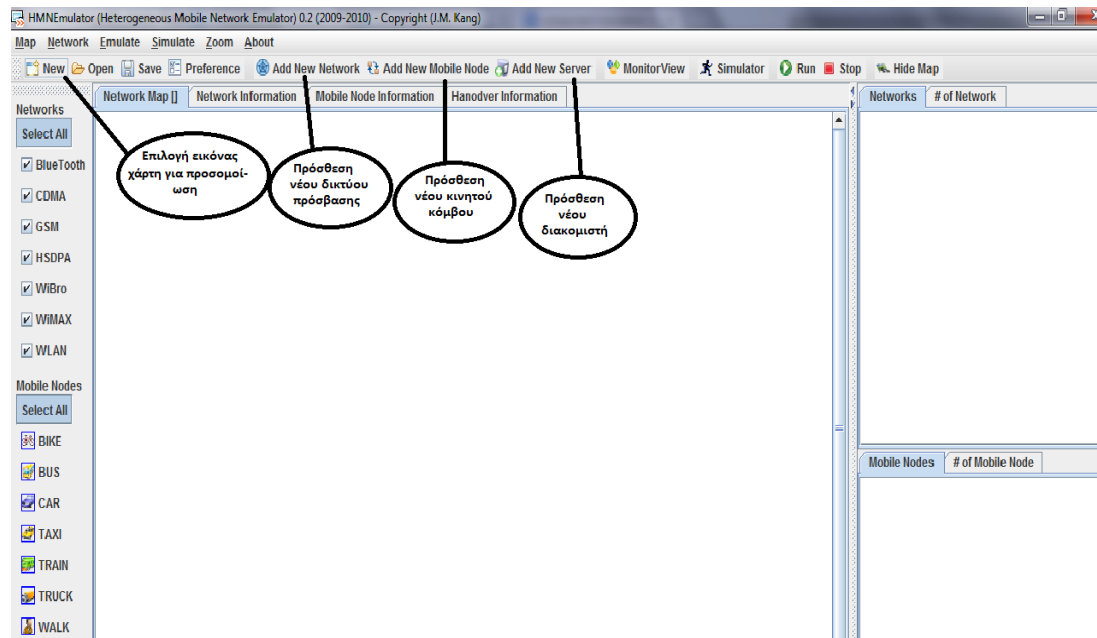
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε αρχικά το πρόγραμμα HMNToolSuite. Το πρόγραμμα αυτό το χρησιμοποιήσαμε για την προσομοίωση της διαδικασίας κάθετης μεταπομπής και την εξέταση της συμπεριφοράς διαφορετικών αλγορίθμων απόφασης κάθετης μεταπομπής ως προς την κατανάλωση ενέργειας, που αποφέρουν στην πλευρά του τερματικού. Αφού πρώτα εξηγήσουμε το πως λειτουργεί το συγκεκριμένο πρόγραμμα, θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια ορισμένους αλγόριθμους απόφασης κάθετης μεταπομπής, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης που εξετάσαμε στις προσομοιώσεις. Τέλος θα αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο μετρήσαμε την κατανάλωση ενέργειας μέσω του συγκεκριμένου προγράμματος.

4.1 Πρόγραμμα *HMNToolSuite*

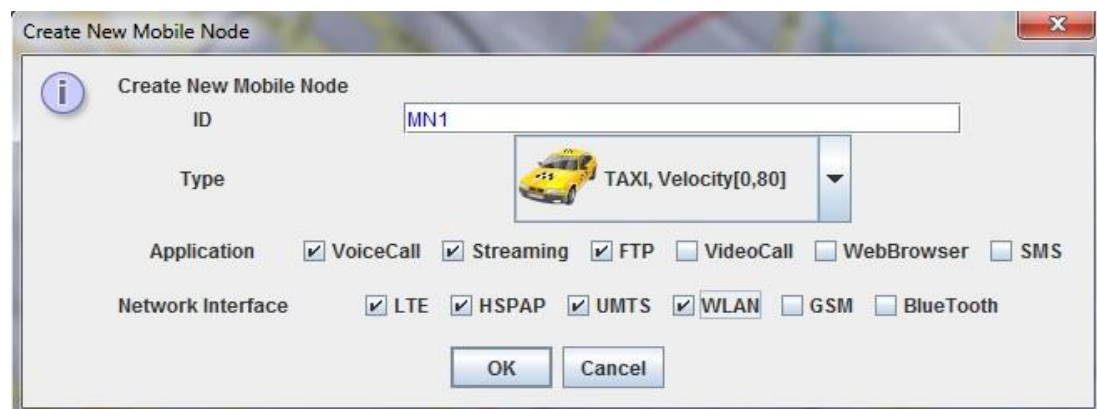
Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς αποτελούνται από ετερογενή ασύρματα δίκτυα και προορίζονται για να ικανοποιήσουν τις αυξανόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων κινητών τερματικών. Ένα προβλεπόμενο χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών θα είναι η υποστήριξη ευέλικτων και εξατομικεύσιμων από τους χρήστες πολιτικών απόφασης κάθετης μεταπομπής, οι οποίοι θα έχουν τη δυνατότητα να επιλέγουν το καταλληλότερο για αυτούς δίκτυο. Οι υπάρχοντες προσομοιωτές δικτύων (Ornet, NS-2, κλπ) έχουν επικεντρωθεί στην υλοποίηση πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου και δεν εξετάζουν τη διαδικασία απόφασης κάθετης μεταπομπής σε ένα ετερογενές ασύρματο περιβάλλον. Το πρόγραμμα *HMNToolSuite* αναπτύχθηκε από τον Joon-Myung Kang και αποτελεί ένα εργαλείο ελεύθερου κώδικα για την προσομοίωση ετερογενών ασύρματων δικτύων, που περιλαμβάνουν κινητούς κόμβους (mobile nodes), συσκευές δικτύου (network devices) και διακομιστές (servers) και εστιάζει στην μελέτη της διαδικασίας κάθετης μεταπομπής. Όπως περιγράφει και στην μελέτη του ο Joon-Myung Kang [12], το εργαλείο αυτό δεν αποτελεί ένα ανεξάρτητο προσομοιωτή σχεδιασμένο να αντικαταστήσει άλλους παραδοσιακούς προσομοιωτές, όπως ο NS-2, παρόλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ανεξάρτητα. Αντιθέτως έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιηθεί σαν βοηθητικό πρόγραμμα για τους προσομοιωτές αυτούς ώστε να μπορούν να μοντελοποιήσουν τη διαδικασία κάθετης μεταπομπής. Το πρόγραμμα αυτό δίνει δηλαδή τη δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει ένα ετερογενές ασύρματο περιβάλλον, στο οποίο συνυπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RATs) και να προσομοιώσει την κίνηση ενός κινητού τερματικού στο περιβάλλον αυτό, χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής.

Με τη βοήθεια του Network Map Creator ο χρήστης επιλέγει αρχικά την εικόνα ενός χάρτη και προσθέτει σε αυτόν σταθμούς βάσης ή σημεία πρόσβασης από επτά διαθέσιμα ασύρματα δίκτυα που παρέχει το πρόγραμμα (Bluetooth, GSM, HSPA+, LTE, UMTS, WiMAX και WLAN). Στη συνέχεια προσθέτει κινητούς κόμβους, επιλέγοντας πάλι τον τύπο που επιθυμεί ανάμεσα από επτά επιλογές (bike, bus, car, taxi, train, truck, walk). Για κάθε έναν από αυτούς, ο χρήστης πρέπει να ορίσει μέσω ευθύγραμμων τμημάτων την πορεία που θα ακολουθήσει κατά την προσομοίωση και να επιλέξει τον τύπο εφαρμογής και μία πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής. Στο πρόγραμμα έχουν υλοποιηθεί έξι διαφορετικοί τύποι υπηρεσιών (VoiceCall, Streaming, FTP, VideoCall, WebBrowser και SMS) καθώς και έξι διαφορετικές πολιτικές απόφασης κάθετης μεταπομπής (RSS-based, Cost-based, Quality-based, Lifetime-based, Random και AUHO), τις οποίες παρουσιάζουμε αναλυτικότερα στο επόμενο υποκεφάλαιο. Τέλος προσθέτει τους απαραίτητους διακομιστές (servers), οι οποίοι σύμφωνα με την υλοποίηση του προγράμματος συλλέγουν πληροφορίες, που αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων, την υπηρεσία που εκτελείται σε κάθε τερματικό και το προφίλ του χρήστη. Οι πληροφορίες αυτές είναι απαραίτητες προκειμένου να τροφοδοτήσουν τον αλγόριθμο απόφασης κάθετης μεταπομπής που

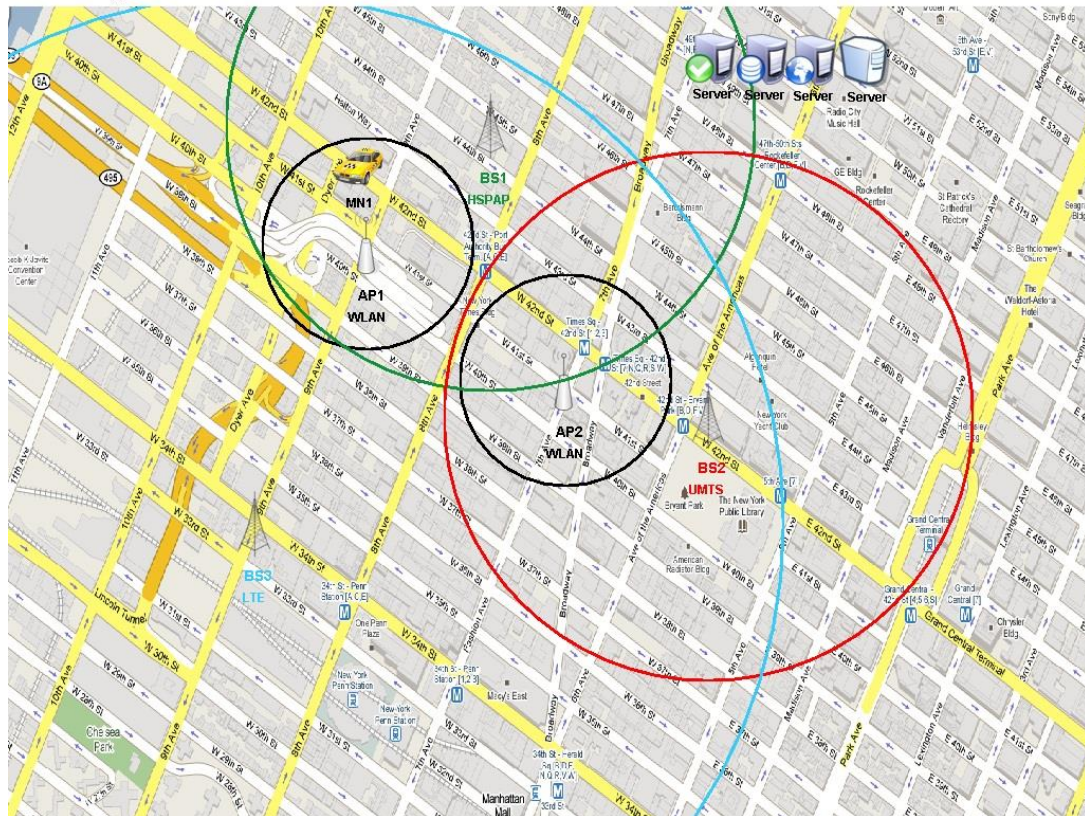
έχει οριστεί για κάθε τερματικό, ώστε να επιλέξει το καταλληλότερο δίκτυο για τον κάθε χρήστη. Το γραφικό περιβάλλον του Network Map Creator και το πώς γίνονται αυτά που περιγράψαμε παραπάνω, φαίνονται στην Εικόνα 4-1. Στην Εικόνα 4-2 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο επιλέγουμε τι τύπου υπηρεσίες μπορεί να εκτελέσει ο κινητός κόμβος και σε ποιες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης είναι εφικτό να συνδεθεί. Τέλος στην Εικόνα 4-3 δίνουμε ένα παράδειγμα ενός ολοκληρωμένου ετερογενούς ασύρματου περιβάλλοντος, στο οποίο έχουμε προσθέσει έναν κινητό κόμβο (ταξί) και πέντε σταθμούς βάσης από τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (HSPA+, LTE, UMTS και WLAN). Από κει και πέρα με τη βοήθεια του network simulator ξεκινάει η προσομοίωση, κατά την οποία ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρακολουθήσει την κίνηση κάθε κινητού κόμβου και τη σύνδεση του στο εκάστοτε ασύρματο δίκτυο πρόσβασης κάθε χρονική στιγμή και να καταγράψει πληροφορίες, που αφορούν την ισχύ λαμβανόμενου σήματος που λαμβάνει το τερματικό από κάθε σταθμό βάσης, καθώς και άλλες πληροφορίες που αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σταθμών βάσης.



Εικόνα 4-1: Network Map Creator



Εικόνα 4-2: Επιλογή χαρακτηριστικών κινητού κόμβου



Εικόνα 4-3: Στιγμιότυπο ετερογενούς ασύρματου περιβάλλοντος στο HMNTToolSuite

Για να κατανοήσει κανείς τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η διαδικασία κάθετης μεταπομπής στο πρόγραμμα αυτό πρέπει αρχικά να αναλύσουμε ορισμένες έννοιες. Καταρχήν πρέπει να αναφέρουμε ότι για την απόφαση της κάθετης μεταπομπής στο πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιούνται τέσσερις βασικές πληροφορίες, οι οποίες αναφέρονται στο πρόγραμμα ως προτιμήσεις του χρήστη (user preferences). Ονομάζονται έτσι, διότι ο ίδιος ο χρήστης μπορεί να ορίσει προαιρετικά την βαρύτητά τους αναθέτοντας σε κάθε πληροφορία τον κατάλληλο συντελεστή βάρους. Οι πληροφορίες αυτές είναι οι εξής:

- **RSS:** Η τιμή του μετριέται στο στρώμα σύνδεσης δικτύου και εξαρτάται από την απόσταση του κόμβου από τον σταθμό βάσης του δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένος.
- **Cost:** Αναφέρεται σε διαφορετικά μοντέλα κόστους και προκύπτει από την πολιτική κόστους που ακολουθεί ο κάθε πάροχος του κάθε ασύρματου δικτύου πρόσβασης.
- **Quality:** Η τιμή της πληροφορίας αυτής αφορά κάθε υπηρεσία ξεχωριστά και προκύπτει από ένα σύστημα κανόνων ασαφούς λογικής με βάση πληροφορίες όπως: το εύρος ζώνης (bandwidth), η καθυστέρηση (delay), η διακύμανση καθυστέρησης (jitter), ο ρυθμός σφάλματος bit (BER), ο ρυθμός διέλευσης (throughput), το σφάλμα ακολουθίας (burst error) και ο ρυθμός απώλειας

πακέτων (PLR) και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπηρεσιών που προσφέρει το κάθε δίκτυο.

- **Lifetime:** Η πληροφορία αυτή αναφέρεται στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του τερματικού και αποτελεί ένα συνδυασμό των ρυθμών κατανάλωσης ενέργειας κατά τη σύνδεση αλλά και όταν το κινητό τερματικό βρίσκεται σε αδράνεια. Οι τιμές αυτές διαφέρουν ανάλογα με το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης στο οποίο είναι συνδεδεμένο το κινητό τερματικό.

Δείκτης καταλληλότητας APAV

Για κάθε ασύρματο δίκτυο πρόσβασης, το οποίο βρίσκεται στην εμβέλεια του κινητού τερματικού, υπολογίζονται τέσσερις δείκτες APAV (Access Point Acceptance Value), ο οποίος αντιπροσωπεύουν την καταλληλότητα του συγκεκριμένου δικτύου με βάση τις προτιμήσεις (RSS, Cost, Quality και Lifetime) που έχει ορίσει ο χρήστης κάθε τερματικού. Το εύρος τιμών κάθε δείκτη APAV είναι από 0,0 μέχρι 1,0 και αποτελεί στην ουσία μια σχετική σύγκριση των δικτύων πρόσβασης, με την έννοια ότι αν ένα δίκτυο πρόσβασης έχει μεγαλύτερο δείκτη APAV από ένα δεύτερο για κάποιον χρήστη, τότε το πρώτο δίκτυο πρόσβασης θα είναι και καταλληλότερο για τον χρήστη αυτό. Κάθε σημείο πρόσβασης αξιολογείται επομένως από τους επιμέρους δείκτες $APAV_R$, $APAV_C$, $APAV_Q$ και $APAV_L$, που υπολογίζονται με βάση τις τέσσερις βασικές πληροφορίες RSS, Cost, Quality και Lifetime που είδαμε προηγουμένως.

- Ο δείκτης $APAV_R$ υπολογίζεται με βάση το δείκτη ισχύος λαμβανόμενου σήματος RSSI, ο οποίος αποτελεί μέτρηση της ισχύος ενός λαμβανόμενου ραδιοσήματος. Στη συνέχεια η τιμή του δείκτη RSSI, ο οποίος στην ουσία αποτελεί και την πληροφορία RSS που είδαμε προηγουμένως, κανονικοποιείται και έτσι προκύπτει τελικά η τιμή του $APAV_R$.
- Αντίστοιχα η τιμή του δείκτη $APAV_C$ προκύπτει από την κανονικοποίηση των σταθερών μοντέλων χρέωσης που έχουμε ορίσει για κάθε δίκτυο ασύρματης πρόσβασης.
- Ο υπολογισμός των δεικτών $APAV_Q$ και $APAV_L$ είναι περισσότερο πολύπλοκος και πραγματοποιείται με τη βοήθεια κανόνων ασαφούς λογικής. Για κάθε υπηρεσία που μπορεί να εκτελεστεί στο κινητό τερματικό υπάρχει ένα σετ κανόνων IF-THEN, το οποίο λαμβάνει ως είσοδο ορισμένα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων πρόσβασης και τα αξιολογεί κατά πόσο είναι κατάλληλα για την εκάστοτε υπηρεσία. Για παράδειγμα για να υπολογίσουμε το $APAV_Q$ ενός δικτύου πρόσβασης για μια υπηρεσία VoiceCall θα χρησιμοποιήσουμε τους παρακάτω κανόνες:

Πίνακας 13: Υπολογισμός δείκτη $APAV_Q$ για εφαρμογή Voice Call

Κανόνες ασαφούς λογικής για τον υπολογισμό του $APAV_Q$ υπηρεσίας VoiceCall

RULE 1: **IF** delay **IS** low **AND** jitter **IS** low **THEN** $APAV$ **IS** SA;
RULE 2: **IF** delay **IS** low **AND** jitter **IS** medium **THEN** $APAV$ **IS** WA;
RULE 3: **IF** delay **IS** low **AND** jitter **IS** high **THEN** $APAV$ **IS** NU;
RULE 4: **IF** delay **IS** medium **AND** jitter **IS** low **THEN** $APAV$ **IS** WA;
RULE 5: **IF** delay **IS** medium **AND** jitter **IS** medium **THEN** $APAV$ **IS** NU;
RULE 6: **IF** delay **IS** medium **AND** jitter **IS** high **THEN** $APAV$ **IS** WR;
RULE 7: **IF** delay **IS** high **AND** jitter **IS** low **THEN** $APAV$ **IS** NU;
RULE 8: **IF** delay **IS** high **AND** jitter **IS** medium **THEN** $APAV$ **IS** WR;
RULE 9: **IF** delay **IS** high **AND** jitter **IS** high **THEN** $APAV$ **IS** SR;

Παρατηρούμε ότι για τη μέτρηση της ποιότητας μιας υπηρεσίας VoiceCall σημαντικοί παράγοντες είναι η καθυστέρηση (delay) και η διακύμανση καθυστέρησης (jitter). Αντίθετα για την αξιολόγηση της ποιότητας μιας υπηρεσίας FTP και για τον υπολογισμό του $APAV_Q$ της υπηρεσίας αυτής, σημαντικοί παράγοντες είναι ο ρυθμός σφάλματος bit (BER), το σφάλμα ακολουθίας (burst error) και ο ρυθμός απώλειας πακέτων (Packet Loss Ratio), όπως παρατηρούμε στους παρακάτω κανόνες:

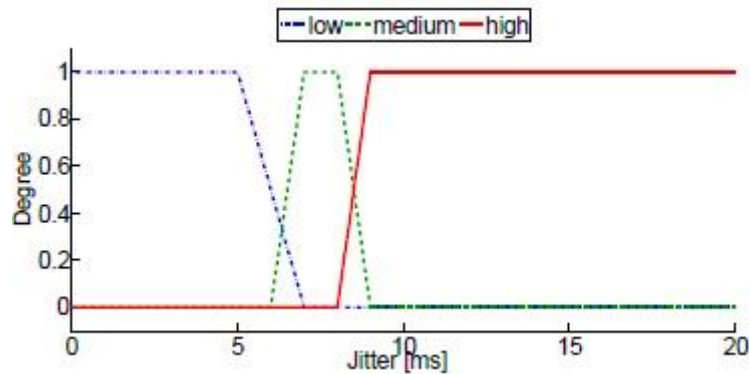
Πίνακας 14: Υπολογισμός δείκτη $APAV_Q$ για εφαρμογή FTP

Κανόνες ασαφούς λογικής για τον υπολογισμό του $APAV_Q$ υπηρεσίας FTP

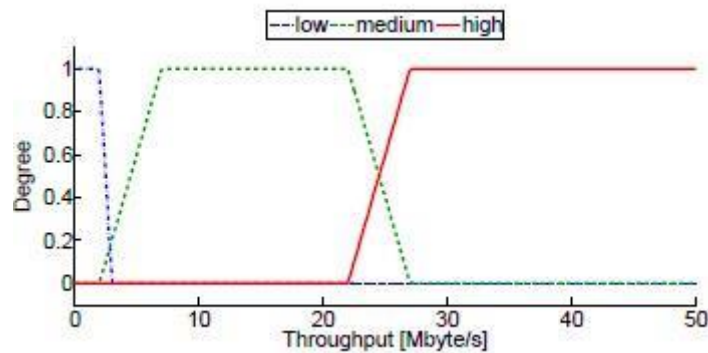
RULE 1: **IF** ber **IS** low **AND** bursterror **IS** low **AND** packetlossratio **IS** low **THEN** $APAV$ **IS** SA;
RULE 2: **IF** ber **IS** low **AND** bursterror **IS** low **AND** packetlossratio **IS** medium **THEN** $APAV$ **IS** SA;
RULE 3: **IF** ber **IS** low **AND** bursterror **IS** low **AND** packetlossratio **IS** high **THEN** $APAV$ **IS** WA;
RULE 4 : **IF** ber **IS** low **AND** bursterror **IS** medium **AND** packetlossratio **IS** low **THEN** $APAV$ **IS** SA;
RULE 5 : **IF** ber **IS** low **AND** bursterror **IS** medium **AND** packetlossratio **IS** medium **THEN** $APAV$ **IS** WA;
RULE 6 : **IF** ber **IS** low **AND** bursterror **IS** medium **AND** packetlossratio **IS** high **THEN** $APAV$ **IS** NU;
...
RULE 25: **IF** ber **IS** high **AND** bursterror **IS** high **AND** packetlossratio **IS** low **THEN** $APAV$ **IS** WR;
RULE 26: **IF** ber **IS** high **AND** bursterror **IS** high **AND** packetlossratio **IS** medium **THEN** $APAV$ **IS** SR;
RULE 27: **IF** ber **IS** high **AND** bursterror **IS** high **AND** packetlossratio **IS** high **THEN** $APAV$ **IS** SR;

Η ασαφής λογική χρειάζεται διότι, όπως παρατηρούμε και στους παραπάνω κανόνες IF-THEN, κάθε πληροφορία ελέγχεται ποιοτικά. Για να υπολογίσουμε δηλαδή το $APAV_Q$ ενός ασύρματου δικτύου πρόσβασης εξετάζουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου που μας ενδιαφέρουν, και τα συγκρίνουμε ποιοτικά αν έχουν μικρή, μεσαία ή μεγάλη τιμή. Αυτό προκύπτει από τις συναρτήσεις συμμετοχής

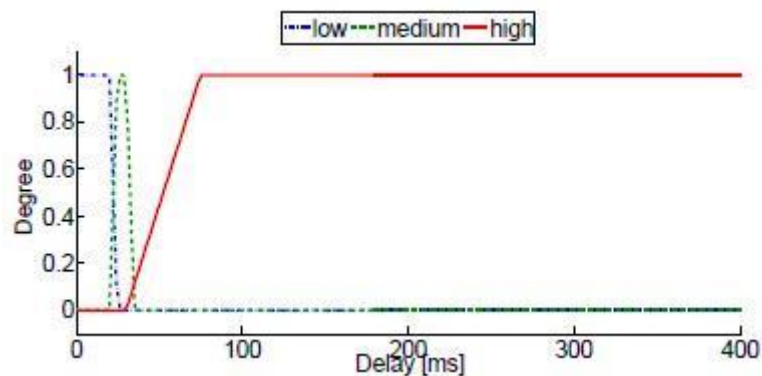
(membership functions), οι οποίες είναι ορισμένες για κάθε τεχνικό χαρακτηριστικό. Για παράδειγμα οι συναρτήσεις συμμετοχής για την διακύμανση καθυστέρησης (jitter), τη διέλευση (throughput) και την καθυστέρηση (delay) ενός δικτύου πρόσβασης φαίνονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις (Εικόνες 4-4, 4-5, 4-6).



Εικόνα 4-4: Συνάρτηση συμμετοχής για την διακύμανση καθυστέρησης (jitter)



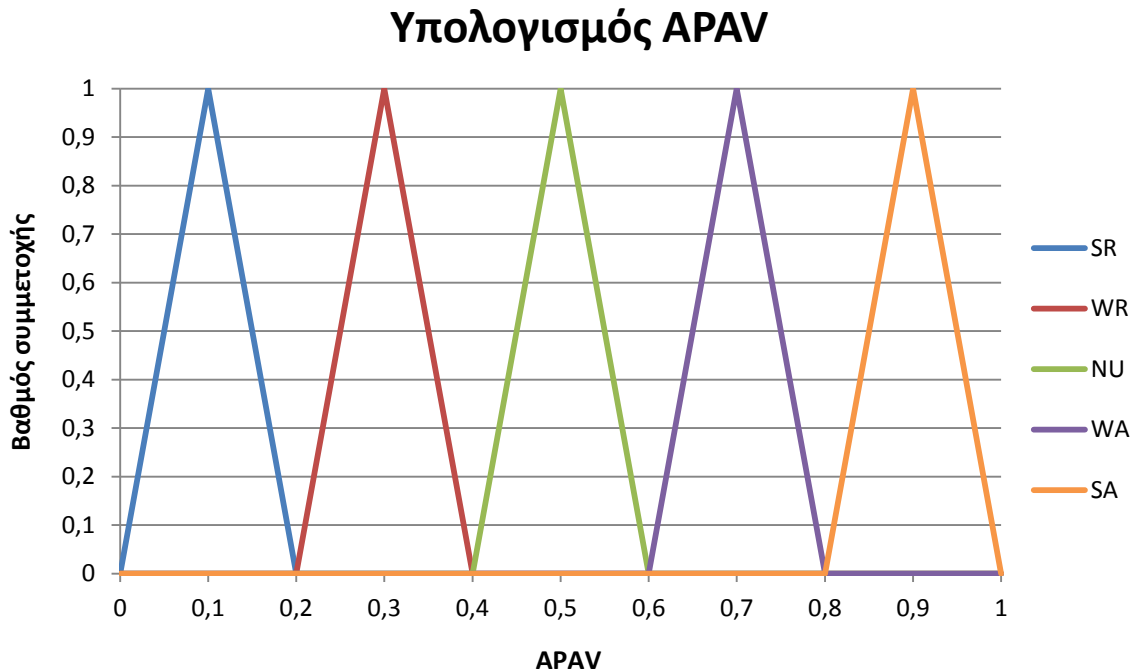
Εικόνα 4-5: Συνάρτηση συμμετοχής για το ρυθμό διέλευσης (throughput)



Εικόνα 4-6: Συνάρτηση συμμετοχής για την καθυστέρηση (delay)

Μελετώντας τους παραπάνω κανόνες ασαφούς λογικής παρατηρούμε ότι υπάρχουν πέντε πιθανές τιμές εξόδου. Το δίκτυο πρόσβασης που εξετάζεται μπορεί

να χαρακτηριστεί δηλαδή ως: SA (Strong Accept), WA (Weak Accept), NU (Neutral), WR (Weak Reject) και SR (Strong Reject), όπου με SA αξιολογείται το περισσότερο κατάλληλο δίκτυο και με SR το λιγότερο κατάλληλο δίκτυο για την εκάστοτε υπηρεσία. Για να υπολογίσουμε τελικά την αριθμητική τιμή του $APAV_Q$ για το εκάστοτε δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιούμε την παρακάτω γραφική παράσταση (Εικόνα 4-7). Όπως παρατηρεί κανείς ένα δίκτυο για παράδειγμα το οποίο έχει χαρακτηριστεί ως SA θα έχει $APAV_Q$ ίσο με 0,9 ενώ αντίστοιχα ένα δίκτυο το οποίο έχει χαρακτηριστεί ως WR θα έχει $APAV_Q$ ίσο με 0,3.



Εικόνα 4-7: Υπολογισμός $APAV_Q$ / $APAV_L$ για ασύρματα δίκτυα πρόσβασης

Παρόμοια για να υπολογίσουμε το δείκτη $APAV_L$ ενός δικτύου πρόσβασης για μία υπηρεσία VoiceCall και για μια υπηρεσία Streaming θα χρησιμοποιήσουμε τους παρακάτω κανόνες αντίστοιχα:

Πίνακας 15: Υπολογισμός δείκτη $APAV_L$ για εφαρμογή Voice Call

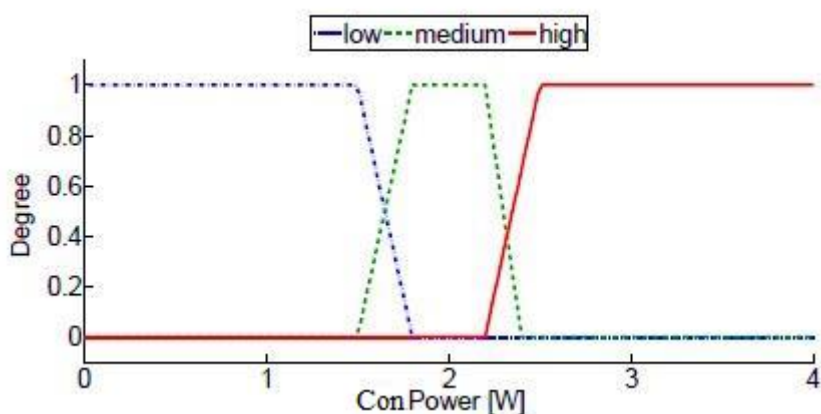
Κανόνες ασαφούς λογικής για τον υπολογισμό του $APAV_L$ υπηρεσίας VoiceCall
RULE 1: IF con IS low AND rx IS low AND idle IS low THEN APAV IS SA;
RULE 2: IF con IS low AND rx IS low AND idle IS medium THEN APAV IS SA;
RULE 3: IF con IS low AND rx IS low AND idle IS high THEN APAV IS WA;
...
RULE 7: IF con IS high AND idle IS low THEN APAV IS SR;
RULE 8: IF con IS high AND idle IS medium THEN APAV IS SR;
RULE 9: IF con IS high AND idle IS high THEN APAV IS SR;

Πίνακας 16: Υπολογισμός δείκτη APAVL για εφαρμογή Streaming

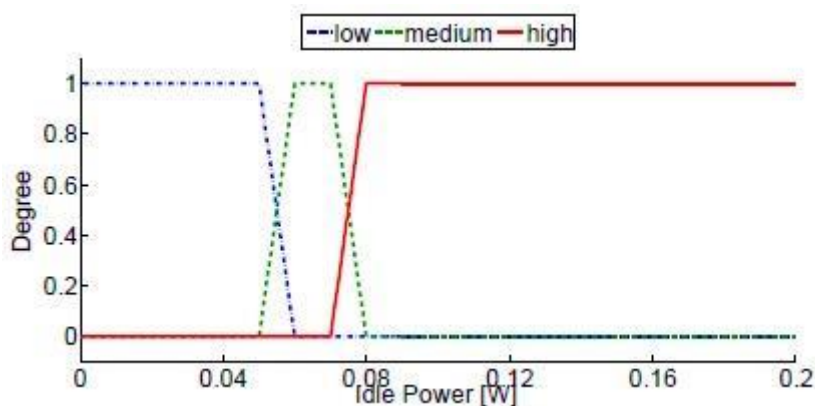
Κανόνες ασαφούς λογικής για τον υπολογισμό του APAVL υπηρεσίας Streaming

- RULE 1: IF con IS low AND idle IS low THEN APAV IS SA;
RULE 2: IF con IS low AND idle IS medium THEN APAV IS SA;
RULE 3: IF con IS low AND idle IS high THEN APAV IS WA;
...
RULE 7: IF con IS high AND idle IS low THEN APAV IS WR;
RULE 8: IF con IS high AND idle IS medium THEN APAV IS SR;
RULE 9: IF con IS high AND idle IS high THEN APAV IS SR;

Όπως και προηγουμένως έχουν οριστεί οι συναρτήσεις συμμετοχής για τις μεταβλητές Con και Idle που αφορούν τους ρυθμούς κατανάλωσης ενέργειας κατά τη σύνδεση και αδράνεια αντίστοιχα του τερματικού (Εικόνες 4-8, 4-9). Τέλος για να υπολογίσουμε την αριθμητική τιμή του APAVL για το εκάστοτε δίκτυο πρόσβασης θα χρησιμοποιήσουμε ξανά την γραφική παράσταση της Εικόνας 4-7 κατά παρόμοιο τρόπο, όπως κάναμε για τον υπολογισμό του APAVQ.



Εικόνα 4-8: Συνάρτηση συμμετοχής για την κατανάλωση ενέργειας κατά τη σύνδεση



Εικόνα 4-9: : Συνάρτηση συμμετοχής για την κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση αδράνειας

Δείκτης ικανοποίησης APSV

Ωστόσο οι δείκτες $APAV_R$, $APAV_C$, $APAV_Q$ και $APAV_L$ δεν επαρκούν από μόνοι τους για να καθορίσουν ποιο είναι το καταλληλότερο ασύρματο δίκτυο για κάθε υπηρεσία, αν ο χρήστης έχει ορίσει σύνθετες προτιμήσεις (π.χ. RSS και Quality ή Lifetime και RSS και Cost). Για το λόγο αυτό υπολογίζεται ο δείκτης APSV (Access Point Satisfaction Value) για κάθε δίκτυο πρόσβασης, ο οποίος αντιπροσωπεύει το πόσο καλά ικανοποιεί ένα δίκτυο πρόσβασης τις ανάγκες ενός χρήστη με βάση το προφίλ και τις προτιμήσεις που έχει ορίσει ο ίδιος. Ο δείκτης APSV, όπως και οι δείκτες APAV, παίρνει πραγματικές τιμές στο διάστημα από 0,0 μέχρι 1,0 και δίνει μια σχετική σύγκριση των διαθέσιμων δικτύων πρόσβασης. Σε αντίθεση ωστόσο με τους δείκτες APAV, οι οποίοι υπολογίζονται με τη βοήθεια κανόνων ασαφούς λογικής, για τον υπολογισμό του δείκτη APSV χρησιμοποιείται μια συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία υπολογίζει το σταθμισμένο άθροισμα των δεικτών APAV πολλαπλασιασμένων με τα βάρη τους, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$APSV (AP_{ij}) = (W_R W_C W_Q W_L) * \left[\begin{array}{l} APAV_R (AP_{ij}) \\ APAV_C (AP_{ij}) \\ APAV_Q (AP_{ij}) \\ APAV_L (AP_{ij}) \end{array} \right]$$

$$= W_R \cdot APAV_R (AP_{ij}) + W_C \cdot APAV_C (AP_{ij}) + W_Q \cdot APAV_Q (AP_{ij}) + W_L \cdot APAV_L (AP_{ij})$$

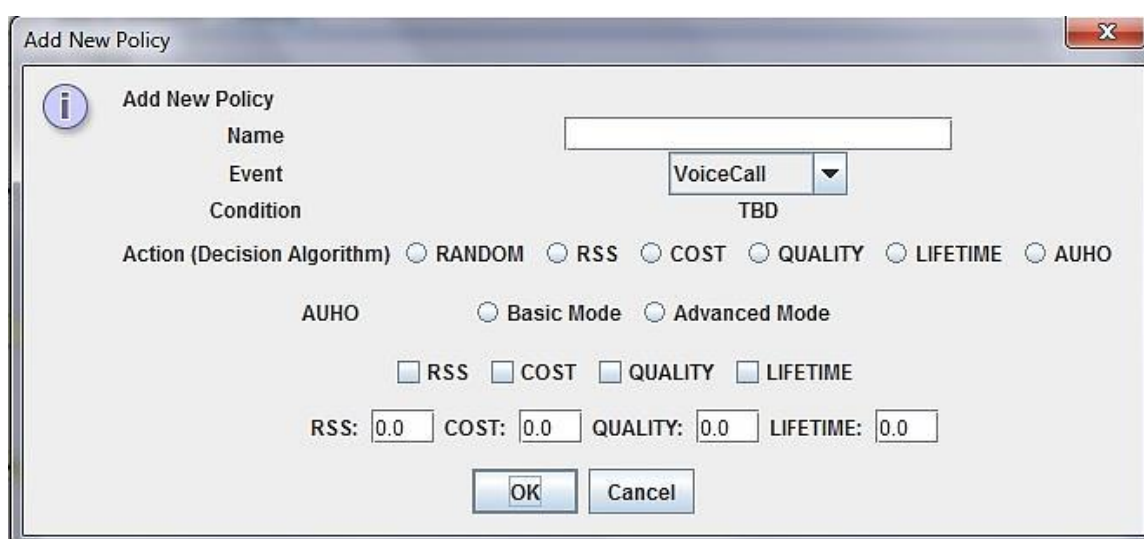
όπου το AP_{ij} είναι ο j-οστός σταθμός βάσης της i-οστής τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης (RAT).

Με βάση τους δείκτες APAV και APSV αξιολογούνται τα δίκτυα και επιλέγεται τελικά το καταλληλότερο. Περισσότερες πληροφορίες για το πως χρησιμοποιούνται οι δείκτες αυτοί από τον κάθε αλγόριθμο κάθετης μεταπομπής θα δούμε στο επόμενο υποκεφάλαιο.

4.2 Αλγόριθμοι απόφασης κάθετης μεταπομπής

Στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύουμε τα χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας των αλγορίθμων απόφασης κάθετης μεταπομπής που χρησιμοποιήσαμε στις προσομοιώσεις. Όπως είδαμε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο αναλυτικότερα, για την εκκίνηση μιας νέας προσομοίωσης ο χρήστης ορίζει ποια εφαρμογή θα εκτελεστεί στο τερματικό και επιλέγει πού θα βρίσκονται οι σταθμοί βάσης των διάφορων ασύρματων δικτύων πρόσβασης. Έπειτα το κινητό τερματικό δημιουργεί

μια λίστα με τα υποψήφια σημεία πρόσβασης (APs) με τη βοήθεια του διαχειριστή διεπαφών δικτύου (network interface manager), ο οποίος είναι υλοποιημένος για κάθε τερματικό, και τέλος φορτώνει, αν υπάρχει, την πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής που έχει οριστεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, στο πρόγραμμα HMNToolSuite έχουν υλοποιηθεί έξι διαφορετικοί αλγόριθμοι απόφασης κάθετης μεταπομπής (RSS-based, Cost-based, Quality-based, Lifetime-based, Random και AUHO), την ακριβή λειτουργία των οποίων αναλύουμε στη συνέχεια. Στην Εικόνα 4-10 παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο επιλέγει κανείς στο πρόγραμμα HMNToolSuite την πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής που θα ακολουθήσει ένας κινητός κόμβος και πώς ορίζει τα βάρη στις παραμέτρους RSS, Cost, Quality και Lifetime, που αποτελούν το προφίλ του χρήστη.



Εικόνα 4-10: Επιλογή νέας πολιτικής απόφασης κάθετης μεταπομπής στο HMNToolSuite

I. RSS-Based

Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί στην ουσία τον βασικότερο αλγόριθμο απόφασης κάθετης μεταπομπής καθώς ελέγχει μόνο την ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS για να επιλέξει το καταλληλότερο δίκτυο. Ιστορικά αποτελεί τον πρώτο αλγόριθμο απόφασης τόσο οριζόντιας όσο και κάθετης μεταπομπής. Όπως είδαμε και προηγουμένως, κάθε χρονική στιγμή το τερματικό υπολογίζει την τιμή του δείκτη RSSI για κάθε υποψήφιο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης. Η πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής, που βασίζεται στο RSS, χρησιμοποιεί τις τιμές αυτές ώστε να αξιολογήσει τα υποψήφια ασύρματα δίκτυα πρόσβασης και προτείνει ως το καταλληλότερο δίκτυο για την υπηρεσία, αυτό με τον υψηλότερο δείκτη $APAV_R$. Ο αλγόριθμος αυτός, όπως και οι υπόλοιποι βασικοί αλγόριθμοι, δεν λαμβάνουν υπόψιν το προφίλ του χρήστη, το οποίο ορίζεται από τα βάρη για τις παραμέτρους RSS, Cost, Quality και Lifetime. Αντίθετα αποτελεί έναν άπληστο αλγόριθμο που επιλέγει κάθε φορά το δίκτυο που προσφέρει το καλύτερο σήμα (RSS). Η δομή της RSS-based

πολιτικής απόφασης κάθετης μεταπομπής για μια εφαρμογή Voice Call, όπου δεν έχουμε ορίσει προφίλ χρήστη, ορίζεται τελικά ως εξής σε μορφή .xml:

```
1 <rulebase>
2 <rule>
3 <name>RSS_algorithm</name>
4 <event>Voice Call</event>
5 <condition/>
6 <action>
7 <method>RSS#BASIC#0</method>
8 </action>
9 </rule>
```

Επιλέγοντας στο user_profile advanced αντί για BASIC ο χρήστης θα μπορούσε να ορίσει από μόνος του ποια επιθυμεί να είναι τα βάρη στις τέσσερις παραμέτρους RSS, Cost, Quality και Lifetime, όμως όπως αναφέραμε και προηγουμένως ο RSS-based αλγόριθμος κάθετης μεταπομπής δεν λαμβάνει υπόψιν το προφίλ του χρήστη.

II. Cost-based

Παρόμοια ορίζεται και η πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής που βασίζεται στο κόστος (Cost). Σε αυτή την ο αλγόριθμος βασίζει την απόφασή του για κάθετη μεταπομπή κυρίως στα μοντέλα χρέωσης που έχουν οριστεί για τις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης και εκφράζονται με την τιμή του δείκτη $APAV_C$. Όπως και ο RSS-based αλγόριθμος, ο Cost-based αλγόριθμος δεν λαμβάνει υπόψιν το προφίλ χρήστη, ενώ στην περίπτωση που δύο σημεία πρόσβασης έχουν την ίδια τιμή $APAV_C$, η πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής που βασίζεται στο κόστος, επιλέγει το δίκτυο που προσφέρει τη μεγαλύτερη ισχύ λαμβανόμενου σήματος, δηλαδή το μεγαλύτερο δείκτη $APAV_R$, όπως φαίνεται στο παρακάτω τμήμα κώδικα.

```
if (decision == Action.COST){
    if (getApavCost() == dp.getApavCost()) {
        return getSignalStrength() < dp.getSignalStrength(); //σε περίπτωση που δύο
    } //σημεία πρόσβασης έχουν ίσο  $APAV_C$  επέλεξε αυτό με το καλύτερο RSS.
    return getApavCost() < dp.getApavCost();
}
```

Η δομή της Cost-based πολιτικής απόφασης κάθετης μεταπομπής σε .xml μορφή για μια εφαρμογή Voice Call, όπου δεν έχουμε ορίσει προφίλ χρήστη, ορίζεται κατ' αντιστοιχία με αυτή της RSS-based που είδαμε παραπάνω.

III. Quality-based

Παρόμοια με τις προηγούμενες πολιτικές απόφασης κάθετης μεταπομπής ορίζεται και η πολιτική που βασίζεται στην ποιότητα (Quality) του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση η πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής εξετάζει κυρίως την ποιότητα υπηρεσιών που προσφέρει το κάθε δίκτυο. Αυτή εκφράζεται μέσω της τιμής του δείκτη $APAV_Q$, ο οποίος υπολογίζεται με βάση ορισμένες από τις εξής παραμέτρους: εύρος ζώνης (bandwidth), καθυστέρηση (delay), διακύμανση καθυστέρησης (jitter), ρυθμός σφάλματος bit (BER), ρυθμός διέλευσης (throughput), σφάλμα ακολουθίας (burst error) και ρυθμός απώλειας πακέτων (packet loss ratio) για κάθε σημείο ασύρματης πρόσβασης. Ούτε αυτή η πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής λαμβάνει υπόψιν το προφίλ του χρήστη, αλλά σε αντίθεση με τις προηγούμενες δύο πολιτικές απόφασης κάθετης μεταπομπής, η Quality-based εξαρτάται από τον τύπο της υπηρεσίας που τρέχει στο τερματικό. Αυτό συμβαίνει διότι για κάθε υπηρεσία επιλέγονται διαφορετικοί κανόνες ασαφούς λογικής για την αξιολόγηση των δικτύων μέσω του υπολογισμού του δείκτη $APAV_Q$, όπως είδαμε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Ξανά όταν δύο σημεία πρόσβασης έχουν την ίδια τιμή $APAV_Q$ ο Quality-based αλγόριθμος επιλέγει το δίκτυο που προσφέρει τη μεγαλύτερη ισχύ λαμβανόμενου σήματος, δηλαδή το μεγαλύτερο $APAV_R$.

IV. Lifetime-based

Η πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής που βασίζεται στην διάρκεια ζωής (Lifetime) εστιάζει στην θεωρητική κατανάλωση ενέργειας του τερματικού, που θα προκύψει από την σύνδεσή του στις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της τιμής του δείκτη $APAV_L$. Είναι επίσης υλοποιημένη όπως οι προηγούμενες δύο πολιτικές απόφασης κάθετης μεταπομπής καθώς δεν λαμβάνει υπόψιν το προφίλ χρήστη, ενώ σε περίπτωση που δύο σημεία πρόσβασης έχουν την ίδια τιμή $APAV_L$ ο Lifetime-based αλγόριθμος επιλέγει το δίκτυο που προσφέρει τη μεγαλύτερη ισχύ λαμβανόμενου σήματος, δηλαδή το μεγαλύτερο $APAV_R$. Παρόμοια όμως με την Quality-based πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής, η Lifetime-based εξαρτάται επίσης από την εκάστοτε υπηρεσία που εκτελείται στο τερματικό, καθώς χρησιμοποιούνται διαφορετικοί κανόνες ασαφούς λογικής για την αξιολόγηση των δικτύων μέσω του υπολογισμού του δείκτη $APAV_L$, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 4.1 .

V. Τυχαία (Random)

Η τυχαία πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής βασίζεται σε μια γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών και με βάση αυτούς επιλέγει τυχαία το καταλληλότερο δίκτυο πρόσβασης για την εκάστοτε εφαρμογή από τη λίστα των υποψήφιων δικτύων, όπως φαίνεται στο παρακάτω τμήμα κώδικα.

```

int c = new Random(System.currentTimeMillis()).nextInt(networkInterfaces.length);
int i = 0;
boolean isCandidate = false;
for (int j = 0; j < networkInterfaces.length; j++) {
    if (networkInterfaces[i].isSpeedSupport() && networkInterfaces[i].isSLASupport()) {
        if (networkInterfaces[j].getCandidateDevice() != null) {
            isCandidate = true;
            break;
        }
    }
}
}

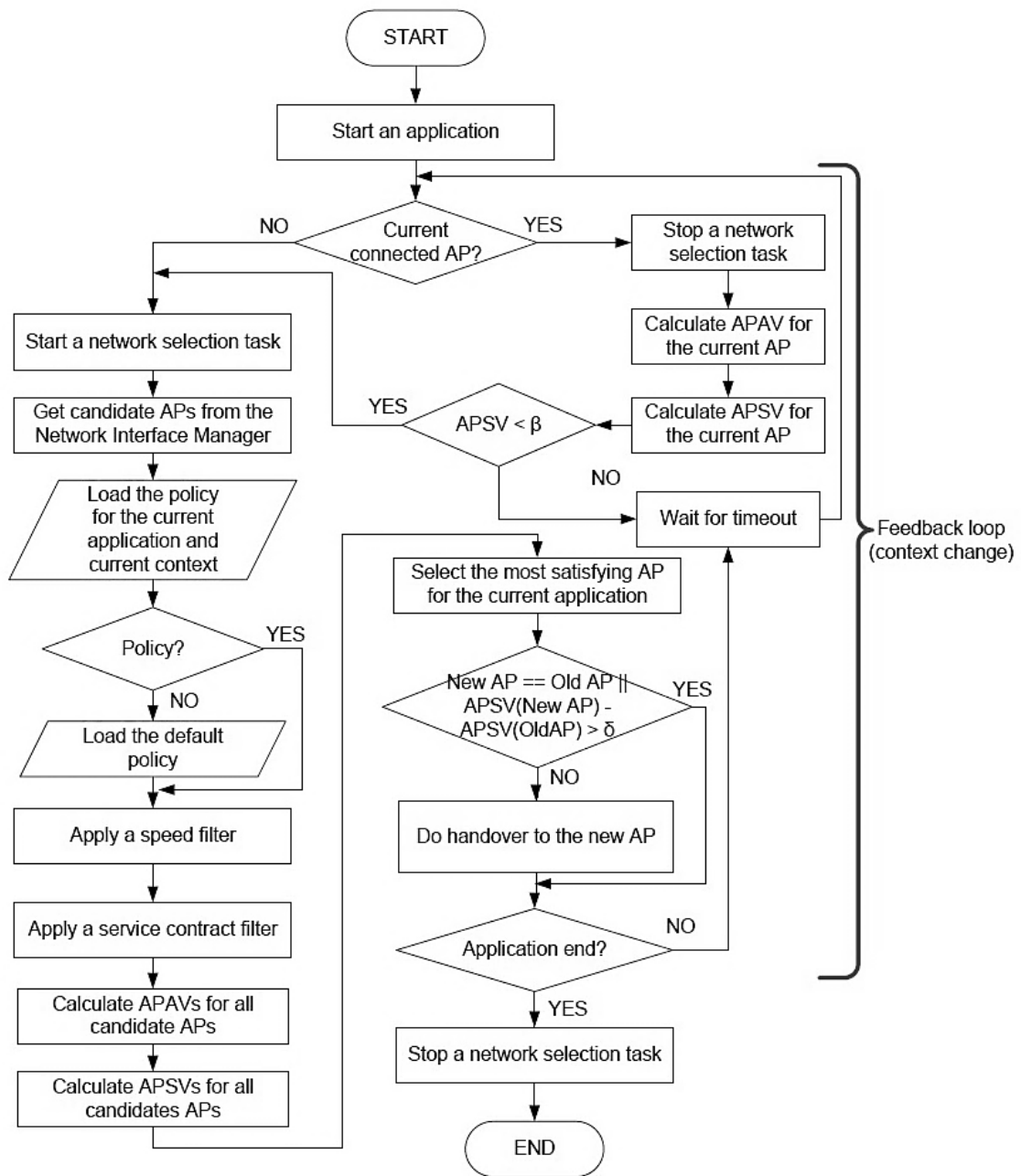
```

VI. AUHO (AUtonomic HandOver)

Όπως παρατηρήσαμε στην σύγκριση των διάφορων στρατηγικών απόφασης κάθετης μεταπομπής στο κεφάλαιο 2, ο προτεινόμενος αλγόριθμος AUHO συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα υποστηρίζει την εξατομίκευση της λειτουργίας του από την πλευρά του χρήστη και παρέχει επιπλέον ένα βρόγχο ανάδρασης ελέγχου για λήψη βέλτιστων αποφάσεων κάθετης μεταπομπής. Πρώτα θα περιγράψουμε τη λειτουργία του, ενώ στη συνέχεια παραθέτουμε το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.

Αρχικά ο χρήστης επιλέγει μία υπηρεσία και έπειτα το κινητό τερματικό του επιστρέφει μία λίστα με τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης στα οποία μπορεί να συνδεθεί. Στη συνέχεια το κινητό τερματικό εφαρμόζει στη λίστα αυτή δύο φίλτρα, ένα που ελέγχει την ταχύτητα του χρήστη (speed filter) και ένα που ελέγχει τη σύμβαση παροχών υπηρεσιών που προσφέρει το κάθε δίκτυο (service contract filter), ώστε να απορρίψει τα ασύρματα δίκτυα που δεν πληρούν τις απαιτήσεις του χρήστη. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι δείκτες APAV και APSV για τα εναπομείναντα σημεία πρόσβασης και καθορίζεται αυτό, που ικανοποιεί περισσότερο την τρέχουσα υπηρεσία και τις προτιμήσεις του χρήστη. Αν το νέο σημείο πρόσβασης είναι το ίδιο με το παλιό δεν εκτελείται κάποια μεταπομπή. Αντίθετα αν ο δείκτης APSV του υποψήφιου σημείου πρόσβασης είναι μεγαλύτερος από αυτόν του υφιστάμενου σημείου πρόσβασης, τότε πρέπει να εξεταστεί το κόστος της μεταπομπής. Αν οι δύο δείκτες APSV διαφέρουν τουλάχιστον κατά μια τιμή κατωφλιού δ , τότε εκτελείται η μεταπομπή προς το νέο σημείο πρόσβασης. Σε διαφορετική περίπτωση το κινητό τερματικό διατηρεί τη σύνδεσή του ώστε να αποφευχθούν περιπτώσεις άσκοπων μεταπομπών (ping pong - effect). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται από την αρχή έως ότου λήξει το προκαθορισμένο χρονικό διάστημα που έχει επιλεγεί. Με τον τρόπο αυτό υλοποιείται ο βρόγχος ανάδρασης ελέγχου του αλγορίθμου, ο οποίος βοηθάει στην προσαρμογή του τερματικού σε τυχόν αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντος αλλά και στις προτιμήσεις του χρήστη. Αφού συνδεθεί το τερματικό στο καταλληλότερο σημείο πρόσβασης, εκτελείται ένας βρόγχος συντήρησης, ο οποίος αξιολογεί διαρκώς το τρέχον σημείο πρόσβασης, ενώ η διαδικασία κάθετης μεταπομπής διακόπτεται. Κατά τη διάρκεια του βρόγχου αυτού υπολογίζονται οι δείκτες APAV και APSV του τρέχοντος σημείου πρόσβασης. Αν ο δείκτης APSV

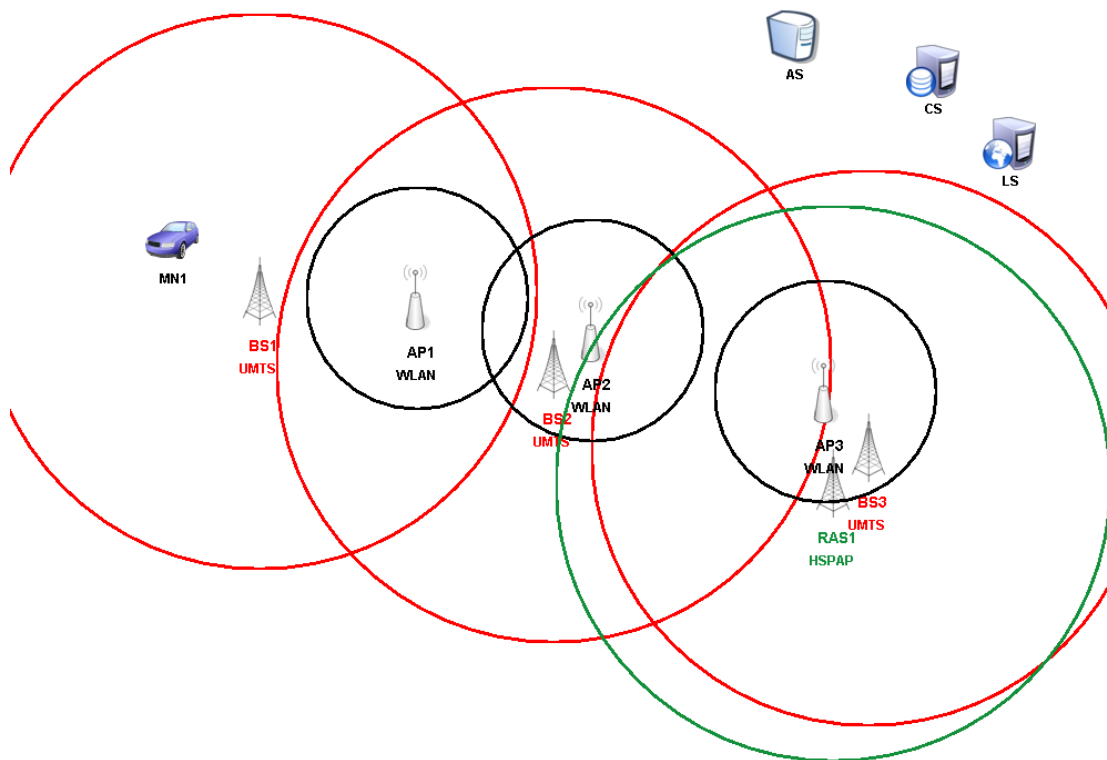
υποχωρήσει κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, η διαδικασία κάθετης μεταπομπής ενεργοποιείται ξανά και τα υποψήφια σημεία πρόσβασης αξιολογούνται για να επιλεγεί το καταλληλότερο. Στην Εικόνα 4-11 παρουσιάζουμε το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου AUHO, στο οποίο φαίνεται γραφικά η λειτουργία του, όπως την περιγράψαμε παραπάνω.



Εικόνα 4-11: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου AUHO

4.3 Τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε στο πρόγραμμα HMNToolSuite εξετάσαμε τις εξής τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RATs): WLAN, UMTS, HSPA+ και 4G-LTE. Κάθε RAT απεικονίζεται με διαφορετικό τρόπο στο πρόγραμμα HMNToolSuite και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσθέσει απεριόριστο αριθμό από διαφορετικούς σταθμούς βάσης διαφορετικών RATs. Για παράδειγμα στο πρώτο σενάριο που προσομοιώσαμε, το οποίο δημιούργησε ο Joon-Myung Kang για να συγκρίνει τους αλγόριθμους κάθετης μεταπομπής ως προς την αποδοτικότητά τους, χρησιμοποιήσαμε τα δίκτυα WLAN, UMTS και HSPA+ (Εικόνα 4-12) [12].



Εικόνα 4-12: Απεικόνιση διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης στο HMNToolSuite

Για κάθε μία από τις τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, που χρησιμοποιήσαμε στις προσομοιώσεις, δίνουμε στη συνέχεια τις τιμές των τεχνικών χαρακτηριστικών, όπως αυτά ορίζονται στο πρόγραμμα HMNToolSuite. Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι τιμές που χρησιμοποιήσαμε για κάθε δίκτυο είναι πειραματικές. Κάποιες από τις πληροφορίες αυτές, όπως το εύρος ζώνης (bandwidth), την καθυστέρηση (delay) και το ρυθμό διέλευσης (throughput) τις μετρήσαμε μέσω της εφαρμογής που χρησιμοποιήσαμε για να πάρουμε μετρήσεις στο κινητό (Κεφάλαιο 3), ενώ τις τιμές για τις υπόλοιπες παραμέτρους τις αντλήσαμε από πειραματικές μελέτες που βρήκαμε στο διαδίκτυο [12, 46, 61-63].

4.3.1 Πρότυπο UMTS

Ο όρος UMTS προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων "Universal Mobile Telecommunications System" (Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών). Η ιδέα για την γένεσή του, ο σχεδιασμός και η υλοποίησή του προήλθαν από την απαίτηση για αναβάθμιση των ήδη υπαρχόντων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών δεύτερης γενιάς και την ανάγκη για την «συνέχεια» των επικοινωνιών σε περιβάλλον ετερογενών συστημάτων. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του UMTS δικτύου ξεχωρίζουμε τους αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων και την ταυτόχρονη υποστήριξη μεγαλύτερου όγκου δεδομένων και φωνής. Το UMTS δεν αποτελεί το μοναδικό πρότυπο τρίτης γενιάς προφανώς. Η αντίστοιχη πρόταση από την πλευρά της Αμερικής είναι το CDMA-2000. Το UMTS βασίζεται επίσης στην τεχνολογία Ευρεία Ζώνη Πολλαπλή Πρόσβαση με Επιμερισμό Κώδικα WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access - WCDMA). Η W-CDMA έχει σχεδιαστεί για να υλοποιεί υπηρεσίες υψηλής μετάδοσης δεδομένων (σε περιβάλλον γραφείου ο ρυθμός μετάδοσης φτάνει τα 2Mbps ενώ σε κινητό περιβάλλον τα 384 Kbps) χρησιμοποιώντας το διαδίκτυο, ενώ υποστηρίζει επικοινωνίες είτε με την τεχνική μεταγωγής πακέτου είτε με μεταγωγή κυκλώματος. Οι τιμές που χρησιμοποιήσαμε για τα χαρακτηριστικά του δικτύου UMTS, όπως τις μετρήσαμε πειραματικά, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 17).

Πίνακας 17: Τεχνικά χαρακτηριστικά προτύπου UMTS

UMTS metrics	
Coverage (meter)	1000
Bandwidth (kbyte)	1000
Delay (ms)	413
Jitter (ms)	10
BER (dB)	0,001
Throughput (Mbyte/s)	0,3
Burst Error	0,5
Packet Loss Ratio	0,07
Cost Rate (\$/min)	0,25
Power Connection (W)	1,534
Power Idle (W)	1,0
Min Velocity (km/h)	0
Max Velocity (km/h)	300

4.3.2 Πρότυπο 802.11 (WLAN)

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 2 τα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN είναι μια οικογένεια προτύπων του οργανισμού IEEE που αναπτύχθηκαν με σκοπό να επεκτείνουν το πρωτόκολλο Ethernet στην ασύρματη περιοχή. Υπάρχουν πέντε διαφορετικοί τύποι δικτύου WLAN που έχουν σχεδιαστεί τα τελευταία χρόνια, οι οποίοι

λειτουργούν σε διαφορετικό εύρος συχνότητας και προσφέρουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήσαμε το πρότυπο 802.11n με τις παρακάτω τιμές (Πίνακας 18).

Πίνακας 18: Τεχνικά χαρακτηριστικά προτύπου WLAN

WLAN metrics	
Coverage (meter)	400
Bandwidth (kbyte)	3000
Delay (ms)	30
Jitter (ms)	8
BER (dB)	1,0E-4
Throughput (Mbyte/s)	1,0
Burst Error	0,1
Packet Loss Ratio	0,02
Cost Rate (\$/min)	0,05
Power Connection (W)	1,372
Power Idle (W)	0,8
Min Velocity (km/h)	0
Max Velocity (km/h)	20

4.3.3 Πρότυπο HSPA+

Το πρότυπο HSPA+ ή διαφορετικά Evolved High-Speed Packet Access ενισχύει το ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο WCDMA (UMTS) για δίκτυα 3G και προσφέρει υψηλότερες ταχύτητες για τον τελικό χρήστη, συγκρίσιμες με αυτές του δικτύου LTE. Θεωρητικά μπορεί να προσφέρει ταχύτητες έως 168 Mbps (downlink) και 22 Mbps (uplink). Τεχνικά αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας είτε την τεχνολογία MIMO (Multiple Input - Multiple Output), με την οποία είναι εφικτή η αποστολή πολλαπλών παράλληλων μεταδόσεων, είτε μέσω του συνδυασμού πολλαπλών κελιών σε ένα με την τεχνική Dual-Cell HSDPA. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 19) παρουσιάζουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου HSPA+, που προέκυψαν από τα περαματικές μετρήσεις, που πραγματοποιήσαμε όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3.

Πίνακας 19: Τεχνικά χαρακτηριστικά προτύπου HSPA+

HSPA+ metrics	
Coverage (meter)	1000
Bandwidth (kbyte)	3000
Delay (ms)	194
Jitter (ms)	10
BER (dB)	0,001
Throughput (Mbyte/s)	0,8
Burst Error	0,5

Packet Loss Ratio	0,038
Cost Rate (\$/min)	0,67
Power Connection (W)	1,967
Power Idle (W)	1,7
Min Velocity (km/h)	0
Max Velocity (km/h)	300

4.3.4 Πρότυπο 4G-LTE

Το πρότυπο 4G-LTE, όπως περιγράφεται αναλυτικότερα και στο κεφάλαιο 2, αποτελεί εξέλιξη των ασύρματων δικτύων GSM και UMTS προς ένα δίκτυο ευρείας ζώνης με αυξημένη χωρητικότητα και μεγαλύτερη ταχύτητα δικτύου και δημιουργήθηκε για να καλύψει τις αυξημένες ανάγκες των χρηστών για απαιτητικές διαδικτυακές εφαρμογές. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήσαμε για το 4G-LTE στις προσομοιώσεις είναι αυτά της έκδοσης 10 και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 20).

Πίνακας 20: Τεχνικά χαρακτηριστικά προτύπου 4G-LTE

4G-LTE metrics	
Coverage (meter)	2000
Bandwidth (kbyte)	12500
Delay (ms)	95
Jitter (ms)	6
BER (dB)	0,00001
Throughput (Mbyte/s)	1,8
Burst Error	0,5
Packet Loss Ratio	0,01
Cost Rate (\$/min)	1,25
Power Connection (W)	2,536
Power Idle (W)	1,35
Min Velocity (km/h)	0
Max Velocity (km/h)	300

Στους παραπάνω πίνακες έχουμε χρωματίσει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων πρόσβασης, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των τεσσάρων βασικών πληροφοριών (RSS, Cost, Quality, Lifetime) που εξετάσαμε στο υποκεφάλαιο 3.1. Συγκεκριμένα με κόκκινο χρώμα σηματοδοτούνται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων πρόσβασης, τα οποία διαμορφώνουν την τιμή της ποιότητας των υπηρεσιών (Quality), με πράσινο χρώμα είναι το μοντέλο χρέωσης που ακολουθεί ο πάροχος της κάθε τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης (Cost), ενώ τέλος με μπλε χρώμα έχουν

χρωματιστεί οι παράμετροι που καθορίζουν την κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό (Lifetime).

4.4 Εισαγωγή μετρήσεων στο πρόγραμμα HMNToolSuite

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτιμήσαμε να πραγματοποιήσουμε τις προσομοιώσεις με σταθερές τιμές, που είχαμε για τις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RATs), ώστε να παρουσιάσουμε μια γενική ιδέα για τις βασικές διαφορές που προκύπτουν στην κατανάλωση ενέργειας, όταν το τερματικό συνδέεται σε διαφορετικά RATs. Για τη μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας κάθε κινητού τερματικού χρησιμοποιήσαμε τις σχέσεις μεταξύ κατανάλωσης ισχύος P [W] και του δείκτη ισχύος λαμβανόμενου σήματος RSSI, που υπολογίσαμε στο κεφάλαιο 3 με βάση τις μετρήσεις που πήραμε με την εφαρμογή που αναπτύξαμε. Έτσι στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε στο πρόγραμμα HMNToolSuite, η κατανάλωση ισχύος στο τερματικό εξαρτάται από δύο παράγοντες. Πρώτον από την υπηρεσία που εκτελείται σε αυτό και δεύτερον από την ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSSI, δηλαδή την απόσταση από τον εκάστοτε σταθμό πρόσβασης στον οποίο είναι συνδεδεμένο. Αν το κινητό τερματικό δεν είναι συνδεδεμένο σε κανένα δίκτυο αλλά έχει ωστόσο ενεργοποιημένες τις διεπαφές για σύνδεση σε ασύρματα δίκτυα πρόσβασης (κυψελωτά και WLAN), τότε η επιπλέον κατανάλωση ισχύος στο τερματικό, με βάση τις μετρήσεις που πήραμε, είναι σταθερή και ίση περίπου με 1 Watt. Στη συνέχεια παραθέτουμε ένα κομμάτι κώδικα που προσθέσαμε στη βιβλιοθήκη του προγράμματος HMNToolSuite για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας του τερματικού (Πίνακας 21). Όπως παρατηρεί κανείς υπάρχει διαχωρισμός τόσο για τα διαφορετικά ασύρματα δίκτυα όσο και για τις διαφορετικές υπηρεσίες, τις οποίες εξετάσαμε στην προσομοίωση, ώστε να ορίσουμε διαφορετικά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον παρατηρούμε ότι γίνεται έλεγχος μέσω της λογικής μεταβλητής `vho` για το αν συνέβη κάθετη μεταπομπή, και αν ναι μεταξύ ποιων τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης, ώστε να προστεθεί η αντίστοιχη στιγμιαία επιβάρυνση στην κατανάλωση ισχύος στο τερματικό.

Πίνακας 21: Υπολογισμός κατανάλωσης ισχύος τερματικού στο HMNToolSuite

Calculate Power Consumption

```
public synchronized double calculatePowerConsumption(String selectedNetwork, String application, int RSSI, boolean vho) {
```

```
//Αρχικοποίηση μεταβλητών
```

```
curNet = selectedNetwork;
```

```
powerCons = 0.0; //μηδενισμός powerCons για υπολογισμό επιβάρυνσης λόγω κάθετης μεταπομπής
```

```
//Έλεγχος αν έχει γίνει κάθετη μεταπομπή και μεταξύ ποιων δικτύων ώστε να προστεθεί η κατάλληλη
```

```
//επιβάρυνση (overhead) στο powerCons
```



```

if (vho){
    System.out.println("vho-----");
    System.out.println(prevNet + " - " + curNet);
    if ((prevNet=="UMTS" && curNet=="LTE") || (prevNet=="LTE" && curNet=="UMTS"))
{powerCons = 0.2;}
    else if ((prevNet=="HSPAP" && curNet=="LTE") || (prevNet=="LTE" && curNet=="HSPAP"))
{powerCons = 0.5;}
    else if ((prevNet=="UMTS" && curNet=="HSPAP") || (prevNet=="HSPAP" && curNet=="UMTS"))
{powerCons = 0.5;}
    else if ((prevNet=="UMTS" && curNet=="WLAN") || (prevNet=="WLAN" && curNet=="UMTS"))
{powerCons = 0.3;}
    else if ((prevNet=="LTE" && curNet=="WLAN") || (prevNet=="WLAN" && curNet=="LTE"))
{powerCons = 0.4;}
    else if ((prevNet=="HSPAP" && curNet=="WLAN") || (prevNet=="WLAN" && curNet=="HSPAP"))
{powerCons = 0.5;}
    else {powerCons = -1;}
}
    // Σύνδεση σε δίκτυο WLAN
if (selectedNetwork.equals("WLAN")) {
    if (application.equals("VoiceCall")) {powerCons += -0.0022*RSSI + 1.4864;}
    else if (application.equals("Streaming")) {powerCons += -0.0074*RSSI + 1.5735;}
    else if(application.equals("FTP")) {powerCons += -0.0067*RSSI + 1.7728;}
    else powerCons=-1;
}
    // Σύνδεση σε δίκτυο UMTS
else if (selectedNetwork.equals("UMTS")) {
    if (application.equals("VoiceCall")) {powerCons += -0.005*RSSI + 1.7983;}
    else if (application.equals("Streaming")) {powerCons += -0.0036*RSSI + 1.5982;}
    else if(application.equals("FTP")) {powerCons += -0.0041*RSSI + 2.451;}
    else powerCons=-1;
}
    // Σύνδεση σε δίκτυο HSPA+
else if (selectedNetwork.equals("HSPAP")) {
    if (application.equals("VoiceCall")) {powerCons += -0.0039*RSSI + 2.1569;}
    else if (application.equals("Streaming")) {powerCons += -0.0042*RSSI + 2.3555;}
    else if(application.equals("FTP")) {powerCons += -0.0051*RSSI + 2.5465;}
    else powerCons=-1;
}
    // Σύνδεση σε δίκτυο LTE
else if (selectedNetwork.equals("LTE")) {
    if (application.equals("VoiceCall")) {powerCons += -0.0131*RSSI + 3.1567;}
    else if (application.equals("Streaming")) {powerCons += -0.0037*RSSI + 1.7298;}
    else if(application.equals("FTP")) {powerCons += -0.0044*RSSI + 2.7073;}
    else powerCons=-1;
}
else powerCons=1.0; //όταν δεν είναι συνδεδεμένο σε κανένα δίκτυο, η ισχύς
//power [W] που χρειάζεται για να είναι απλά ανοιχτό το interface των δικτύων

prevNet = selectedNetwork;
return powerCons; //η στιγμιαία κατανάλωση ισχύος [W], που επιστρέφει η μέθοδος
}

```


5

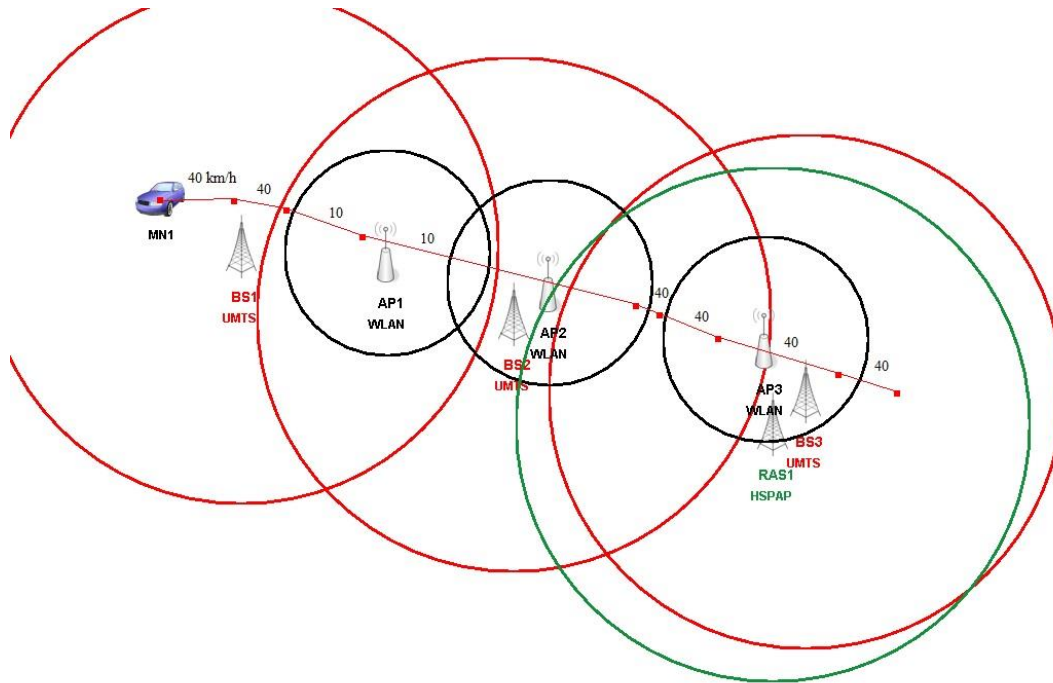
Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε και αναλύουμε τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε στο πρόγραμμα HMNToolSuite. Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι απόφασης κάθετης μεταπομπής αξιολογήθηκαν με βάση την κατανάλωση ισχύος, που απέφεραν στο κινητό, σε δύο διαφορετικά σενάρια. Σε κάθε σενάριο τοποθετήθηκαν διάσπαρτα σταθμοί βάσης από διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης των προτύπων UMTS, HSPA+, 4G-LTE και WLAN. Η συγκεκριμένη τοπολογία των δύο σεναρίων και οι διαφορές τους περιγράφονται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο αυτό. Όπως αναλύσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η κύρια παράμετρος για το μοντέλο ανάλυσης της κατανάλωσης ισχύος, που αναπτύξαμε, είναι η ισχύς λαμβανόμενου σήματος RSS. Έτσι με βάση τις γραφικές παραστάσεις, που εξήγαμε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του προγράμματος HMNToolSuite, αξιολογήσαμε και συγκρίναμε τους αλγόριθμους απόφασης κάθετης μεταπομπής, όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος στην πλευρά του τερματικού.

5.1 Ανάλυση πρώτου σεναρίου προσομοίωσης

Καθώς η διπλωματική αυτή εργασία έχει στηριχθεί για το πειραματικό κομμάτι στο πρόγραμμα HMNToolSuite, θεωρήσαμε ορθότερο να εξετάσουμε αρχικά το σενάριο προσομοίωσης, που παρουσίασε ο Joon-Myung Kang στην διατριβή του. Το σενάριο αυτό το χρησιμοποίησε για να συγκρίνει τους αλγόριθμους απόφασης κάθετης

μεταπομπής που υλοποίησε, ως προς την αποδοτικότητά τους. Πραγματοποιώντας τις κατάλληλες τροποποιήσεις και προσθήκες στην βιβλιοθήκη του προγράμματος επιχειρήσαμε με τη σειρά μας να συγκρίνουμε τους αλγόριθμους αυτούς ως προς την κατανάλωση ισχύος, που αποφέρουν στην πλευρά του τερματικού. Στην Εικόνα 5-1 παρουσιάζουμε το πρώτο σενάριο προσομοίωσης, που εξετάσαμε.



Εικόνα 5-1: Σενάριο προσομοίωσης 1 - Πορεία τερματικού

Στο σενάριο αυτό προσομοιώνεται η κίνηση ενός κινητού κόμβου MN1 (αυτοκίνητο) σε ένα ετερογενές ασύρματο περιβάλλον, στο οποίο εκπέμπουν διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης και κάθε μία έχει ορισμένα σημεία πρόσβασης. Συγκεκριμένα υπάρχουν τρεις σταθμοί βάσης του δικτύου UMTS, τρία σημεία πρόσβασης του προτύπου WLAN και ένας ασύρματος σταθμός πρόσβασης του προτύπου HSPA+. Η κίνηση του τερματικού ορίζεται από τα ευθύγραμμα τμήματα, που ενώνουν τις κόκκινες τελείες, ενώ η ταχύτητα του τερματικού σημειώνεται πάνω από τα τμήματα αυτά σε km/h. Σημειώνουμε ότι το δίκτυο WLAN, του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάσαμε στο υποκεφάλαιο 4.3.3, δεν υποστηρίζει τη σύνδεση σε τερματικά με ταχύτητα κίνησης μεγαλύτερη από 20 km/h. Η διάρκεια της προσομοίωσης ορίστηκε στα δέκα λεπτά και πενήντα-ένα δευτερόλεπτα (651 sec), όσος χρόνος απαιτείται ακριβώς δηλαδή για να φτάσει ο κινητός κόμβος από το σημείο έναρξης στο σημείο λήξης. Κατά την προσομοίωση αυτή εξετάσαμε τη συμπεριφορά των αλγορίθμων Basic-RSS, Basic-Cost, Basic-Quality, Basic-Lifetime και AUHO, η λειτουργία των οποίων αναλύεται επακριβώς στο υποκεφάλαιο 4.2, ως προς την κατανάλωση ενέργειας που αποδίδουν στην πλευρά του τερματικού. Σε ότι αφορά την λειτουργία του τερματικού, εξετάσαμε τρεις διαφορετικές εφαρμογές στις προσομοιώσεις: Voice Call, Streaming και FTP (File Transfer Protocol), για τις οποίες είχαμε πάρει μετρήσεις, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3. Επιπλέον στην περίπτωση του αλγορίθμου AUHO εξετάσαμε για

κάθε μία από τρεις εφαρμογές και διαφορετικά προφίλ χρήστη, όπως αυτά ορίζονται από την ανάθεση βαρών στις παραμέτρους RSS, Cost, Quality και Lifetime. Στον Πίνακα 22, συνοψίζουμε τα χαρακτηριστικά του κάθε σημείου πρόσβασης των διαφορετικών ασύρματων δικτύων, που χρησιμοποιήσαμε στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης, ενώ στον Πίνακα 23 καταγράψαμε τα στοιχεία αναφορικά με την ταχύτητα και την πορεία, που διέγραψε το κινητό τερματικό στο σενάριο αυτό.

Πίνακας 22: Χαρακτηριστικά σημείων πρόσβασης (Σενάριο 1^ο)

Ασύρματο δίκτυο (Σημείο πρόσβασης)	UMTS (BS1)	UMTS (BS2)	UMTS (BS3)	WLAN (AP1)	WLAN (AP2)	WLAN (AP3)	HSPA+ (RAS1)
Coverage (meter)	1000	1000	1000	400	400	400	1000
Bandwidth (kbyte)	1000	1000	1000	3000	3000	3000	3000
Delay (ms)	413	413	413	30	30	30	194
Jitter (ms)	10	10	10	8	8	8	10
BER (dB)	0,001	0,001	0,001	1,0E-4	1,0E-4	1,0E-4	0,001
Throughput (Mbyte/s)	0,3	0,3	0,3	1,0	1,0	1,0	0,8
Burst Error	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,5
Packet Loss Ratio	0,07	0,07	0,07	0,02	0,02	0,02	0,038
Cost Rate (\$/min)	0,25	0,25	0,25	0,05	0,05	0,05	0,67
Power Con (W)	1,534	1,534	1,534	1,372	1,372	1,372	1,967
Power Idle (W)	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	1,7
Min Velocity (km/h)	0	0	0	0	0	0	0
Max Velocity (km/h)	300	300	300	20	20	20	300
Συντεταγμένες	226/361	491/427	775/502	368/367	526/396	736/451	743/534

Πίνακας 23: Στοιχεία κίνησης κινητού τερματικού MNI

Ευθύγραμμο τμήμα (x _A ,x _B) - (y _A ,y _B)	Ταχύτητα (km/h)
(147,316) – (219,317)	40
(219,317) – (270,326)	40
(270,326) – (344,352)	10
(344,352) – (610,419)	10
(610,419) – (633,428)	40
(633,428) – (690,451)	40
(690,451) – (807,486)	40
(807,486) – (864,504)	40
Συνολικός χρόνος προσομοίωσης: 651 sec	

Στα υποκεφάλαια, που ακολουθούν, παρουσιάζουμε και αναλύουμε τις γραφικές παραστάσεις για την κατανάλωση ισχύος του τερματικού συγκρίνοντας τους διαφορετικούς αλγόριθμους απόφασης κάθετης μεταπομπής για διαφορετικές εφαρμογές και διαφορετικά προφίλ χρήστη.

5.1.1 Κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές εφαρμογές

Αρχικά συγκρίνουμε τους αλγορίθμους απόφασης κάθετης μεταπομπής Basic-RSS, Basic-Cost, Basic-Quality, Basic-Lifetime και AUHO ως προς την κατανάλωση ισχύος, που παρουσιάζουν στο τερματικό για τρεις διαφορετικές εφαρμογές:

- Voice Call
- Streaming και
- FTP Download

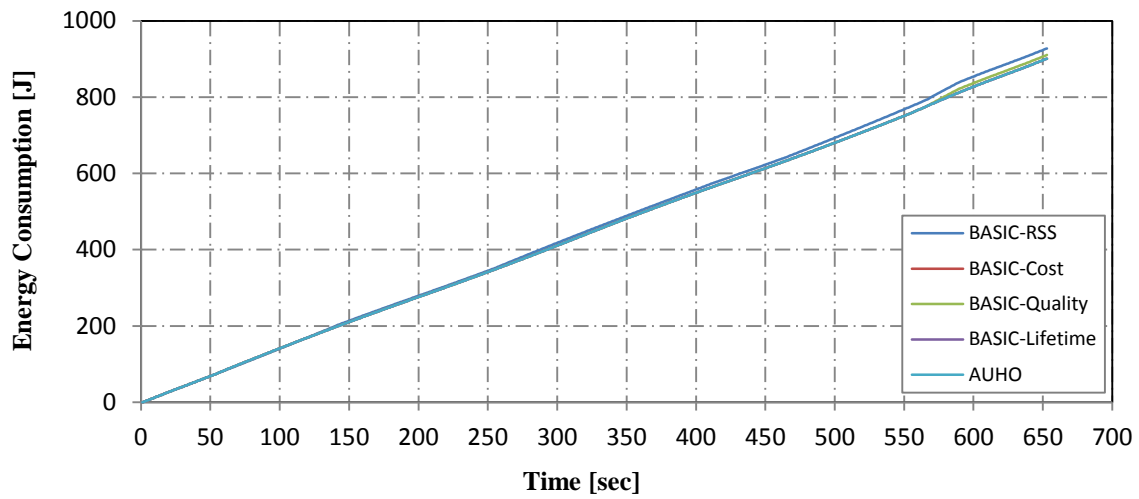
Σε αυτή την περίπτωση ορίσαμε για τις τρεις εφαρμογές ένα κοινό προφίλ χρήστη Cost-Quality. Τα βάρη για τις παραμέτρους RSS, Cost, Quality και Lifetime για το συγκεκριμένο προφίλ χρήστη προκύπτουν με βάση τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 24):

Πίνακας 24: Βάρη παραμέτρων RSS, Cost, Quality και Lifetime για διαφορετικά προφίλ χρήστη

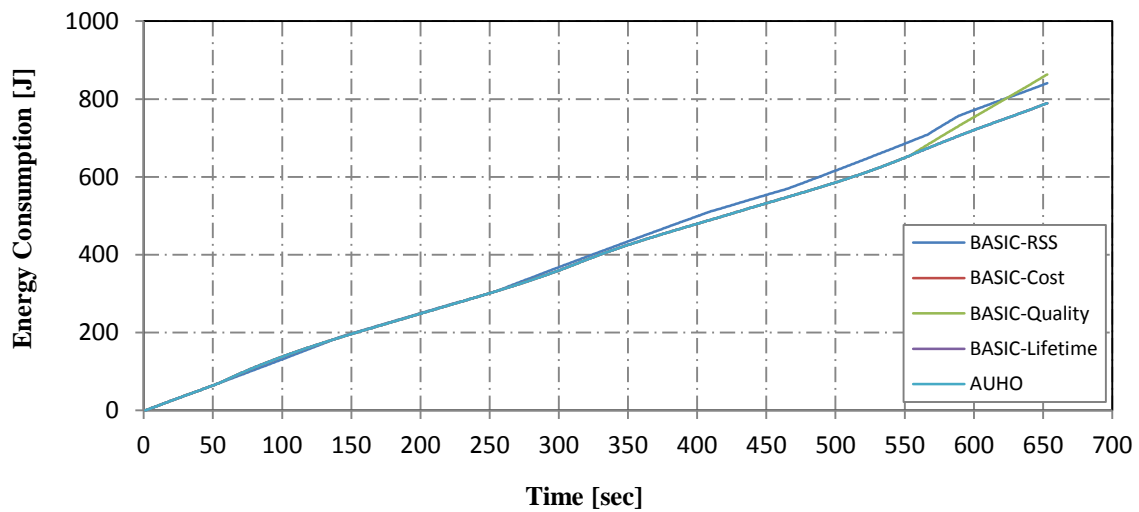
Προφίλ χρήστη	RSS	Cost	Quality	Lifetime	RSS& Cost	...	Cost& Quality& Lifetime	RSS& Cost& Quality& Lifetime
W_R	0,7	0,1	0,1	0,1	0,4	...	0,1	0,25
W_C	0,1	0,7	0,1	0,1	0,4	...	0,3	0,25
W_Q	0,1	0,1	0,7	0,1	0,1	...	0,3	0,25
W_L	0,1	0,1	0,1	0,7	0,1	...	0,3	0,25

Για το συγκεκριμένο προφίλ Cost&Quality θα έχουμε επομένως $W_C = 0,4$, $W_Q = 0,4$ και $W_R = 0,1$, $W_L = 0,1$. Στο πρώτο σετ γραφικών παραστάσεων, που ακολουθεί, (Εικόνα 5-2) έχουμε σχεδιάσει την κατανάλωση ενέργειας ως προς το χρόνο [Joule/sec] για τις τρεις υπηρεσίες (VoiceCall, Streaming και FTP) για προφίλ χρήστη Cost-Quality. Το σενάριο προσομοίωσης είναι αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 5-1. Αντίστοιχα οι αλγόριθμοι απόφασης κάθετης μεταπομπής που συγκρίνουμε είναι αυτοί που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 4.2. Στο δεύτερο σετ γραφικών παραστάσεων (Εικόνα 5-3) συγκρίνουμε την ολική κατανάλωση ενέργειας, τον αριθμό κάθετων μεταπομπών που πραγματοποιήθηκαν και τη μέση τιμή του δείκτη ικανοποίησης του χρήστη APSV επί τοις εκατό, όταν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είχε επιλεγθεί ως πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής ο εκάστοτε αλγόριθμος.

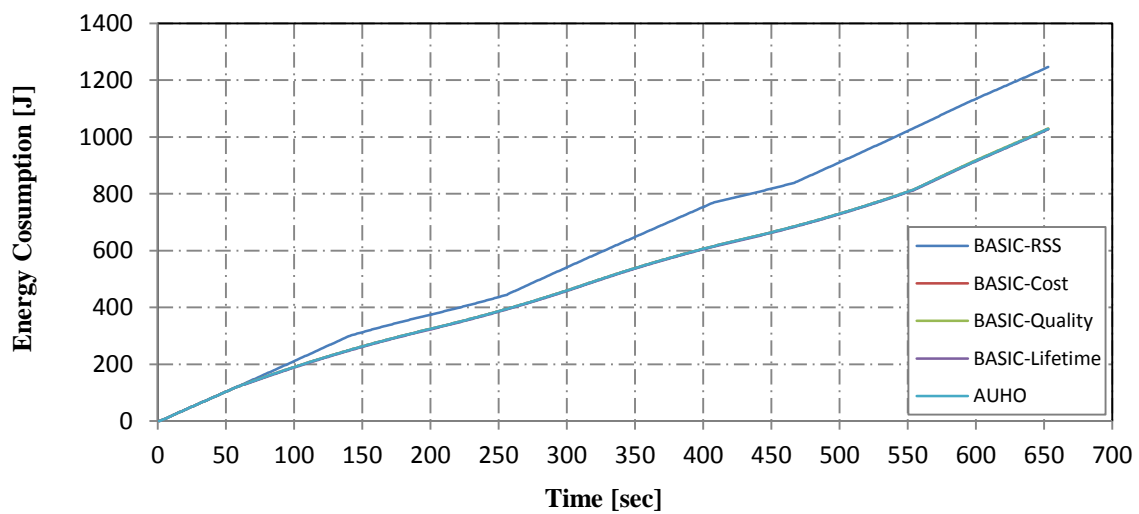
VoiceCall - QC



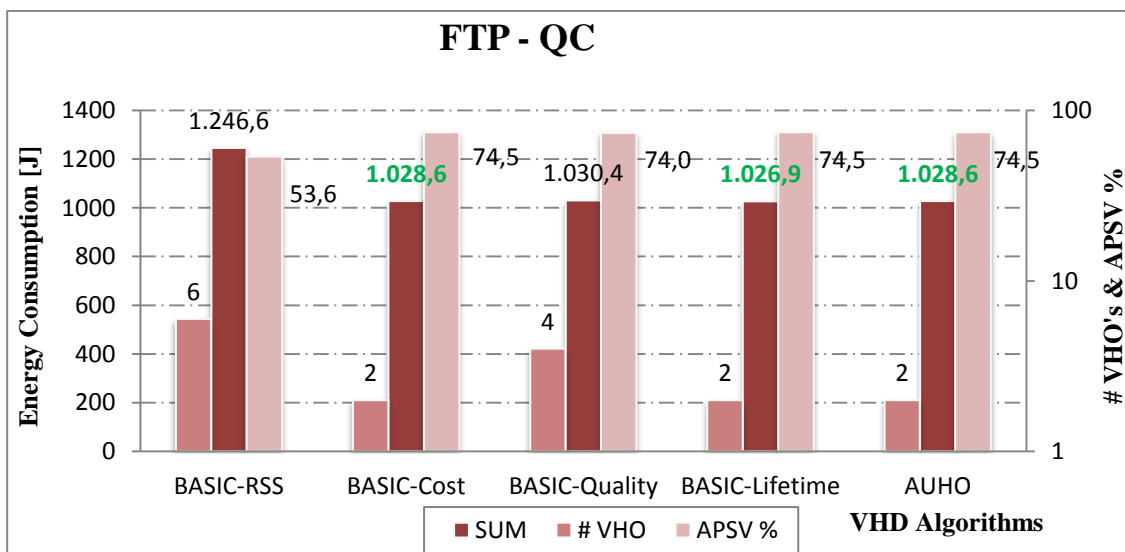
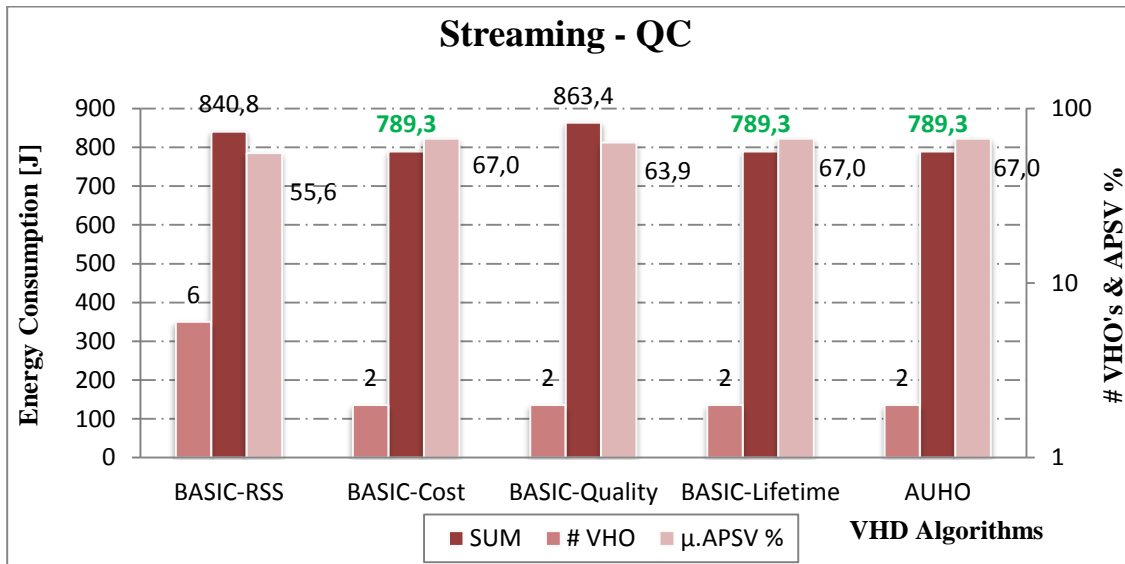
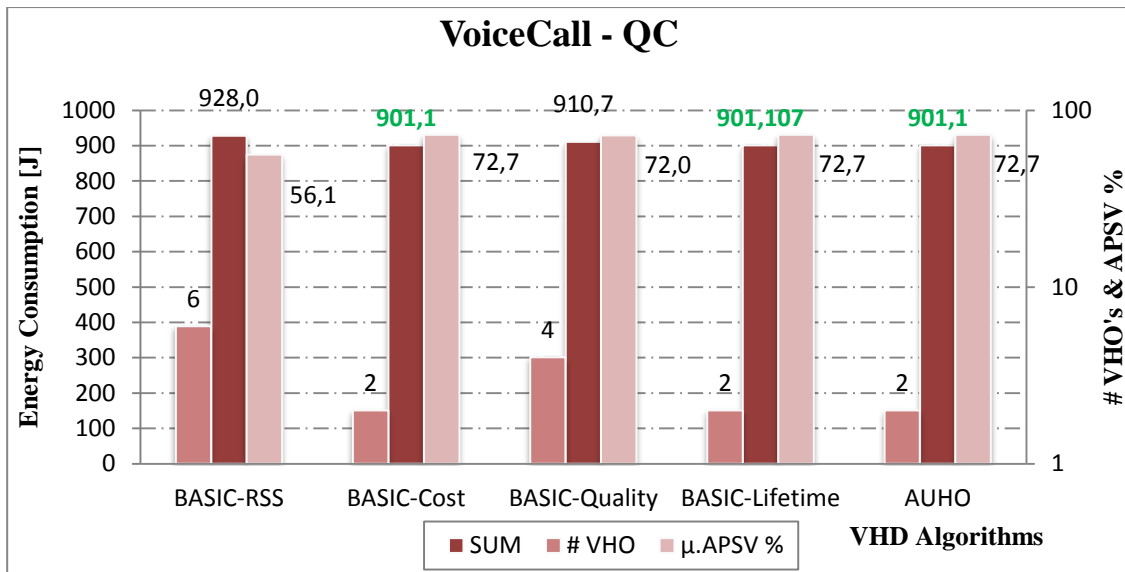
Streaming - QC



FTP - QC



Εικόνα 5-2: Κατανάλωση ενέργειας [Joule/sec] για διαφορετικούς αλγόριθμους απόφασης κάθετης μεταμορφής για υπηρεσίες VoiceCall, Streaming και FTP για προφίλ Cost&Quality



Εικόνα 5-3: Ολική κατανάλωση ενέργειας [Joule], αριθμός κάθετων μεταπομπών και δείκτης ικανοποίησης APSV% για διαφορετικές υπηρεσίες για προφίλ Cost&Quality

Παρατηρήσεις:

Από τις παραπάνω γραφικές παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος Basic-RSS προσφέρει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για τις εφαρμογές Voice Call και FTP, ενώ ο αλγόριθμος Basic-Quality προσφέρει τη μεγαλύτερη κατανάλωση για την εφαρμογή Streaming. Η μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, την οποία έχουμε σημειώσει με πράσινο χρώμα στην Εικόνα 5-3, απορρέει από τους αλγόριθμους AUHO, Basic-Cost και Basic-Lifetime. Εξετάζοντας τον Πίνακα 25 για τον δείκτη ικανοποίησης του χρήστη (APSV) παρατηρούμε ότι οι αλγόριθμοι που προσφέρουν τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό, έχουν ταυτόχρονα και το μεγαλύτερο δείκτη APSV. Η παρατήρηση ότι ο αλγόριθμος AUHO, μαζί με τους αλγορίθμους Basic-Cost και Basic-Lifetime, προσφέρει τη μεγαλύτερη ικανοποίηση στο χρήστη, όπως αυτή μετριέται μέσω του δείκτη APSV, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι είναι ο μοναδικός προσαρμόσιμος αλγόριθμος, καθώς μπορεί να λάβει υπόψιν τις προτιμήσεις του χρήστη, μας ώθησε στο να δημιουργήσουμε ένα νέο σενάριο προσομοίωσης και να εξετάσουμε περισσότερα προφίλ χρήστη. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε, τόσο για το σενάριο της Εικόνας 5-1 όσο και για ένα νέο σενάριο, την κατανάλωση ενέργειας στην πλευρά του τερματικού, που παρατηρείται όταν έχει επιλεγθεί ως πολιτική απόφασης κάθετης μεταπομπής ο αλγόριθμος AUHO για διαφορετικά προφίλ χρήστη. Τα αποτελέσματα και οι γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

Πίνακας 25: Μέση τιμή του δείκτη ικανοποίησης του χρήστη APSV για κάθε αλγόριθμο απόφασης κάθετης μεταπομπής ($0 \leq \text{APSV} \leq 1$)

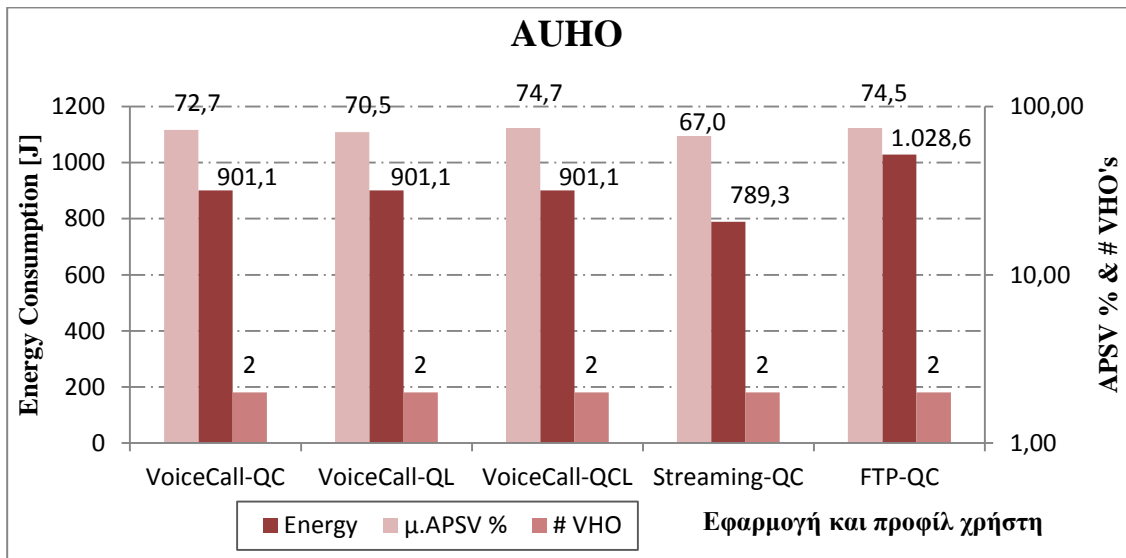
Προφίλ χρήστη	Εφαρμογή	Basic-RSS	Basic-Cost	Basic-Quality	Basic-Lifetime	AUHO
		Μέση τιμή APSV				
Cost & Quality	Voice Call	0,561	0,727	0,72	0,727	0,727
	Streaming	0,556	0,67	0,639	0,67	0,67
	FTP	0,536	0,745	0,74	0,745	0,745

5.2 Κατανάλωση ενέργειας αλγορίθμου AUHO για διαφορετικά

προφίλ χρήστη

Στο κεφάλαιο αυτό συγκρίνουμε την κατανάλωση ενέργειας, που αποφέρει ο αλγόριθμος AUHO για διαφορετικές εφαρμογές και διαφορετικά προφίλ χρήστη. Η επιλογή για προσομοίωση του αλγορίθμου AUHO βασίστηκε σε τρεις παράγοντες. Πρώτον λόγω του υψηλού βαθμού ικανοποίησης (APSV) που προσφέρει στον χρήστη (Πίνακας 25), δεύτερον επειδή λαμβάνει υπόψιν τις προτιμήσεις του χρήστη (Εικόνα 5-4)

και τρίτον επειδή με βάση τα αποτελέσματα της πρώτης προσομοίωσης προσφέρει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό (Εικόνα 5-3).



Εικόνα 5-4: Αποτελέσματα αλγορίθμου AUHO για διαφορετικές εφαρμογές και διαφορετικά προφίλ χρήστη

Όπως παρατηρούμε από την τελευταία γραφική παράσταση (Εικόνα 5-4) ο αλγόριθμος AUHO παρουσιάζει διακυμάνσεις στην κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό για διαφορετικές εφαρμογές αλλά όχι για διαφορετικά προφίλ χρήστη για το πρώτο σενάριο. Για τις διαφορετικές εφαρμογές ο αλγόριθμος AUHO εξετάζει διαφορετικούς κανόνες ασαφούς λογικής για τον υπολογισμό των $APAV_Q$ και $APAV_L$ (όπως και οι Basic-Quality και Basic-Lifetime) και θεωρεί διαφορετικές σχέσεις για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ισχύος. Αντίστοιχα για τα διαφορετικά προφίλ συνυπολογίζει την τιμή της κάθε παραμέτρου (RSS, Cost, Quality και Lifetime) ανάλογα με το εκάστοτε προφίλ χρήστη μέσω του δείκτη APSV. Ο λόγος, που δεν παρατηρούμε σε αυτό το σενάριο διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας για τα διαφορετικά προφίλ, είναι ότι το δίκτυο WLAN υπερτερεί του δικτύου UMTS και στις τρεις παραμέτρους (Quality, Cost και Lifetime), που εξετάσαμε στο σενάριο αυτό. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε ωστόσο την κατανάλωση ενέργειας, που αποφέρει ο αλγόριθμος AUHO στο τερματικό για έξι νέα προφίλ, ώστε να αξιολογήσουμε ποιες παραμέτρους οφείλει να εξετάζει ένας αλγόριθμος απόφασης κάθετης μεταπομπής, ώστε να ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό. Τα έξι διαφορετικά προφίλ χρήστη, που εξετάσαμε είναι τα παρακάτω και η αξιολόγησή τους έγινε σε δύο διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης:

- RSS
- Cost
- Quality
- Lifetime

- RSS&Quality
- RSS&Cost&Quality&Lifetime

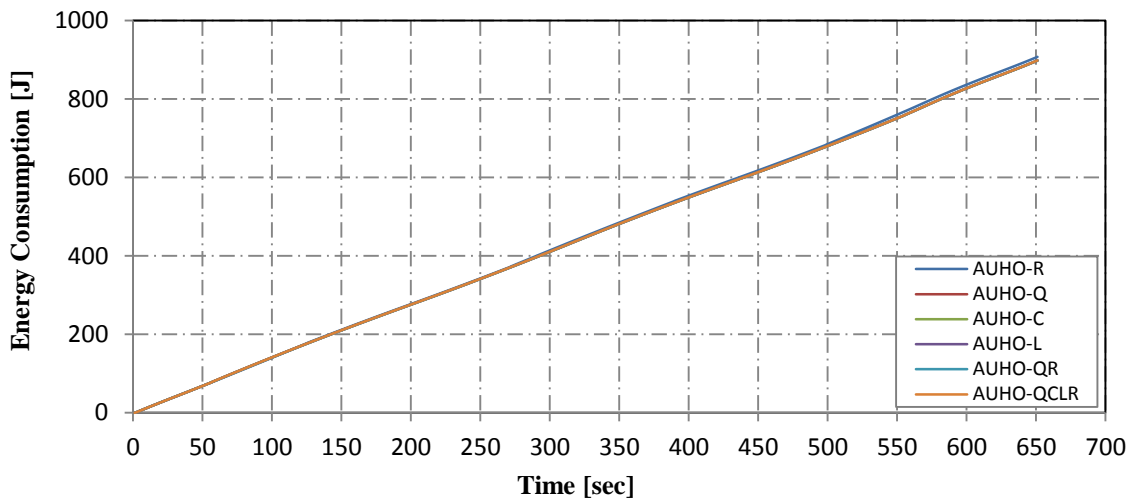
Υπενθυμίζουμε παρακάτω τον πίνακα από το οποίον προκύπτουν τα βάρη για τις παραμέτρους RSS, Cost, Quality και Lifetime με βάση το εκάστοτε προφίλ χρήστη.

User Preference	RSS	Cost	Quality	Lifetime	RSS& Cost	...	Cost& Quality& Lifetime	RSS& Cost& Quality& Lifetime
W_R	0,7	0,1	0,1	0,1	0,4	...	0,1	0,25
W_C	0,1	0,7	0,1	0,1	0,4	...	0,3	0,25
W_Q	0,1	0,1	0,7	0,1	0,1	...	0,3	0,25
W_L	0,1	0,1	0,1	0,7	0,1	...	0,3	0,25

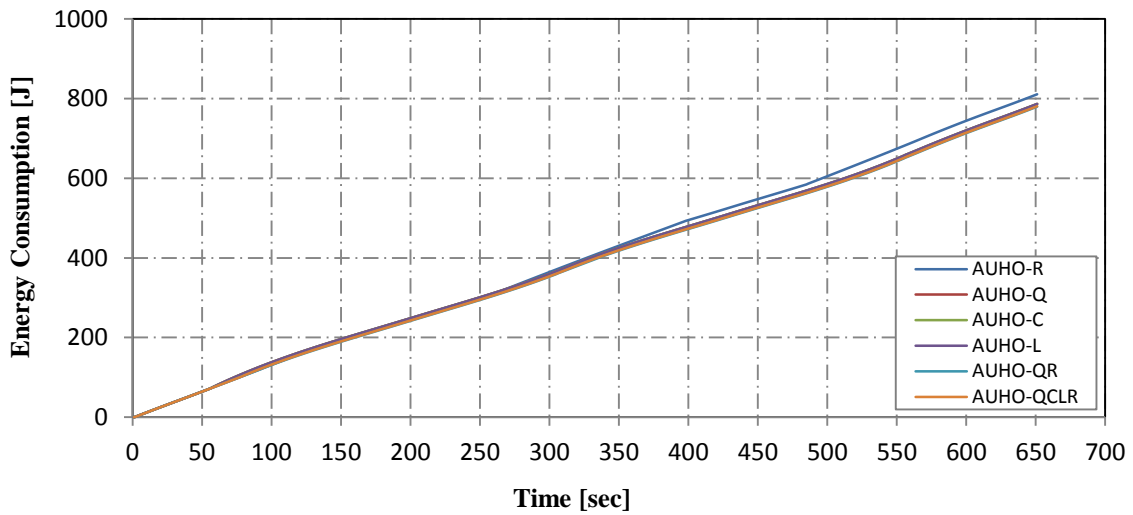
5.2.1 Σενάριο 1^ο

Στο 1^ο σενάριο εξετάζουμε την κατανάλωση ενέργειας που αποφέρει ο αλγόριθμος AUHO για τα έξι παραπάνω προφίλ χρήστη για το σενάριο που εξετάσαμε στο υποκεφάλαιο 5.2 (Εικόνα 5-1). Αντίστοιχα με το προηγούμενο υποκεφάλαιο, έχουμε σχεδιάσει στο πρώτο σετ γραφικών παραστάσεων (Εικόνα 5-5) την κατανάλωση ενέργειας ως προς το χρόνο [Joule/sec] του αλγορίθμου AUHO για τα έξι διαφορετικά προφίλ χρήστη που επιλέξαμε για τις τρεις διαφορετικές υπηρεσίες που προσομοιώσαμε. Στο δεύτερο σετ γραφικών παραστάσεων (Εικόνα 5-6) συγκρίνουμε την ολική κατανάλωση ενέργειας [Joule], τον αριθμό των κάθετων μεταπομπών που πραγματοποιήθηκαν και τη μέση τιμή του δείκτη ικανοποίησης του χρήστη APSV%, όταν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είχε επιλεγεί το εκάστοτε προφίλ χρήστη για τον αλγόριθμο AUHO.

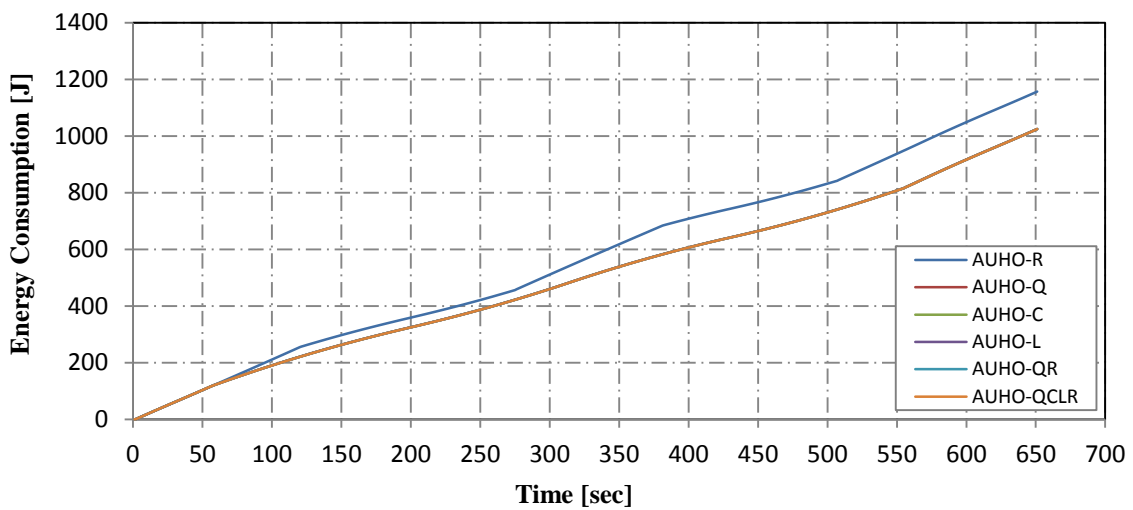
VoiceCall



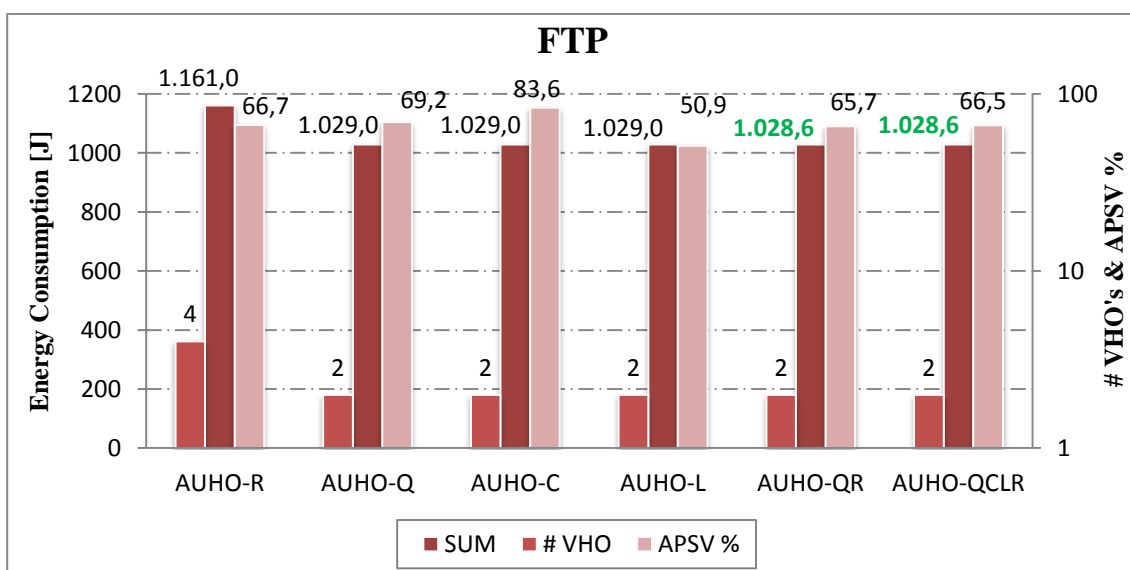
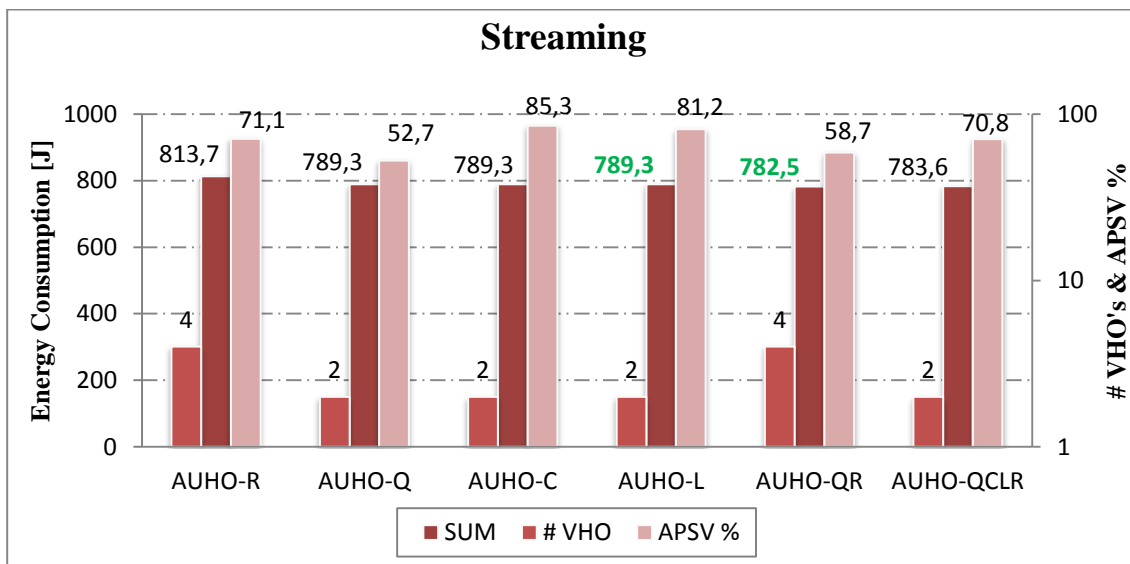
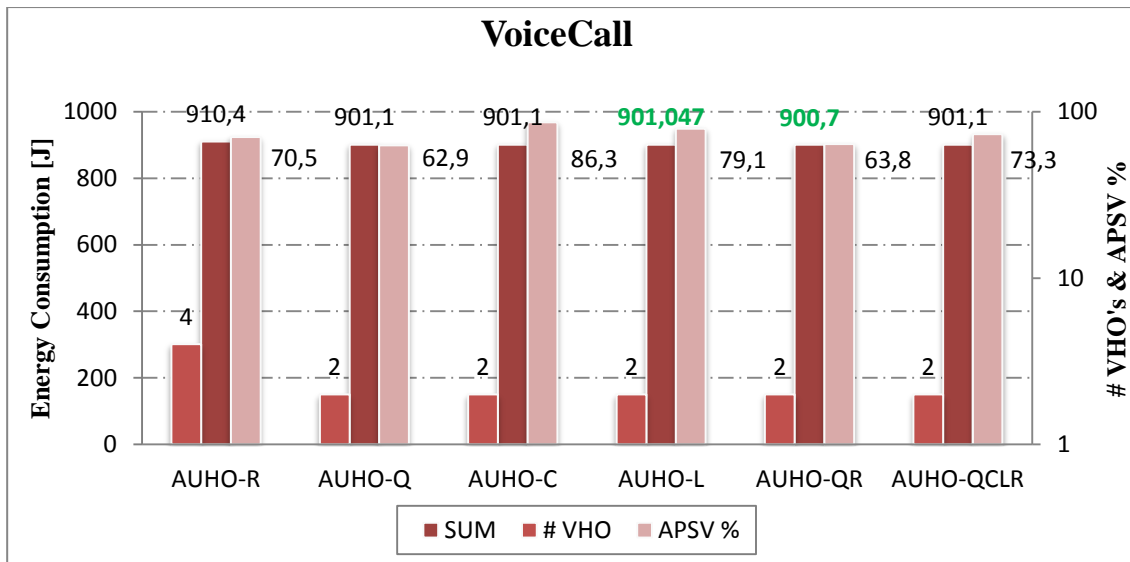
Streaming



FTP



Εικόνα 5-5: Κατανάλωση ενέργειας αλγορίθμου AUHO ως προς χρόνο [Joule/sec] για διαφορετικά προφίλ χρήστη για διαφορετικές υπηρεσίες



Εικόνα 5-6: Ολική κατανάλωση ενέργειας [Joule], αριθμός κάθετων μεταπομπών και μέση τιμή δείκτη ικανοποίησης χρήστη APSV% για διαφορετικά προφίλ χρήστη αλγορίθμου AUHO

Παρατηρήσεις:

Μελετώντας τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις θα εξετάσουμε ξεχωριστά την κατανάλωση ενέργειας που αποφέρει ο αλγόριθμος AUHO για τα προφίλ χρήστη, που παρουσιάζουν διαφορετικά αποτελέσματα, με σκοπό να αιτιολογήσουμε πως προκύπτει αυτή και να διερευνήσουμε τους παράγοντες της διαδικασίας κάθετης μεταπομπής, που συνεισφέρουν κατά κύριο λόγο στην κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό. Ειδικά για την ανάλυση της συνεισφοράς της ισχύος λαμβανόμενου σήματος RSS στην κατανάλωση ενέργειας, παραθέτουμε τον Πίνακα 26. Στον πίνακα αυτό καταγράφουμε τη μέση τιμή του δείκτη $APAV_R$ του τερματικού για τις προσομοιώσεις του πρώτου σεναρίου. Ο δείκτης $APAV_R$ εκφράζει ποσοτικά την ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS, όπως αυτή μετρείται μέσω του δείκτη RSSI από το πρόγραμμα HMNToolSuite ($0 \leq APAV_R \leq 1$). Προφανώς όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη $APAV_R$ τόσο μεγαλύτερο είναι και το RSS. Στον Πίνακα 26 με έντονη γραμματοσειρά είναι η μέση τιμή του RSS για το προφίλ χρήστη, που παρουσιάζει τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε κάθε εφαρμογή, όπως φαίνεται από τις γραφικές παραστάσεις της Εικόνας 5-6.

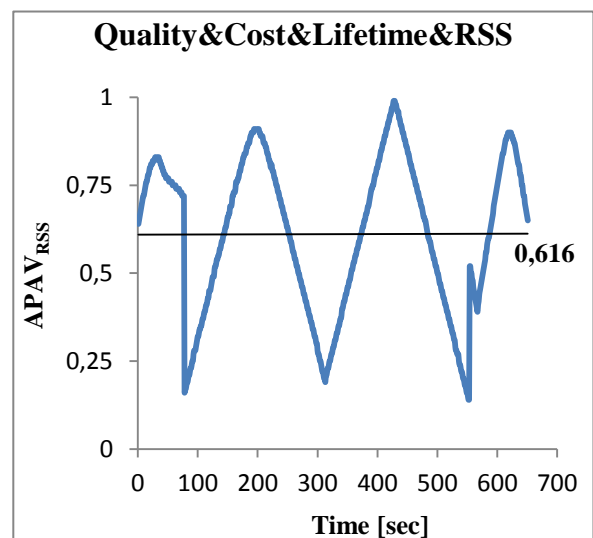
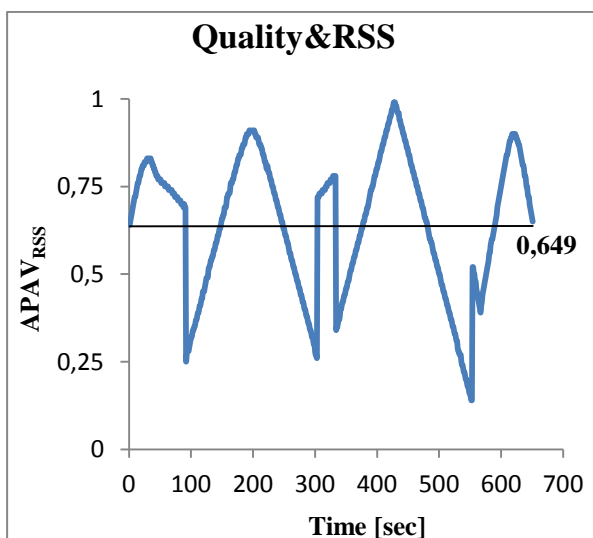
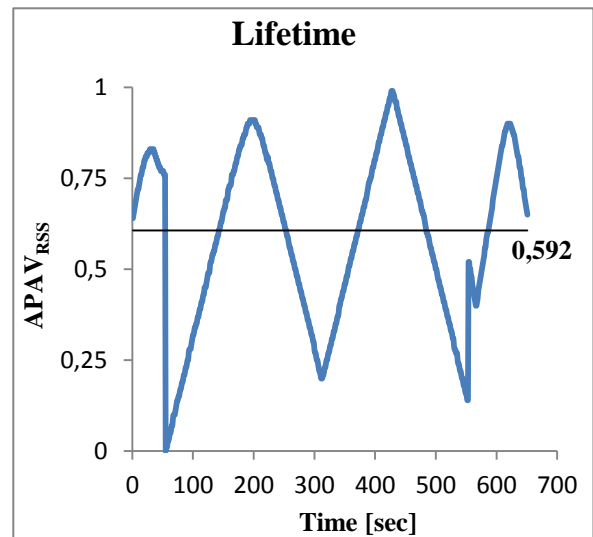
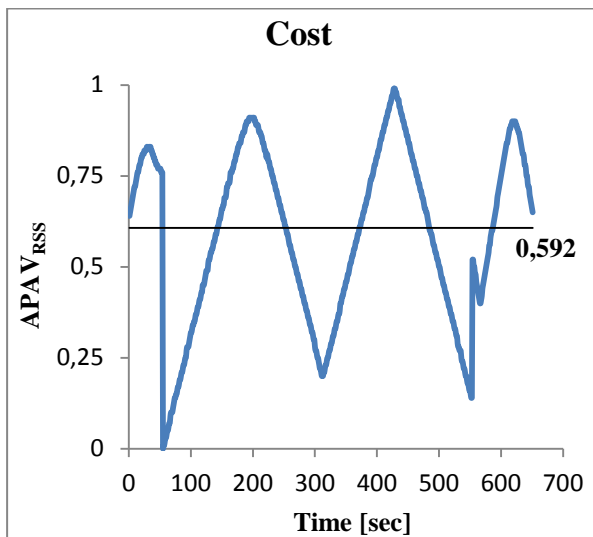
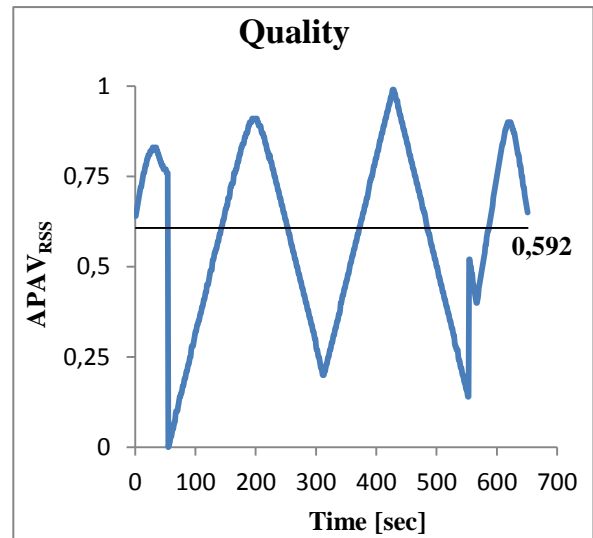
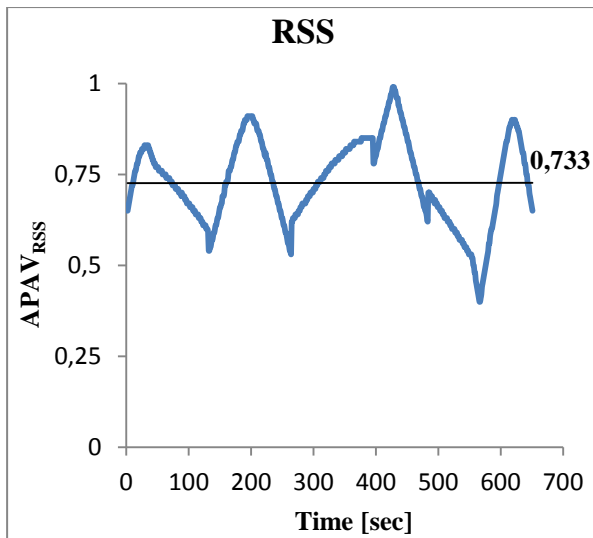
Πίνακας 26: Μέση τιμή $APAV_R$ του κινητού κόμβου για διαφορετικά προφίλ αλγορίθμου AUHO

	<i>AUHO-R</i>	<i>AUHO-Q</i>	<i>AUHO-C</i>	<i>AUHO-L</i>	<i>AUHO-QR</i>	<i>AUHO-QCLR</i>
<i>Voice Call</i>	0,727	0,592	0,592	0,593	0,600	0,592
<i>Streaming</i>	0,733	0,592	0,592	0,592	0,649	0,616
<i>FTP</i>	0,720	0,593	0,593	0,593	0,592	0,592

Παρατηρούμε ότι το προφίλ του αλγορίθμου AUHO, που παρουσιάζει τον υψηλότερο μέσο όρο για την τιμή του RSS, δηλαδή το AUHO-R έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό. Αντίθετα τα συνδυαστικά προφίλ, που εξετάζουν τις παραμέτρους Quality&RSS και Quality&Cost&Lifetime& RSS, φαίνεται να παρουσιάζουν τελικά την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό.

Στις γραφικές παραστάσεις, που ακολουθούν στην επόμενη σελίδα, απεικονίζεται η τιμή του $APAV_R$ ως προς το χρόνο για διαφορετικά προφίλ χρήστη της εφαρμογής VoiceCall για τις προσομοιώσεις του πρώτου σεναρίου (Εικόνα 5-7).

Στη συνέχεια εξετάζουμε και αναλύουμε την κατανάλωση ενέργειας του αλγορίθμου AUHO για ορισμένα προφίλ που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, με σκοπό να διερευνηθούν οι παράμετροι που συνεισφέρουν κατά κύριο λόγο στην αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στο τερματικό.



Εικόνα 5-7: Τιμή δείκτη $APAV_{RSS}$ ως προς τον χρόνο για το σημείο πρόσβασης που είναι συνδεδεμένο το τερματικό για εφαρμογή Streaming και διαφορετικά προφίλ χρήστη

- **AUHO-R**

Όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρούμε ξανά ότι, όταν το προφίλ χρήστη θεωρεί το RSS ως κυρότερο παράγοντα (AUHO-R) τότε η κατανάλωση ενέργειας του αλγορίθμου είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τα υπόλοιπα προφίλ χρήστη. Συγκεκριμένα η κατανάλωση ενέργειας του AUHO-R είναι η μέγιστη και για τις τρεις εφαρμογές. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς ο αλγόριθμος AUHO-R μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με τον αλγόριθμο Basic-RSS, τον οποίο εξετάσαμε στο υποκεφάλαιο 5.2, ο οποίος απέφερε επίσης τη μέγιστη κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό. Όπως αναφέραμε και στην ανάλυση των αλγορίθμων στο κεφάλαιο 4.2, τόσο ο άπληστος αλγόριθμος Basic-RSS όσο και ο AUHO-R επιλέγουν το δίκτυο, που προσφέρει τη μεγαλύτερη ισχύ λαμβανόμενου σήματος. Κάνοντας αυτή την επιλογή το τερματικό στην ουσία εξασφαλίζει ότι η ισχύς λαμβανόμενου σήματος δεν θα υποχωρήσει στις χαμηλότερες δυνατές τιμές, καθώς συνδέεται πάντα στο σημείο πρόσβασης που προσφέρει το μεγαλύτερο RSS. Ως εκ τούτου η ηλεκτρονική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το τερματικό είναι σχετικά μικρή με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της μπαταρίας της συσκευής. Η ενέργεια που αποταμιεύεται ωστόσο μέσω των αλγορίθμων αυτών δεν αντισταθμίζει το γεγονός ότι το τερματικό θα μπορούσε να έχει συνδεθεί σε ένα λιγότερο ενεργοβόρο ασύρματο δίκτυο. Έτσι τελικά μπορεί η ισχύς λαμβανόμενου σήματος RSS να αποτελεί έναν παράγοντα καθοριστικής σημασίας για την κατανάλωση ισχύος στο τερματικό σε ένα σενάριο κάθετων μεταπομπών, δεν πρέπει όμως να αποτελεί τον μοναδικό ή κυριότερο παράγοντα απόφασης γιατί θα οδηγηθούμε όπως είδαμε σε αυξημένη κατανάλωση ισχύος στο κινητό. Αυτό αποδεικνύεται χαρακτηριστικά μέσα και από τα στοιχεία του Πίνακα 27, στον οποίο παρατηρούμε την ολική κατανάλωση ενέργειας των αλγορίθμων Basic-RSS και AUHO-R για το πρώτο σενάριο προσομοίωσης. Υπενθυμίζουμε ότι ο αλγόριθμος AUHO-R, θεωρεί ως σημαντικότερη μεταβλητή το RSS, λαμβάνει όμως υπόψιν και σε ένα μικρό ποσοστό τις μεταβλητές Cost, Quality και Lifetime.

Πίνακας 27: Ολική κατανάλωση ισχύος αλγορίθμων Basic-RSS και AUHO-R

	Basic-RSS	AUHO-R
<i>VoiceCall</i>	927,952	910,358
<i>Streaming</i>	840,76	813,658
<i>FTP</i>	1246,642	1161,036

- **AUHO-Q, AUHO-C και AUHO-L**

Στο πρώτο αυτό σενάριο προσομοίωσης παρατηρούμε ότι τα προφίλ χρήστη, που στηρίζονται στην ποιότητα των υπηρεσιών του δικτύου (AUHO-Q), το κόστος (AUHO-C) και την κατανάλωση ενέργειας λόγω της σύνδεσης στο δίκτυο (AUHO-L), αποφέρουν την ελάχιστη ή κοντά στην ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό. Αυτό οφείλεται ωστόσο στην τοπολογία του πρώτου σεναρίου και στον τρόπο που έχουν

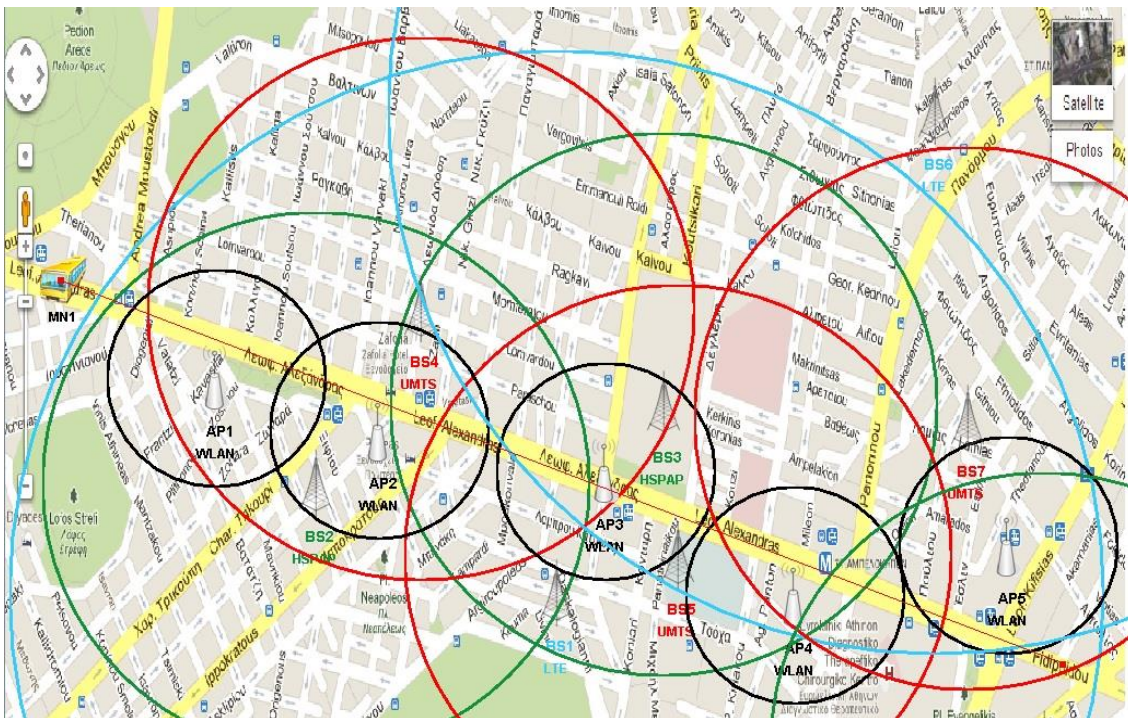
διαταχθεί οι σταθμοί βάσης των διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (Εικόνα 5.1). Συγκεκριμένα αυτό συμβαίνει επειδή ο αλγόριθμος AUHO για τα παραπάνω προφίλ χρήστη επιλέγει να συνδεθεί στο δίκτυο WLAN, όταν βρίσκεται στην εμβέλειά του, καθώς υπερτερεί τόσο του δικτύου UMTS όσο και του δικτύου HSPA+, σε ότι αφορά τις παραμέτρους Quality, Cost και Lifetime. Εφόσον το δίκτυο WLAN είναι το λιγότερο ενεργοβόρο δίκτυο από τα τρία που εξετάζονται στο πρώτο σενάριο και η εμβέλεια των σημείων πρόσβασής του καλύπτουν σχεδόν όλη τη διαδρομή του τερματικού τα προφίλ, αυτά καταλήγουν να προσφέρουν τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό και να μην μπορούμε να παρατηρήσουμε διαφορές στη συμπεριφορά τους. Για το λόγο αυτό κατασκευάσαμε ένα δεύτερο πιο σύνθετο σενάριο (κεφάλαιο 5.3.2), με περισσότερους σταθμούς βάσης από τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (WLAN, UMTS, HSPA+ και LTE) και μεγαλύτερη διάρκεια προσομοίωσης, ώστε να εξετάσουμε τις διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας, που μπορεί να παρουσιάζουν τα παραπάνω προφίλ.

- **AUHO-QR και AUHO-QCLR**

Τα συγκεκριμένα προφίλ χρήστη αποτελούν προφανώς συνδυασμό των προηγούμενων προφίλ. Παρουσιάζουν ωστόσο ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς παρατηρούμε ότι αποφέρουν την απολύτως ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και για τις τρεις εφαρμογές έστω και με μικρή διαφορά από τα προηγούμενα προφίλ. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η ισχύς λαμβανόμενου σήματος από το ασύρματο δίκτυο, στο οποίο είναι συνδεδεμένο το κινητό, αποτελεί έναν εξαιρετικά κρίσιμο παράγοντα σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας σε αυτό. Έτσι, παρόλο που ένα δίκτυο μπορεί να είναι θεωρητικά λιγότερο ενεργοβόρο από ένα άλλο, θα πρέπει να ελέγχεται και το RSS, που προσφέρουν τα δύο αυτά δίκτυα. Χαρακτηριστικά παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της προσομοίωσης της εφαρμογής Streaming, όπου για τα δίκτυα WLAN και UMTS έχουμε ορίσει παραπλήσιες σχέσεις κατανάλωσης ισχύος - RSS, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3.5 (Πίνακας 12), η κατανάλωση ενέργειας του αλγορίθμου AUHO, όταν προσμετρά στο προφίλ χρήστη το RSS, είναι αισθητά μικρότερη. Έτσι παρόλο που τα απλά προφίλ Cost, Quality και Lifetime επιλέγουν πάντα το λιγότερο ενεργοβόρο δίκτυο WLAN, τελικά καταλήγουν να αποφέρουν λίγο μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό από τα συνδυαστικά προφίλ Quality& RSS και Quality&Cost&Lifetime& RSS, διότι δεν λαμβάνουν υπόψιν το RSS. Αυτό συμβαίνει επειδή το κινητό όταν είναι συνδεδεμένο σε ένα δίκτυο WLAN με κακό σήμα (χαμηλό RSS) καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από το να ήταν συνδεδεμένο στο θεωρητικά πιο ενεργοβόρο UMTS με καλύτερη όμως ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS.

5.2.2 Σενάριο 2^ο

Για να επιβεβαιώσουμε τις παρατηρήσεις που πραγματοποιήσαμε για το πρώτο σενάριο και να διερευνήσουμε περισσότερο τις ιδιότητες, που παρουσιάζει το κάθε προφίλ ξεχωριστά σε ό,τι αφορά την κατανάλωση ενέργειας, επιλέξαμε να δημιουργήσουμε και ένα δεύτερο σενάριο, με μεγαλύτερη χρονική διάρκεια από το πρώτο και περισσότερα σημεία πρόσβασης από περισσότερα RATs. Η τοπολογία του ετερογενούς περιβάλλοντος που δημιουργήσαμε φαίνεται στην Εικόνα 5-8, στην οποία παρατηρούμε την πορεία του κινητού κόμβου καθώς και την χωρική διάταξη των σημείων πρόσβασης. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι υπάρχουν τρεις σταθμοί βάσης του δικτύου HSPA+ (πράσινο χρώμα), πέντε σημεία πρόσβασης για το πρότυπο 802.11 (WLAN) (μαύρο χρώμα), τρεις ασύρματοι σταθμοί πρόσβασης για το δίκτυο UMTS (κόκκινο χρώμα) και δύο σταθμοί βάσης για το δίκτυο LTE (γαλάζιο χρώμα). Η χρονική διάρκεια του δεύτερου σεναρίου ορίστηκε στα έντεκα λεπτά και πενήντα δευτερόλεπτα (710 sec), όσος χρόνος απαιτείται ακριβώς δηλαδή για να φτάσει ο κινητός κόμβος από το σημείο έναρξης στο σημείο λήξης. Η πορεία του κινητού τερματικού MN1 καθορίζεται και πάλι από το ευθύγραμμο τμήμα, που ενώνει τις κόκκινες τελείες, ενώ η ταχύτητα του τερματικού ήταν σταθερή στα 20 km/h καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως και στο πρώτο σενάριο εξετάσαμε τα ίδια διαφορετικά προφίλ χρήστη για τις ίδιες εφαρμογές (Voice Call, Streaming, FTP) ως προς την κατανάλωση ενέργειας που αποφέρει ο αλγόριθμος AUHO στο τερματικό.



Εικόνα 5-8: Σενάριο προσομοίωσης 2 - Πορεία τερματικού

Στον Πίνακα 28 συνοψίζουμε τα χαρακτηριστικά του κάθε σημείου πρόσβασης των διαφορετικών ασύρματων δικτύων που χρησιμοποιήσαμε στις προσομοιώσεις για το

δεύτερο σενάριο, ενώ στον Πίνακα 29 καταγράψαμε τα στοιχεία αναφορικά με την ταχύτητα και την πορεία, που διέγραψε το κινητό τερματικό στο σενάριο αυτό.

Πίνακας 28: Χαρακτηριστικά σημείων πρόσβασης (Σενάριο 2^ο)

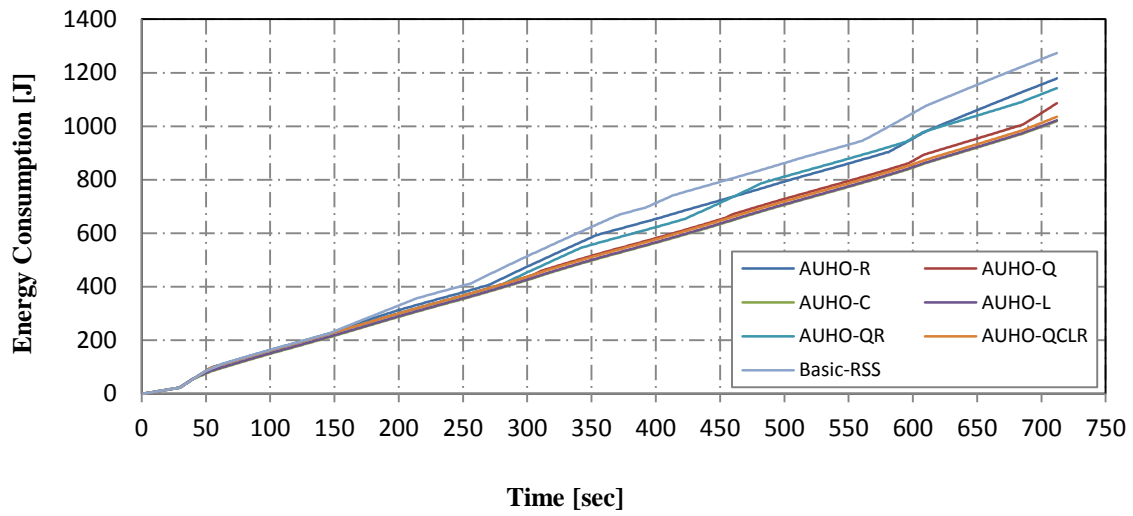
Ασύρματο δίκτυο (Σημείο πρόσβασης)	LTE (BS1/BS6)	HSPA+ (BS2/BS3/BS8)	UMTS (BS4/BS5/BS7)	WLAN (AP1/AP2/AP3/ AP4/AP5)
Coverage (meter)	2000	1000	1000	400
Bandwidth (kbyte)	12500	3000	1000	3000
Delay (ms)	95	194	413	30
Jitter (ms)	6	10	10	8
BER (dB)	0,00001	0,001	0,001	1,0E-4
Throughput (Mbyte/s)	1,8	0,8	0,3	1,0
Burst Error	0,5	0,5	0,5	0,1
Packet Loss Ratio	0,01	0,038	0,07	0,02
Cost Rate (\$/min)	1,25	0,67	0,25	0,05
Power Con (W)	2,536	1,967	1,534	1,372
Power Idle (W)	1,35	1,7	1,0	0,8
Min Velocity (km/h)	0	0	0	0
Max Velocity (km/h)	300	300	300	20
Συντεταγμένες	(504/541, 850,97)	(284/440, 602/367, 950/680)	(380/279, 615/507, 880/380)	(193/343, 342/391, 549/429, 722/543, 917/497)

Πίνακας 29: Στοιχεία κίνησης κινητού τερματικού MN1

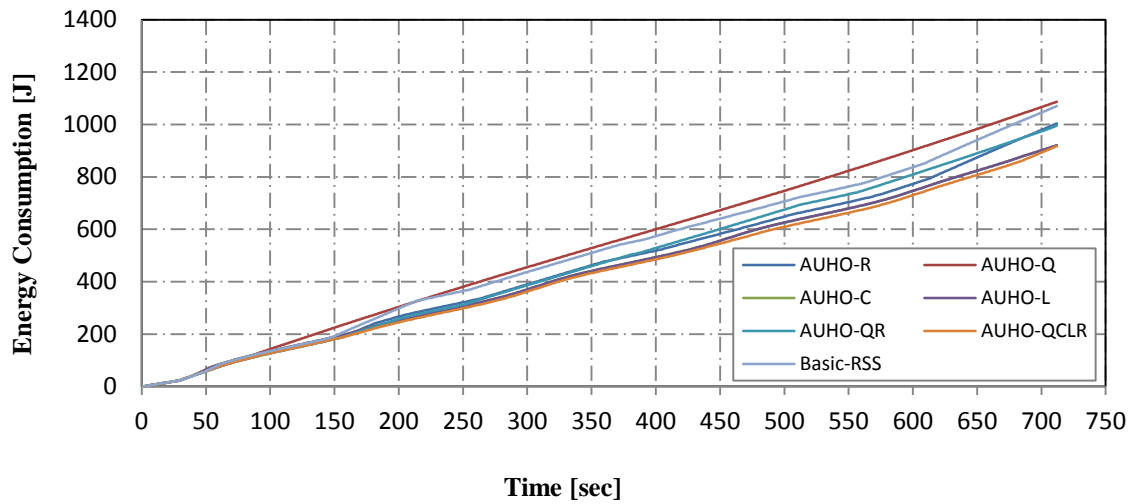
Ευθύγραμμο τμήμα (x _A ,x _B) - (y _A ,y _B)	Ταχύτητα (km/h)
(51,253) – (967,607)	20
Συνολικός χρόνος προσομοίωσης: 710 sec	

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του δεύτερου σεναρίου σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό. Στο πρώτο σετ γραφικών παραστάσεων (Εικόνα 5-9) σχεδιάσαμε την κατανάλωση ενέργειας ως προς το χρόνο [Joule/sec] του αλγορίθμου AUHO για τα έξι διαφορετικά προφίλ χρήστη. Αντίστοιχα στο δεύτερο σετ γραφικών παραστάσεων σχεδιάσαμε την ολική κατανάλωση ενέργειας [Joule], τον αριθμό κάθετων μεταπομπών που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και τη μέση τιμή του δείκτη ικανοποίησης του χρήστη APSV%, όταν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είχε επιλεγθεί το εκάστοτε προφίλ χρήστη για τον αλγόριθμο AUHO (Εικόνα 5-10). Μετά τις γραφικές παραστάσεις των Εικόνων 5-9 και 5-10 παραθέτουμε το τελικό συμπέρασμα σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας στην πλευρά του τερματικού, στο οποίο καταλήξαμε με βάση τα αποτελέσματα από τα δύο σενάρια που υλοποιήσαμε.

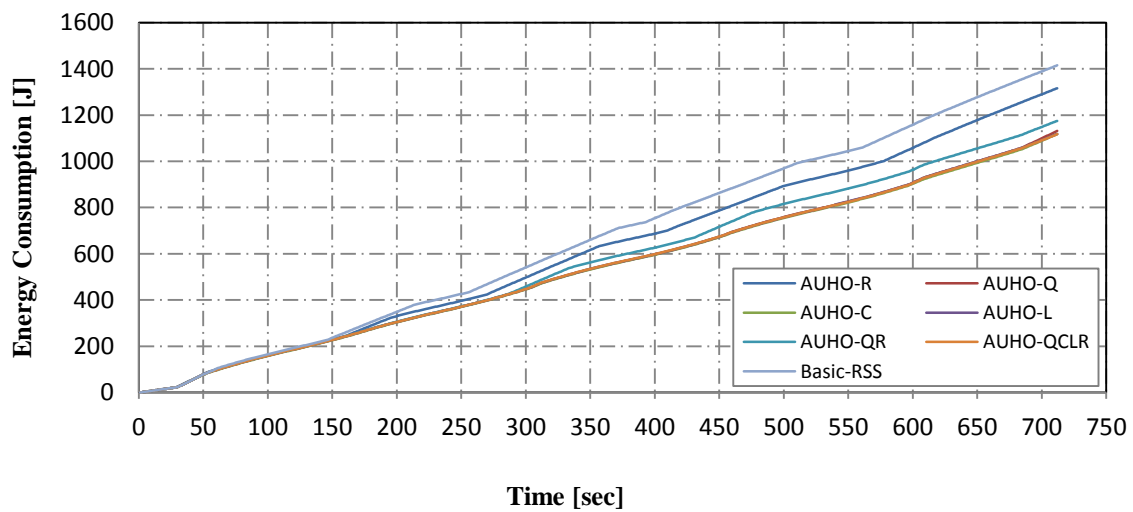
VoiceCall



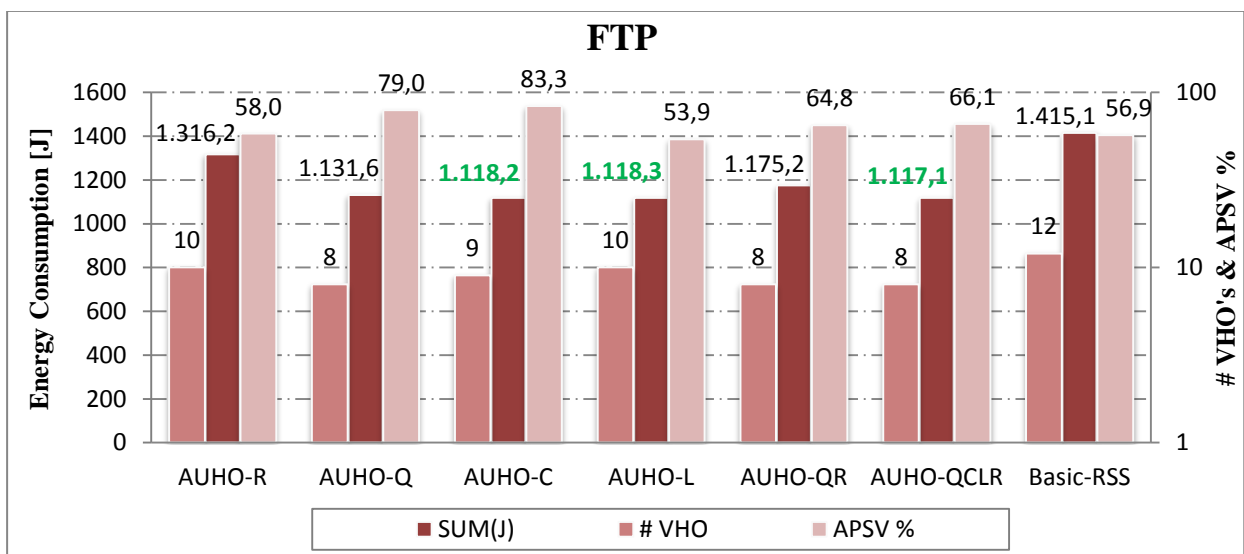
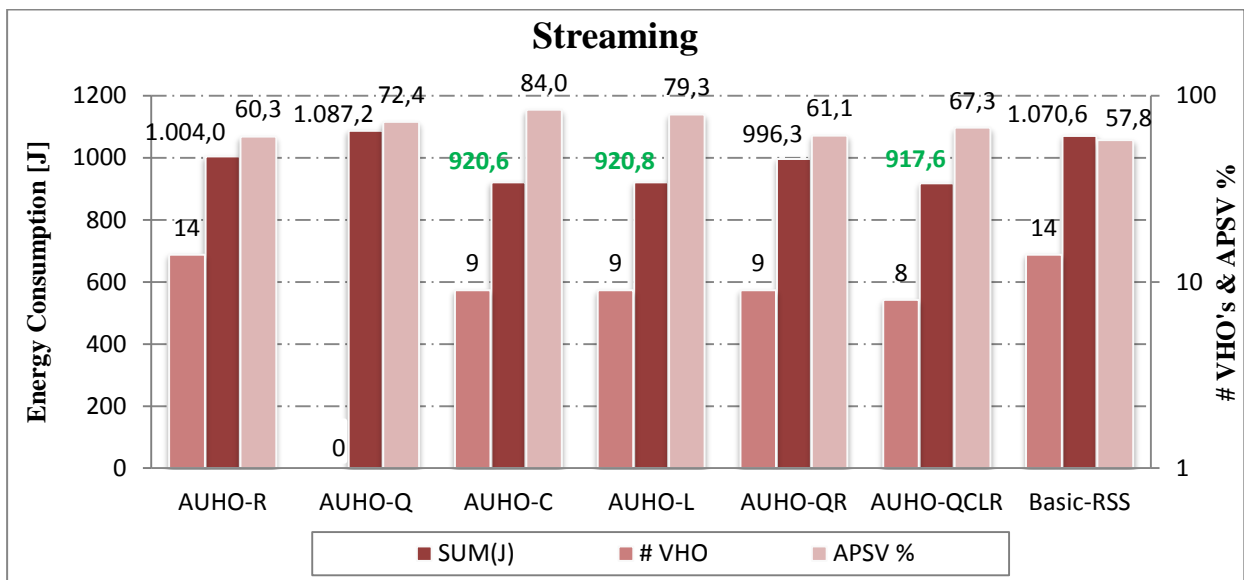
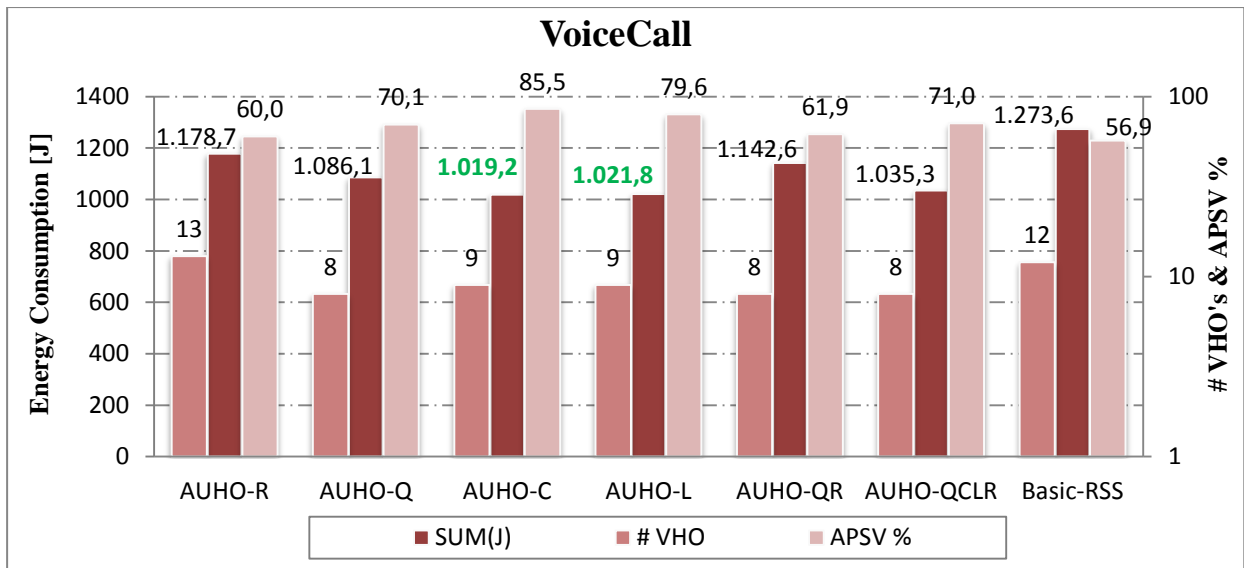
Streaming



FTP



Εικόνα 5-9: Κατανάλωση ενέργειας αλγορίθμου AUHO ως προς χρόνο [Joule/sec] για διαφορετικά προφίλ χρήστη για διαφορετικές υπηρεσίες



Εικόνα 5-10: Ολική κατανάλωση ενέργειας [Joule], αριθμός κάθετων μεταπομπών και μέση τιμή δείκτη ικανοποίησης χρήστη APSV% για διαφορετικά προφίλ χρήστη αλγορίθμου AUHO

Τελικό Συμπέρασμα:

Από τις Εικόνες 5-9 και 5-10, που αφορούν τα στοιχεία σχετικά με το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, έχουμε να κάνουμε τελικά τις εξής παρατηρήσεις. Ο αλγόριθμος AUHO για τα προφίλ Cost (AUHO-C) και Lifetime (AUHO-L) εμφανίζει, όπως και για το πρώτο σενάριο, την ελάχιστη ή πολύ κοντά στην ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό. Αυτό συμβαίνει επειδή και τα δύο συγκεκριμένα προφίλ αξιολογούν τις τέσσερις διαθέσιμες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RATs) ως εξής: 1)WLAN, 2)UMTS, 3)HSPA+ και 4)LTE και επιλέγουν με αυτή την σειρά σε ποιο δίκτυο θα συνδεθούν. Η σειρά αυτή αποτελεί όμως και αύξουσα σειρά των τεσσάρων RATs ως προς την κατανάλωση ενέργειας, που αποφέρουν στο κινητό τηλέφωνο. Το δίκτυο WLAN αποτελεί το λιγότερο ενεργοβόρο πρότυπο ασύρματης σύνδεσης ενώ το δίκτυο LTE το περισσότερο ενεργοβόρο, όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 3.5.

Σε ότι αφορά τη μέγιστη κατανάλωση ενέργειας, που παρατηρήθηκε στα πλαίσια του δεύτερου αυτού σενάρου προσομοίωσης, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος AUHO με προφίλ Quality (AUHO-Q) παρουσιάζει τη μέγιστη κατανάλωση ενέργειας στο κινητό για την εφαρμογή Streaming. Αντίθετα για τις εφαρμογές VoiceCall και FTP παρατηρούμε ότι το ίδιο προφίλ αποφέρει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, ενώ συγκεκριμένα για την εφαρμογή FTP παρατηρούμε ότι αποφέρει κατανάλωση ενέργειας κοντά στην ελάχιστη. Αυτό οφείλεται στους διαφορετικούς κανόνες ασαφούς λογικής, που επεξεργάζεται ο αλγόριθμος AUHO για τις τρεις διαφορετικές εφαρμογές. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 4.1 η ποιότητα των υπηρεσιών εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους: εύρος ζώνης (bandwidth), καθυστέρηση (delay), διακύμανση καθυστέρησης (jitter), ρυθμός σφάλματος bit (BER), ρυθμός διέλευσης (throughput), σφάλμα ακολουθίας (burst error) και ρυθμός απώλειας πακέτων (PLR). Συγκεκριμένα κάθε μία από τις τρεις εφαρμογές, που εξετάσαμε κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, λαμβάνει υπόψιν τα εξής χαρακτηριστικά:

- η εφαρμογή *Voice Call* εξαρτάται κυρίως από την καθυστέρηση (delay) και την διακύμανση καθυστέρησης (jitter),
- η εφαρμογή *Streaming* εξαρτάται κυρίως από το εύρος ζώνης (bandwidth), το ρυθμό διέλευσης (throughput), την καθυστέρηση (delay) και την διακύμανση καθυστέρησης (jitter), ενώ
- η εφαρμογή *FTP* εξαρτάται κυρίως από το ρυθμό σφάλματος bit (BER), το σφάλμα ακολουθίας (burst error) και το ρυθμό απώλειας πακέτων (PLR).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ένας αλγόριθμος, ο οποίος χρησιμοποιεί για την απόφαση κάθετης μεταπομπής πληροφορίες όπως το εύρος ζώνης (bandwidth) και τον ρυθμό διέλευσης (throughput), θα αποφέρει μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στο κινητό από έναν αλγόριθμο, ο οποίος βασίζει την επιλογή του σε πληροφορίες, όπως ο ρυθμός σφάλματος bit (BER), το σφάλμα ακολουθίας (burst error) και ο ρυθμός απώλειας πακέτων (PLR). Αυτό είναι λογικό καθώς ο πρώτος αλγόριθμος θα επιλέξει να συνδεθεί τελικά σε κάποιο ασύρματο δίκτυο, το οποίο θα προσφέρει μεγάλη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, παράλληλα όμως και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, όπως είδαμε στο τρίτο

κεφάλαιο που αναλύσαμε τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις για τις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης.

Όσον αφορά τώρα το συνδυαστικό προφίλ Quality&Cost&Lifetime&RSS, παρατηρούμε ότι και στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, όπως και στο πρώτο, αποφέρει την απολύτως ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας για τις εφαρμογές Streaming και FTP. Αυτό όπως εξηγήσαμε και στο πρώτο σενάριο οφείλεται κυρίως στο ότι συνυπολογίζει τις πληροφορίες Cost και Lifetime, που αποφέρουν μικρή κατανάλωση ενέργειας αλλά και στο γεγονός ότι για τις δύο αυτές εφαρμογές οι σχέσεις κατανάλωσης ισχύος ως προς RSS, που έχουν οριστεί στο τρίτο κεφάλαιο (Πίνακας 12) για τα τέσσερα διαφορετικά RATs, είναι σχετικά κοντινές. Έτσι συνυπολογίζοντας και το RSS, ο αλγόριθμος πετυχαίνει τελικά την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, με το να γνωρίζει πότε πρέπει να αφήσει ένα λιγότερο ενεργοβόρο RAT με ισχύ ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS για ένα περισσότερο ενεργοβόρο RAT με δυνατό RSS.

Τέλος συγκρίνοντας τον αλγόριθμο AUHO με προφίλ RSS (AUHO-R) με τον βασικό αλγόριθμο Basic-RSS έχουμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις. Και για τις τρεις εφαρμογές παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος AUHO-R αποφέρει αισθητά μικρότερη κατανάλωση ενέργειας στο κινητό από τον Basic-RSS. Αυτό οφείλεται, στο γεγονός ότι συνυπολογίζει σε ένα μικρό βαθμό και τις παραμέτρους Cost, Quality και Lifetime με αποτέλεσμα να πραγματοποιεί κάθετη μεταπομπή σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και να γλιτώνει με αυτό τον τρόπο ενέργεια στο κινητό. Τα αποτελέσματα από τις Εικόνες 5-9 και 5-10 επιβεβαιώνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος απόφασης κάθετης μεταπομπής AUHO είναι σε θέση να εντοπίζει τις ευκαιρίες, που είναι εφικτή η εξοικονόμηση ενέργειας και μέσω της κάθετης μεταπομπής να αποφασίζει σε ποιο σταθμό βάσης συμφέρει να συνδεθεί. Σε ότι αφορά τον αριθμό κάθετων μεταπομπών δεν μπορεί να βγει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα από τις γραφικές παραστάσεις των Εικόνων 5-9 και 5-10. Ωστόσο παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος Basic-RSS, ο οποίος πραγματοποιεί το μεγαλύτερο αριθμό κάθετων μεταπομπών συνήθως, παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος στο κινητό. Προφανώς και μεγάλος αριθμός κάθετων μεταπομπών επιφέρει επιβάρυνση στην κατανάλωση ενέργειας του κινητού, λόγω της διαδικασίας της κάθετης μεταπομπής. Ωστόσο παρατηρούμε ότι και ο αλγόριθμος AUHO-Q παρουσιάζει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στο κινητό για την εφαρμογή Streaming, παρόλο που πραγματοποιεί το μικρότερο αριθμό μεταπομπών (μηδέν). Από τα παραπάνω μπορούμε να θεωρήσουμε εν τέλει, ότι τόσο οι υπερβολικά πολλές όσο και οι υπερβολικά λίγες κάθετες μεταπομπές μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας στο κινητό. Στην πρώτη περίπτωση επιβαρύνεται η κατανάλωση ενέργειας του κινητού λόγω της επανάληψης της διαδικασίας κάθετης μεταπομπής, ενώ στη δεύτερη λόγω της αστοχίας του αλγορίθμου απόφασης κάθετης μεταπομπής να επιλέξει τη σύνδεση σε κάποιο λιγότερο ενεργοβόρο δίκτυο.

Πέρα όμως από την κατανάλωση ενέργειας ως προς το χρόνο θα πρέπει να συγκρίνουμε τα διαφορετικά προφίλ του αλγορίθμου AUHO και τον αλγόριθμο Basic-RSS και ως προς τα δεδομένα, που μεταφέρθηκαν κατά τη διάρκεια του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 30), καταγράφονται για την

υπηρεσία FTP-Download για τα έξι διαφορετικά προφίλ του αλγορίθμου AUHO και τον αλγόριθμο Basic-RSS, πληροφορίες όπως η ολική κατανάλωση [Joule], το σύνολο των δεδομένων που μεταφέρθηκαν [Mbyte], η μέση ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων [Mbps], ο λόγος κατανάλωσης προς μεταφερόμενα δεδομένα [Joule/Mbyte] και το ποσοστό αποταμίευσης ενέργειας που πέτυχαν τα διαφορετικά προφίλ του αλγορίθμου AUHO σε σχέση με τον Basic-RSS. Με πράσινο χρώμα έχουμε χρωματίσει τις τιμές των αλγορίθμων που προσφέρουν την ελάχιστη ολική κατανάλωση ενέργειας, ενώ με κόκκινο χρώμα τις τιμές αυτών που αποφέρουν τη μέγιστη κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό. Αντίστοιχα, με πράσινο χρώμα έχουμε χρωματίσει και τις τιμές για τους αλγόριθμους, που παρουσιάζουν το μικρότερο λόγο κατανάλωσης προς μεταφερόμενα δεδομένα και με κόκκινο χρώμα το αντίθετο.

Ο λόγος που εξετάσαμε μόνο την υπηρεσία FTP Download, είναι ότι ο όγκος δεδομένων που μεταφέρεται είναι μεγαλύτερος και θα μπορούσαμε να διερευνήσουμε καλύτερα τις διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των διαφορετικών αλγορίθμων απόφασης κάθετης μεταπομπής. Συγκεκριμένα ενώ για μια υπηρεσία VoIP χρειάζεται ένας σταθερός ρυθμός διέλευσης 12kbps, για μια υπηρεσία FTP μπορούμε να παρατηρήσουμε το μέγιστο δυνατό ρυθμό διέλευσης που μπορεί να προσφέρει το κάθε δίκτυο πρόσβασης. Έτσι από τον Πίνακα 30 παρατηρούμε εν τέλει, ότι τα προφίλ Quality και Quality&RSS του αλγορίθμου AUHO, εμφανίζουν τη καλύτερη σχέση (μικρότερος αριθμός) μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και μεταφερόμενων δεδομένων. Αντίθετα το μεγαλύτερο λόγο Joule/Mbyte έχουν οι αλγόριθμοι AUHO-R και Basic-RSS, που βασίζονται κυρίως στην ισχύ λαμβανόμενου σήματος. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει τον ισχυρισμό μας ότι ένας αλγόριθμος απόφασης κάθετης μεταπομπής, που ελέγχει μόνο ή κατά κύριο λόγο το RSS, δεν αποτελεί καλή υλοποίηση όταν στόχος μας είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο τερματικό.

Από την σκοπιά της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και κατ' επέκτασιν των συνολικά μεταφερόμενων δεδομένων παρατηρούμε επομένως με βάση τον παρακάτω πίνακα, ότι οι αλγόριθμοι AUHO-Q και AUHO-QR παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά. Στον ίδιο χρόνο που οι θεωρητικά «λιγότερο ενεργοβόροι» AUHO-C και AUHO-L μεταφέρουν 568 και 617 Mbyte δεδομένων, αντίστοιχα οι AUHO-Q και AUHO-QR μεταφέρουν 641 και 694 Mbyte αντίστοιχα. Ανεξάρτητα όμως από την σκοπιά, υπό την οποία εξετάζουμε την κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό (χρόνου ή μεταφοράς δεδομένων), παρατηρούμε τελικά ότι ο αλγόριθμος AUHO μπορεί να πετύχει σημαντικά ποσοστά αποταμίευσης σε σχέση με τον απλό αλγόριθμο Basic-RSS, τα οποία κυμαίνονται από 6% έως 21% για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης για την υπηρεσία FTP Download. Η αποταμίευση αυτή κάθε άλλο παρά ασήμαντη μπορεί να αποδειχτεί για την χρήση ενός κινητού τηλεφώνου. Ενδεικτικά μετρήσαμε την κατανάλωση ενέργειας στο κινητό τηλέφωνο για ορισμένες συνηθισμένες δραστηριότητες, ώστε να τις συγκρίνουμε με την αποταμίευση ενέργειας που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος AUHO.

- Συνολική διάρκεια ζωής της μπαταρίας της συσκευής (7,22Wh, 3,8V) – 25.992 J
- Φωτεινότητα οθόνης 100% ~ 800 mJ/s (5 λεπτά = 240 J)
- Φωτεινότητα οθόνης 50% ~ 300 mJ/s (5 λεπτά = 90 J)

- Αναπαραγωγή μουσικής ~ 400 mJ/s (30 λεπτά = 720 J)
- Ελάχιστη αποταμίευση για υπηρεσία FTP ~ 100 J σε προσομοίωση 11 λεπτών
- Μέγιστη αποταμίευση για υπηρεσία FTP ~ 300 J σε προσομοίωση 11 λεπτών

Από τα παραπάνω καταλαβαίνει κανείς ότι η χρήση ενός σωστού αλγορίθμου απόφασης κάθετης μεταπομπής μπορεί να αποφέρει σημαντική αποταμίευση ενέργειας σε ένα κινητό τερματικό και να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας αυτού.

Πίνακας 30: Σύγκριση διαφορετικών προφίλ αλγορίθμου AUHO με Basic-RSS για εφαρμογή FTP

FTP Download	Basic-RSS	AUHO-R	AUHO-Q	AUHO-C	AUHO-L	AUHO-QR	AUHO-QCLR
Ολική κατανάλωση ενέργειας (Joule)	1415,127	1316,191	1131,596	1118,171	1118,304	1175,186	1117,09
Αριθμός VHO	12	10	8	9	10	8	8
Μέση τιμή APSV %	56,87	58,0	79,0	83,3	53,9	64,8	66,1
Σύνολο (MB)	679,56	660,52	641,74	568,43	617,26	694,43	617,96
Μέση ταχύτητα μετάδοσης (Mbps)	7,97	7,74	7,53	6,67	7,24	8,15	7,25
Λόγος κατανάλωσης προς δεδομένα (J/MB)	2,08	1,99	1,76	1,97	1,81	1,69	1,81
Αποταμίευση ενέργειας ως προς Basic-RSS (%)	-	6,99	20,04	20,98	20,98	16,96	21,06

6

Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Μελετώντας τη σύγχρονη βιβλιογραφία παρατηρήσαμε ότι έχουν προταθεί διαφορετικά μοντέλα για την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας του τερματικού κατά την σύνδεσή του σε διαφορετικά ασύρματα δίκτυα πρόσβασης, τα οποία προσφέρουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Όπως είδαμε η ακριβής εκτίμηση κατανάλωσης ενέργειας είναι πολύπλοκη διαδικασία και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από παραμέτρους, που αφορούν τα ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε τερματικού και τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον. Η δε μείωσή της αποτελεί επίσης πολύπλοκη διαδικασία καθώς πέρα από τα προηγούμενα εξαρτάται και από τις ιδιαιτερότητες του κάθε χρήστη και την σκοπιά υπό την οποία επιθυμεί να εξετάσει την κατανάλωση ενέργειας (χρόνου ή μεταφοράς δεδομένων). Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διπλωματική αυτή εργασία, ενώ στο τέλος αναφέρουμε τη μελλοντική εργασία που μπορεί να γίνει με βάση αυτή.

6.1 Συμπεράσματα

Οι προσομοιώσεις, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας, υποδεικνύουν δίχως αμφιβολία ότι είναι εφικτή η παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας ενός κινητού τηλεφώνου με την εφαρμογή του κατάλληλου αλγορίθμου απόφασης κάθετης μεταπομπής. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα, ο αλγόριθμος AUHO, αξιολογώντας τις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης για κάθε εφαρμογή ξεχωριστά, κατάφερε να πετύχει σημαντικά ποσοστά αποταμίευσης ενέργειας στο κινητό

(6%-21% για υπηρεσία FTP) συγκριτικά με τον βασικό άπληστο αλγόριθμο Basic-RSS, που εξετάζει μόνο την ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS. Αυτό το πέτυχε μέσω των εύστοχων κάθετων μεταπομπών που πραγματοποιούσε, επιλέγοντας κάθε φορά την σύνδεση προς το σταθμό βάσης που θα απέφερε την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό.

Συγκεκριμένα όταν μας ενδιαφέρει η κατανάλωση ενέργειας ως προς τον χρόνο στον οποίο είναι συνδεδεμένη η συσκευή, τότε σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, ο αλγόριθμος απόφασης κάθετης μεταπομπής πρέπει να επιλέγει να συνδέεται πρώτα σε δίκτυα WLAN και εφόσον δεν είναι διαθέσιμα να επιλέγει τη σύνδεση σε δίκτυα UMTS, HSPA+ και LTE με αυτή τη σειρά. Επίσης η ισχύς λαμβανόμενου σήματος RSS για κάθε σημείο ασύρματης πρόσβασης πρέπει να παρακολουθείται συστηματικά από τον αλγόριθμο απόφασης κάθετης μεταπομπής, ώστε να είναι σε θέση να γνωρίζει πότε πρέπει να διακόψει τη σύνδεση από ένα λιγότερο ενεργοβόρο RAT με ισχύ ισχύ λαμβανόμενου σήματος RSS για να συνδεθεί σε ένα περισσότερο ενεργοβόρο RAT με δυνατό RSS. Σε ότι αφορά την ποιότητα των υπηρεσιών ο αλγόριθμος απόφασης κάθετης μεταπομπής πρέπει να γνωρίζει ότι, η σύνδεση σε ασύρματα δίκτυα που προσφέρουν υψηλό εύρος ζώνης (bandwidth) και ρυθμό διέλευσης (throughput) είναι πιθανό να οδηγήσουν σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό. Αντίθετα η σύνδεση σε δίκτυα που προσφέρουν χαμηλές τιμές για παραμέτρους, όπως ο ρυθμός σφάλματος bit (BER), το σφάλμα ακολουθίας (burst error) και ο ρυθμός απώλειας πακέτων (PLR), μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο στην περίπτωση μεταφοράς μεγάλου όγκου δεδομένων (τουλάχιστον μερικές εκατοντάδες Mbyte) η εικόνα μπορεί να διαφέρει. Για παράδειγμα χρησιμοποιώντας τις τιμές για τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων των τεσσάρων δικτύων, που μετρήσαμε στο κεφάλαιο 3, για μια μέση τιμή RSSI (RSSI = 50), υπολογίζουμε στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 31) την ολική κατανάλωση ενέργειας σε ένα κινητό τηλέφωνο για τη μεταφορά όγκου δεδομένων μεγέθους 300Mbyte για μια υπηρεσία FTP.

Πίνακας 31: Κατανάλωση ενέργειας για μεταφορά δεδομένων 300Mbyte

	UMTS	WLAN	HSPA+	LTE
<i>FTP</i>	2246 J	431,34 J	859,31 J	414,56 J

Όπως παρατηρούμε σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος απόφασης κάθετης μεταπομπής θα πρέπει να επιλέξει πρωταρχικά τη σύνδεση σε δίκτυο LTE, και αν δεν είναι εφικτό αυτό, τη σύνδεση σε δίκτυα WLAN, HSPA+ και UMTS με αυτή τη σειρά, ώστε να επιτύχει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας στο κινητό. Ο περιορισμός επομένως της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα κινητό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό πέρα από τις ιδιαιτερότητες της συσκευής και από τον τρόπο χρήσης της και τις ανάγκες του ίδιου του χρήστη.

6.2 Μελλοντική εργασία

Σε ότι αφορά τώρα την υλοποίηση ενός ενεργειακά αποδοτικού αλγορίθμου απόφασης κάθετης μεταπομπής για την εξακρίβωση των συμπερασμάτων, στα οποία καταλήξαμε, υπάρχουν κάποιες πτυχές που δεν καλύφθηκαν πλήρως στη διπλωματική αυτή εργασία και χρίζουν περαιτέρω ανάλυσης.

Η πρώτη αφορά τα μοντέλα πρόβλεψης της κατανάλωσης ενέργειας στο κινητό, που προτείναμε για τις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RATs). Όπως είδαμε στη σύγχρονη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διαφορετικές μεθοδολογίες και μοντέλα για την ανάλυση και την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα κινητό, που συνδέεται σε διαφορετικά RATs, οι οποίες μπορούν να δώσουν αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα. Στη διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήσαμε ορισμένες μετρήσεις και προτείναμε μια νέα σχέση μεταξύ της κατανάλωσης ισχύος στο κινητό και της ισχύος λαμβανόμενου σήματος RSS του εκάστοτε σημείου πρόσβασης. Συγκεκριμένα επιλέξαμε το RSS επειδή θεωρήσαμε ότι επηρεάζει στο μεγαλύτερο βαθμό την κατανάλωση ενέργειας, που οφείλεται στη σύνδεση του κινητού τηλεφώνου σε διαφορετικά δίκτυα ασύρματης πρόσβασης. Ωστόσο πιο λεπτομερείς έρευνες της συμπεριφοράς των διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης, που θα εξετάζουν περισσότερους παράγοντες, θα μπορούσαν να καταλήξουν ενδεχομένως σε ακόμη πιο ρεαλιστικά μοντέλα πρόβλεψης της κατανάλωσης ενέργειας στο κινητό τηλέφωνο.

Η δεύτερη αφορά τη λειτουργία των προσομοιώσεων στο πρόγραμμα HMNTToolSuite. Συγκεκριμένα προκειμένου να γίνουν οι προσομοιώσεις πιο ρεαλιστικές θα έπρεπε να μεταβάλλονται δυναμικά οι τιμές των τεχνικών χαρακτηριστικών των ασύρματων δικτύων πρόσβασης (ιδιαίτερα αυτών που αφορούν την ποιότητα των υπηρεσιών), ανάλογα με το φορτίο του δικτύου. Στην διπλωματική αυτή εργασία ο εκάστοτε αλγόριθμος απόφασης κάθετης μεταπομπής διάβαζε από ένα .xml αρχείο κάποιες σταθερές τιμές για τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάθε διαφορετικής τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης και μεταβαλλόταν δυναμικά μόνο η ισχύς λαμβανόμενου σήματος RSS του κάθε σημείου πρόσβασης. Χρησιμοποιώντας δυναμικές τιμές για περισσότερες πληροφορίες θα μπορούσαμε να προσεγγίσουμε καλύτερα την πραγματικότητα και να εξάγουμε επομένως πιο ακριβή και ασφαλή συμπεράσματα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέξαμε ωστόσο να πραγματοποιήσουμε τις προσομοιώσεις με τις σταθερές τιμές που είχαμε για τις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, ώστε να παρουσιάσουμε μια γενική ιδέα για τις διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας που προκύπτουν, όταν το τερματικό συνδέεται σε διαφορετικά δίκτυα. Έτσι τα αποτελέσματα που παρουσιάσαμε στη διπλωματική αυτή εργασία προσφέρουν ακόμη μια εμπειρική ματιά στην κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό, που αποφέρει η σύνδεση σε διαφορετικά RATs, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη και την υλοποίηση ενός ενεργειακά αποδοτικού αλγορίθμου απόφασης κάθετης μεταπομπής. Με τον αλγόριθμο αυτό θα μπορούσε κανείς στη συνέχεια να πραγματοποιήσει μετρήσεις σε ένα πραγματικό ασύρματο ετερογενές περιβάλλον, ώστε

να διερευνηθεί ποια είναι η αποταμίευση ενέργειας που μπορεί να αποφέρει τελικά ο αλγόριθμος αυτός σε πραγματικές συνθήκες.

Ωστόσο μέχρι να γίνει αυτό μένει ανοιχτό το ερώτημα αν αξίζει η πρακτική υλοποίηση ενός περισσότερου πολύπλοκου αλγορίθμου απόφασης κάθετης μεταπομπής ή επαρκεί η χρήση ενός απλού άπληστου αλγορίθμου (π.χ. σύνδεση πάντα σε Wi-Fi, όταν είναι εφικτό). Η απάντηση σε αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο σημαντική θεωρούν οι χρήστες την διάρκεια ζωής της μπαταρίας ενός κινητού τερματικού και είναι κάτι που θα αξιολογήσουν τελικά οι κατασκευαστές και οι πάροχοι τηλεπικοινωνιών.

Βιβλιογραφία

- [1] E. Gustafsson and A. Jonsson, “Always best connected”, IEEE Wireless Communications, vol. 10, issue 1, pp. 49-55, Feb. 2003.
- [2] [online] http://www.cosmote.gr/cosmoportal/.../Group_COSMOTE [Πρόσβαση: 07-Ιουλίου-2013].
- [3] [online] <http://www.statista.com/statistics/.../global-smartphone-shipments-forecast> [Πρόσβαση: 22-Σεπτεμβρίου-2014].
- [4] S. SungHoon and S. JooSeok, “An energy-efficient interface selection for multi-mode terminals by utilizing out-of-band paging channels”, Telecommunication Systems, vol 42, issue 1-2, pp. 151-161, June 2009.
- [5] F. Zarai, I. Smaoui, J.-M. Bonnin and L. Kamoun, “Seamless Mobility in Heterogeneous Wireless Networks”, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN), vol. 2, issue 4, Dec. 2010.
- [6] R. Tawil, G. Pujolle and O. Salazar, “A Vertical Handoff Decision Scheme in Heterogeneous Wireless Systems”, Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE, pp. 2626-2630, May 2008.
- [7] M. Rasih Celenlioglu and H. Ali Mantar “Location History based Energy Efficient Vertical Handover Scheme”, ISITES 2013, June 2013.
- [8] J. M. Rodríguez Castillo, “Energy-Efficient Vertical Handovers”, pp. 3-7, Feb. 2013.
- [9] K. Gomez, D. Boru, R. Riggio, T. Rasheed, D. Miorandi and F. Granelli, “Measurement-based Modelling of Power Consumption at Wireless Access Network Gateways”, vol. 56, issue 10, pp. 2506-2521, July 2012.
- [10] [online] <http://www.eetimes.com/> “Don’t worry, be happy: Design, test, verification support for LTE-Advanced is here”, [Πρόσβαση: 15-Μαΐου-2013].
- [11] M. A. Latif and A. A. Khan, “Quality of service during vertical handover in 3G/4G wireless networks”, pp. 2-3, Feb 2009.
- [12] J.-M. Kang, “Autonomic Management for Personalized Handover Decisions in Heterogeneous Wireless Networks”, Dec. 2010.
- [13] C. Ball, “LTE and WiMax Technology and Performance Comparison”, Nokia Siemens Networks, 2007.
- [14] Σ. Σ. Μητράτου και Μ. Χ. Χορτάτου, “Μελέτη και ανάλυση επίδοσης ελέγχου αποδοχής κλήσεων σε CDMA ασύρματα συστήματα”, Οκτώβριος 2008.

- [15] A. S. Tanenbaum, Δίκτυα Υπολογιστών, τέταρτη αμερικάνικη έκδοση, σελ. 353.
- [16] [online] <http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=248> [Πρόσβαση: 12-Ιουλίου-2013].
- [17] Ι. Κουρούς, “Μελέτη Τεχνολογίας και Εφαρμογών WiMAX”, Μάιος 2009.
- [18] [online] <http://el.wikipedia.org/wiki/WiMAX> [Πρόσβαση: 22-Σεπτεμβρίου-2014].
- [19] [online] <http://ec.europa.eu/digital-agenda/en/news/scoreboard-2014-trends-european-broadband-markets-2014> [Πρόσβαση: 22-Σεπτεμβρίου-2014].
- [20] D. Eberle, “LTE vs. WiMAX 4th generation telecommunication networks”, 2010.
- [21] [online] <http://el.wikipedia.org/wiki/LTE> [Πρόσβαση: 12-Ιουλίου-2013].
- [22] IDATE, “Global LTE forecasts”, Feb. 2013.
- [23] M. Kassar, B. Kervella and G. Pujolle, “An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks”, vol. 31, issue 10, pp. 2607-2620, June 2008.
- [24] E. Stevens-Navarro and V. W.S. Wong, “Comparison between Vertical Handoff Decision Algorithms for Heterogeneous Wireless Networks”, Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd, vol. 2, pp. 947-951, May 2006.
- [25] T. Salam, S. Mushtaq, T. Khalid, M. Ali and M. Amin, “Efficient vertical handover approaches for increased user satisfaction in next generation networks”, Computer Networks and Information Technology (ICCNIT), 2011 International Conference on, pp. 233-239, July 2011.
- [24] A. Zahran, B. Liang και A. Saleh, “Signal threshold adaptation for vertical handoff in heterogeneous wireless networks”, Journal Mobile Networks and Applications, vol. 11, issue 4, pp. 625-640, Aug. 2006.
- [25] X. Yan, N. Mani and Y. Sekercioglu, “A traveling distance prediction based method to minimize unnecessary handovers from cellular networks to WLANs”, Communications Letters, IEEE, vol. 12, issue 1, pp. 14-16, Jan. 2008.
- [26] G. Pollini, “Trends in handover design”, Communications Magazine, IEEE, vol. 34, issue 3, pp. 82-90, Mar. 1996.
- [27] J. McNair and F. Zhu, “Vertical handoffs in fourth-generation multinetwork environments”, IEEE Wireless Communications, vol. 11, issue 3, pp. 8-15, June 2004.
- [28] P. Kosmides, A. Rouskas and M. Anagnostou, “Network Selection in Heterogeneous Wireless Environments”, Telecommunications (ICT), 2011 18th International Conference on, pp. 250-255, May 2011.

- [29] O. Ormond, O. Brid and G. M. Muntean, “User-centric Network Selection Strategy in Heterogeneous Wireless Networks”, PhD diss., University College Dublin, Nov. 2007.
- [30] W. Zhang, “Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), vol. 2, pp. 653-658, Mar. 2004.
- [31] N. Minji, C. Nakjung, S. Yongho and C. Yanghee, “WISE: Energy efficient interface selection on vertical handoff between 3G networks and WLANs”, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium on, vol. 1, pp. 692-698, Sep. 2004.
- [32] S. H. Seo and J. S. Song, “An energy-efficient interface selection for multi-mode terminals by utilizing out-of-band paging channels”, Telecommunication Systems, vol. 42, issue 1-2, pp. 151-161, Oct. 2009.
- [33] N. Salawu and E. N. Onwuka, “Energy Optimisation Mechanism for Mobile Terminals using Vertical Handoff between WLAN and CDMA2000 Networks”, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, issue 15, pp. 51-58, Jan. 2009.
- [34] D. Xenakis, N. Passas, L. Di Gregorio and C. Verikoukis, “A Context-Aware Vertical Handover Framework Towards Energy-Efficiency”, Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd, pp. 1-5, May 2011.
- [35] [online] <http://www.go-gulf.com/> “Web Design Dubai - Dubai Web Design and Web Application Development Company” [Πρόσβαση: 4-Αυγούστου-2013].
- [36] [online] <http://www.android.com/> [Πρόσβαση: 8-Αυγούστου-2013].
- [37] [online] <http://www.apple.com/iphone/> [Πρόσβαση: 8-Αυγούστου-2013].
- [38] [online] <http://www.rim.com/> [Πρόσβαση: 8-Αυγούστου-2013].
- [39] [online] <http://www.microsoft.com/en-gb/default.aspx> [Πρόσβαση: 8-Αυγούστου-2013].
- [40] [online] <http://www.informatandm.com/section/home-page/> [Πρόσβαση: 8-Αυγούστου-2013].
- [41] Infonetics Research, “Analysts Forecast Continued Growth in VoIP Services Market”.
- [42] Duc Hoang Bui, Kilho Lee, Sangeun Oh, Insik Shin, Hyojeong Shin, Honguk Woo and Daehyun Ban, “GreenBag: Energy-efficient Bandwidth Aggregation for Real-time Streaming in Heterogeneous Mobile Wireless Networks”, Real-Time Systems Symposium (RTSS), 2013 IEEE 34th, pp. 56-67, Dec. 2013.
- [43] [online] http://www.energia.gr/article.asp?art_id=73850 [Πρόσβαση 12-Σεπτεμβρίου-2013].

- [44] [online] <http://www.theguardian.com/books/2012/aug/06/amazon-kindle-ebook-sales-overtake-print> [Πρόσβαση: 22-Σεπτεμβρίου-2014].
- [45] [online] <http://lifehacker.com/5948075/how-much-energy-a-smartphone-uses-in-a-year-and-what-it-means-for-your-budget> [Πρόσβαση: 22-Σεπτεμβρίου-2014].
- [46] J. Huang, F. Qian, A. Gerber, Z. Morley Mao, S. Sen and O. Spatscheck, “A Close Examination of Performance and Power Characteristics of 4G LTE Networks”, Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services, ACM, pp. 225-238, June 2012.
- [47] A. Carroll and G. Heiser, “An Analysis of Power Consumption in a Smartphone”, Proceedings of the 2010 USENIX conference on USENIX annual technical conference, pp. 21-21, June 2010.
- [48] G. Kalic, I. Bojic and M. Kusek, “Energy consumption in android phones when using wireless communication technologies”, MIPRO, 2012 Proceedings of the 35th International Convention, pp. 754-759, May 2012.
- [49] K. Gomez, D. Boru, R. Riggio, T. Rasheed, D. Miorandi and F. Granelli, “Measurement-based Modelling of Power Consumption at Wireless Access Network Gateways”, Computer Networks, vol. 56, issue 10, pp. 2506-2521, July 2012.
- [50] Findlay Shearer, “Power management in mobile devices”, chapter Batteries and Displays for Mobile Devices, Newnes, pp. 149-180, 2011.
- [51] [online] <https://software.intel.com/en-us/android/articles/android-power-measurement-techniques> [Πρόσβαση: 7-Ιουλίου-2014].
- [52] [online] <https://github.com/android/.../TelephonyManager.java> [Πρόσβαση: 22-Σεπτεμβρίου-2014].
- [53] [online] http://en.wikipedia.org/wiki/Received_signal_strength_indication [Πρόσβαση: 7-Ιουλίου-2014].
- [54] [online] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.viber.voip&hl=en> [Πρόσβαση: 7-Ιουλίου-2014].
- [55] [online] <https://play.google.com/...?id=com.google.android.youtube&hl=en> [Πρόσβαση: 7-Ιουλίου-2014].
- [56] [online] <https://play.google.com/store/apps/details?id=lysesoft.andftp&hl=en> [Πρόσβαση: 7-Ιουλίου-2014].
- [57] H.-H. Choi and D.-H. Cho “TAKEOVER: A New Vertical Handover Concept for Next-Generation Heterogeneous Networks”, Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st, vol. 4, pp. 2225-2229, June 2005.

[58] G.P. Perrucci, F.H.P. Fitzek and J. Widmer, “Survey on Energy Consumption Entities on the Smartphone Platform”, Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd, pp. 1-6, May 2011.

[59] Niranjan Balasubramanian, Aruna Balasubramanian and Arun Venkataramani “Energy Consumption in Mobile Phones: A Measurement Study and Implications for Network Applications”, Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference, ACM, pp. 280-293, Nov. 2009.

[60] Hyunwoo Nam, Bong Ho Kim, Doru Calin and Henning Schulzrinne, “Mobile Video is Inefficient: A Traffic Analysis”, 2013

[61] Charalampos N. Pitas, Eleni D. Avgeri, Marilena P. Kallenou and Philip Constantinou, “Measurements and QoS Analysis of Live-World Mobile Telecommunication Networks”, 3rd Pan-Hellenic Conference of Electrical and Computer Engineering Students, Apr. 2009.

[62] [online] <http://opensignal.com/networks/.../gr-cosmote...> [Πρόσβαση: 22-Σεπτεμβρίου-2014].

[63] M. Alasti, B. Neekzad, J. Hui and R. Vannithamby, “Quality of service in WiMAX and LTE networks”, Communications Magazine, IEEE, vol. 48, issue 5, pp. 104-111, May 2010.