



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Απομακρυσμένος έλεγχος ΣΗΕ μέσω προσομοίωσης λογισμικού τηλεπικοινωνιακού σκοπού

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχαήλ Γ. Χριστοφοράκης

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Απομακρυσμένος έλεγχος ΣΗΕ μέσω προσομοίωσης λογισμικού τηλεπικοινωνιακού σκοπού

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχαήλ Γ. Χριστοφοράκης

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την^η Οκτωβρίου 2017

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Παύλος Γεωργιλάκης

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Νικόλαος Ουζούνογλου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

.....

Χριστοφοράκης Μιχαήλ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright© Μιχαήλ Γ. Χριστοφοράκης, 2017

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 ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα κατά κοινή ομολογία αποτελούν το επόμενο στάδιο εξέλιξης για όλα τα ηλεκτρικά δίκτυα παγκοσμίως. Το έξυπνο δίκτυο ενσωματώνει σύγχρονο εξοπλισμό και τηλεπικοινωνιακά συστήματα, παρέχοντας στο διαχειριστή του μια ευρεία γκάμα δυνατοτήτων ελέγχου. Μία ιδιαίτερα διαδεδομένη και αναπτυσσόμενη τεχνολογία που αναδιαμορφώνει πλήρως τα δίκτυα διανομής όπως τα γνωρίζαμε, είναι οι έξυπνοι μετρητές. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, παρουσίαση και προσομοίωση ενός συστήματος το οποίο ενσωματώνει έξυπνους μετρητές και ελέγχεται απομακρυσμένα λαμβάνοντας δεδομένα μέσω τηλεπικοινωνιακών δικτύων τρίτης γενιάς.

Η εργασία απαρτίζεται ουσιαστικά από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος παρέχει το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο και περιλαμβάνει τα κεφάλαια 1 έως 3. Το 1^ο κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και περιγράφει τη δομή των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και ειδικότερα του ελληνικού δικτύου, στο οποίο επικεντρώνεται η μελέτη. Στο 2^ο κεφάλαιο, αναλύεται η έννοια του Ευφυούς Δικτύου, με έμφαση στα αυτοματοποιημένα συστήματα μέτρησης και ελέγχου και στις τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές που ενσωματώνει. Το 3^ο κεφάλαιο παρέχει μια εκτενή αναφορά στο τηλεπικοινωνιακό πρωτόκολλο τρίτης γενιάς UMTS που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας αφορά την πειραματική διαδικασία και περιλαμβάνει τα κεφάλαια 4 έως 6. Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του λογισμικού προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε, του OPNET Modeler της Riverbed. Το 5^ο κεφάλαιο, περιλαμβάνει την περιγραφή της μελέτης που αφορά τον απομακρυσμένο έλεγχο ενός συστήματος έξυπνων μετρητών στην Κρήτη από την Αθήνα, καθώς και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων διαφορετικών σεναρίων προσομοίωσης. Τελικά, στο 6^ο και τελευταίο κεφάλαιο, αναφέρονται ορισμένα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της μελέτης και παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα που αφορούν τη βελτίωσή τους.

Λέξεις κλειδιά: Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο, Έξυπνος Μετρητής, Απομακρυσμένος έλεγχος, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, UMTS, Πρωτόκολλα, OPNET, Riverbed Modeler, 3G.

Abstract

Smart grids are widely considered to be the next evolutionary step for all electric systems throughout the world. A smart grid integrates modern equipment and telecommunication systems, thus providing a wide variety of control capabilities to its operator. Smart metering technologies are exceptionally popular and developing, and completely change the way we define distribution systems. The present thesis aims at the study, presentation and simulation of a system which integrates smart meters and which is remotely controlled receiving data by third generation telecommunication networks.

This thesis practically consists of two parts. The first part provides the theoretical background regarding the research and includes chapters 1 to 3. The 1st chapter is introductory and describes the structure of Electric Power Systems, focusing on the Greek network. In the 2nd chapter, the concept of Smart Grid is analyzed, placing emphasis on automated metering systems and telecommunication applications. The 3rd chapter provides an extensive report regarding the third generation telecommunication protocol UMTS, which was used in this study.

The second part of the thesis has to do with the simulation process and includes chapters 4 to 6. The 4th chapter introduces OPNET Modeler, the simulation software by Riverbed, which was used in this research. In the 5th chapter, a detailed description of the simulated model is given, regarding a smart metering system in the Greek island of Crete remotely controlled by systems in Athens. In this chapter, the results of different simulation scenarios are also presented. Lastly, the 6th chapter presents the conclusions reached from these results, as well as some proposals for future research aiming to their improvement.

Keywords: Smart Grid, Smart Meter, Remote Control, Electric Power Systems, UMTS, Protocols, OPNET, Riverbed Modeler, 3G

Πρόλογος

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωταρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ανάθεση της εργασίας και τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα. Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στο Δρ. κ. Γεώργιο Κιόκε, μέλος ΕΕΔΙΠ της Σχολής Ικάρων και συνεργάτη ερευνητή του εργαστηρίου ΣΗΕ, για την αγαστή συνεργασία μας, τις πολύτιμες συμβουλές του και την καθοδήγηση που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα. Ευχαριστώ επίσης τον ερευνητή Ανδρέα Δαύρο για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.

Τέλος, ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ αξίζουν η οικογένεια και οι φίλοι μου, οι οποίοι αποτελούν μια διαρκή πηγή έμπνευσης, στήριξης και αγάπης.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	17
1.1 Εισαγωγή.....	17
1.2 Περιγραφή του ΣΗΕ.....	18
1.2.1 Ορισμός.....	18
1.2.2 Δομή	18
1.2.3 Βασικά στοιχεία	19
1.3 Το Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	20
1.3.1 Ιστορική αναδρομή.....	20
1.3.2 Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ)	21
1.3.2.1 Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ)	23
1.3.2.2 Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ)	25
Κεφάλαιο 2: Απομακρυσμένος Έλεγχος ΣΗΕ – Έξυπνα Δίκτυα	27
2.1 Το Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο	27
2.1.1 Ορισμός.....	27
2.1.2 Χαρακτηριστικά του ΕΗΔ	28
2.1.3 Οφέλη του ΕΗΔ	30
2.2 Αυτοματοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (Power System Automation)	33
2.2.1 Αυτοματοποίηση Δικτύου Διανομής (Distribution Automation – DA)	34
2.2.1.1 Σύστημα Διαχείρισης Διανομής (Distribution Management System – DMS).....	35
2.2.1.2 Αυτοματοποίηση υποσταθμών (Substation Automation – SA).....	36
2.2.2 Έξυπνες Ηλεκτρονικές Συσκευές (Intelligent Electronic Devices – IED).....	37
2.3 Έξυπνοι μετρητές	39
2.3.1 Είδη μετρητών.....	39
2.3.2 Μετρητικά συστήματα.....	41
2.3.2.1 Συμβατική καταγραφή μέτρησης (Conventional Meter Reading).....	41
2.3.2.2 Αυτοματοποιημένη καταγραφή μέτρησης (Automated Meter Reading - AMR).....	41
2.3.2.3 Προηγμένες υποδομές μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure – AMI)	42

2.3.3 Meter Data Management System (MDMS)	42
2.3.4 Οφέλη και κίνδυνοι από τη χρήση έξυπνων μετρητών	43
2.3.4.1 Αναμενόμενα οφέλη	44
2.3.4.2 Πιθανοί κίνδυνοι	45
2.3.5 Οι έξυπνοι μετρητές στο Ελληνικό Δίκτυο	46
2.4 Τηλεπικοινωνιακά δίκτυα στο Ευφύες Ηλεκτρικό Δίκτυο	48
2.4.1. Δομή δικτύων επικοινωνίας	49
2.4.2. Τεχνολογίες και πρωτόκολλα επικοινωνίας	51
2.4.2.1 Ασύρματες τεχνολογίες επικοινωνίας	52
2.4.2.2 Ενσύρματες τεχνολογίες επικοινωνίας	54
2.4.3 Ειδικά πρωτόκολλα επικοινωνίας του ΕΗΔ	56
Κεφάλαιο 3: 3G Δίκτυα – Το πρωτόκολλο UMTS	57
3.1 Ιστορική αναδρομή	57
3.2 Αρχιτεκτονική δικτύου UMTS	60
3.2.1 Κυψελοειδής δομή	62
3.2.2 Εξοπλισμός Χρήστη - User Equipment (UE)	64
3.2.3 Δίκτυο Επίγειας Ασύρματης Πρόσβασης UMTS (UMTS Terrestrial Radio Access Network – UTRAN)	65
3.2.4 Κεντρικό Δίκτυο (Core Network – CN)	66
3.2.5 Πρωτόκολλα	69
3.3 Υπηρεσίες δικτύου UMTS	73
3.4 Εφαρμογές UMTS στο Ευφύες Ηλεκτρικό Δίκτυο	76
Κεφάλαιο 4: Το λογισμικό OPNET	79
4.1 Περιγραφή χαρακτηριστικών	79
4.2 Συντάκτες (Editors)	80
4.2.1 Συντάκτης Σχεδίου (Project Editor)	82
4.2.2 Συντάκτης Κόμβου (Node Editor)	84
4.2.3 Συντάκτης Διεργασίας (Process Editor)	85
4.3 Οι κόμβοι Application και Profile Config	88
Κεφάλαιο 5: Περιγραφή μελέτης – Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων....	91
5.1 Σκοπός μελέτης	91
5.2 Περιγραφή σεναρίων προσομοίωσης	92
5.2.1 Σενάριο πρώτο: 50 μετρητές σε κάθε πόλη / 50 bytes ανά μετρητή	94
5.2.2 Σενάριο δεύτερο: 50 μετρητές σε κάθε πόλη / 50 kB ανά μετρητή	96

5.2.3 Σενάριο τρίτο: 300 μετρητές σε κάθε πόλη / 50 bytes ανά μετρητή	96
5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	98
5.3.1 Αποτελέσματα πρώτου σεναρίου	99
5.3.2 Αποτελέσματα δεύτερου σεναρίου	103
5.3.3 Αποτελέσματα τρίτου σεναρίου	110
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις	117
6.1 Συμπεράσματα μελέτης.....	117
6.2 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη	118
Βιβλιογραφία.....	119

Περιεχόμενα εικόνων

Κεφάλαιο 1

Εικόνα 1.1: Δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	19
Εικόνα 1.2: Γεωγραφική κατανομή σταθμών ΔΕΗ.....	22
Εικόνα 1.3: Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	24
Εικόνα 1.4: Υπόμνημα χάρτη εικόνας 1.3.....	24

Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.1: Δομή του Ευφυούς Ηλεκτρικού Δικτύου.....	28
Εικόνα 2.2: Τα αλυσιδωτά οφέλη του Ευφυούς Ηλεκτρικού Δικτύου.....	32
Εικόνα 2.3: Τα επίπεδα εφαρμογής ενός αυτοματοποιημένου Δικτύου Διανομής.....	35
Εικόνα 2.4: Αναπαράσταση εκσυγχρονισμένου DMS.....	36
Εικόνα 2.5: Διασύνδεση IED με το υπόλοιπο σύστημα.....	38
Εικόνα 2.6: Η έννοια του συστήματος AMI.....	42
Εικόνα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση των βαθμίδων του δικτύου επικοινωνίας του ΕΗΔ...50	

Κεφάλαιο 3

Εικόνα 3.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση αρχιτεκτονικής δομής 3G δικτύου.....	61
Εικόνα 3.2: Δίκτυα σταθμών βάσης με i) ισοτροπικές (αριστερά) και ii) κατευθυντικές (δεξιά) κεραιές.....	63
Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση της δομής του κεντρικού δικτύου CN.....	69
Εικόνα 3.4: Η αρχιτεκτονική δομή του UMTS δικτύου σε επίπεδο πρωτοκόλλων.....	70
Εικόνα 3.5: Στοίβα πρωτοκόλλων του UMTS δικτύου.....	72

Κεφάλαιο 4

Εικόνα 4.1: Η ιεραρχική δομή των συντακτών Σχεδίου, Κόμβου και Διεργασίας.....	81
Εικόνα 4.2: Τοπολογία δικτύου στο συντάκτη σχεδίασης.....	83
Εικόνα 4.3: Συντάκτης κόμβου - Εσωτερική δομή μοντέλου κόμβου.....	85
Εικόνα 4.4: Παράδειγμα μοντέλου διεργασίας.....	87
Εικόνα 4.5: Το μενού ρυθμίσεων των κόμβων Application και Profile Config.....	89

Κεφάλαιο 5

Εικόνα 5.1: i) Πάνω αριστερά: Χάρτης Ελλάδας ii) Πάνω δεξιά: Χάρτης Αθήνας iii) Κέντρο αριστερά: Χάρτης Ηρακλείου iv) Κέντρο δεξιά: Χάρτης Χανίων v) Κάτω αριστερά: Χάρτης Ρεθύμνου vi) Κάτω δεξιά: Χάρτης Αγ. Νικολάου.....	93
Εικόνα 5.2: Τοπολογία δικτύου UMTS.....	94
Εικόνα 5.3: Τοπολογία δικτύου i) Ηρακλείου (αριστερά) ii) Αθήνας (δεξιά).....	95
Εικόνα 5.4: Τοπολογία δικτύου UMTS (300 χρήστες)	96
Εικόνα 5.5: Average Database Entry Response Time (50 χρήστες, 50 bytes).....	98
Εικόνα 5.6: i) Average Database Entry Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Entry Traffic Sent (κάτω) (50 χρήστες, 50 bytes).....	100
Εικόνα 5.7: Average Database Query Response Time (50 χρήστες, 50 bytes).....	101
Εικόνα 5.8: i) Average Database Query Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Entry Traffic Sent (κάτω) (50 χρήστες, 50 bytes).....	101
Εικόνα 5.9: Average End-to-End Delay (50 χρήστες, 50 bytes).....	102
Εικόνα 5.10: i) Average UE Received Throughput (πάνω) ii) Average UE Transmit Load (κάτω) (50 χρήστες, 50 bytes).....	103
Εικόνα 5.11: Average Database Entry Response Time (50 χρήστες, 50 kB).....	104
Εικόνα 5.12: Σύγκριση Average Database Entry Response Time (50 χρήστες, 50 bytes – 50 χρήστες, 50 kB).....	104

Εικόνα 5.13: i) Average Database Entry Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Entry Traffic Sent (κάτω) (50 χρήστες, 50 kB).....	105
Εικόνα 5.14: Average Database Query Response Time (50 χρήστες, 50 kB).....	106
Εικόνα 5.15: Σύγκριση Average Database Query Response Time (50 χρήστες, 50 bytes – 50 χρήστες, 50 kB).....	106
Εικόνα 5.16: i) Average Database Query Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Entry Traffic Sent (κάτω) (50 χρήστες, 50 kB).....	107
Εικόνα 5.17: Average End-to-End Delay (50 χρήστες, 50 kB).....	107
Εικόνα 5.18: Σύγκριση Average End-to-End Delay (50 χρήστες, 50 bytes – 50 χρήστες, 50 kB).....	108
Εικόνα 5.19: i) Average UE Received Throughput (πάνω) ii) Average UE Transmit Load (κάτω) (50 χρήστες, 50 kB).....	109
Εικόνα 5.20: Average Database Entry Response Time (300 χρήστες, 50 bytes).....	110
Εικόνα 5.21: Σύγκριση Average Database Entry Response Time (50 χρήστες, 50 bytes – 300 χρήστες, 50 bytes).....	110
Εικόνα 5.22: i) Average Database Entry Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Entry Traffic Sent (κάτω) (300 χρήστες, 50 bytes).....	111
Εικόνα 5.23: Average Database Query Response Time (300 χρήστες, 50 bytes).....	112
Εικόνα 5.24: Σύγκριση Average Database Query Response Time (50 χρήστες, 50 bytes – 300 χρήστες, 50 bytes).....	112
Εικόνα 5.25: i) Average Database Query Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Entry Traffic Sent (κάτω) (300 χρήστες, 50 bytes).....	113
Εικόνα 5.26: Average End-to-End Delay (300 χρήστες, 50 bytes).....	114
Εικόνα 5.27: i) Average UE Received Throughput (πάνω) ii) Average UE Transmit Load (κάτω) (300 χρήστες, 50 bytes).....	114

Περιεχόμενα πινάκων

Κεφάλαιο 1

Πίνακας 1.1: Εγκατεστημένη Ισχύς (MW) Σταθμών ΔΕΗ Α.Ε. (31/12/2007).....	21
Πίνακας 1.2: Γραμμές Μεταφοράς Ελληνικού Δικτύου (χλμ. όδευσης).....	23
Πίνακας 1.3: Χρεώσεις χρήσης δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	25

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1: Σύγκριση συμβατικού και ευφυούς δικτύου ΗΕ.....	30
Πίνακας 2.2: Σύγκριση χαρακτηριστικών συμβατικού – ηλεκτρονικού μετρητή.....	40
Πίνακας 2.3: Λειτουργικές απαιτήσεις των εφαρμογών του ΕΗΔ.....	52
Πίνακας 2.4: Σύγκριση ασύρματων τεχνολογιών επικοινωνίας.....	54
Πίνακας 2.5: Σύγκριση ενσύρματων τεχνολογιών επικοινωνίας.....	55

Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3.1: Η εξέλιξη των κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας.....	60
Πίνακας 3.2: Ρυθμοί μετάδοσης συσκευών UMTS.....	73
Πίνακας 3.3: Κατηγορίες και τύποι υπηρεσιών 3G δικτύου.....	75

Κεφάλαιο 1: Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.1 Εισαγωγή

Η χρήση της Ηλεκτρικής Ενέργειας αναμφίβολα σφράγισε την πορεία της ανθρωπότητας κατά τον 20^ο αιώνα. Ήδη από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, κατά τη λεγόμενη «δεύτερη φάση» της Βιομηχανικής Επανάστασης, η νέα αυτή μορφή ενέργειας έμελλε να αλλάξει ριζικά τις συνθήκες παραγωγής και να αντικαταστήσει τον ατμό, το πετρέλαιο και το φωταέριο. Η μορφή αυτή ενέργειας, μπορεί εύκολα και αποδοτικά να μετατραπεί σε άλλες μορφές και είναι οικονομική, ιδιαίτερα ασφαλής, άμεσα διαθέσιμη, διαθέτει υψηλή ποιότητα και είναι «καθαρή» στη χρήση της ως προς την περιβαλλοντική επιβάρυνση. Οι παραγωγοί δεν άργησαν να το αντιληφθούν αυτό, γεγονός που οδήγησε στη διαμόρφωση των βιομηχανιών, των αστικών περιβαλλόντων και των οικονομιών γενικότερα, στη μορφή που έχουν μέχρι και σήμερα.

Τα πρώτα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1870, όταν χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε πελάτες για το φωτισμό τους από τον G. Lane-Fox και τον Thomas Edison. Οι δεκαετίες που ακολούθησαν (1880-1900) σηματοδότησαν μια περίοδο ραγδαίας ανάπτυξης και εξέλιξης της νέας αυτής τεχνολογίας, αρχής γενομένης με τη δημιουργία του πρώτου σταθμού παραγωγής ισχύος 746 Watt μεταξύ Λονδίνου και Πόρτσμουθ το 1882 με τη Νέα Υόρκη να ακολουθεί λίγο αργότερα, ενώ το παράδειγμά τους ακολουθεί τον επόμενο χρόνο και η Γερμανία. Τα πρώτα αυτά ΣΗΕ χρησιμοποιούσαν συνεχές ρεύμα (ΣΡ), χαμηλής τάσης και εξυπηρετούσαν αναγκαστικά περιορισμένες περιοχές λόγω δυσκολιών στην αποδοτική μεταφορά του ΣΡ.

Η ανάγκη εξάλειψης των προβλημάτων που προέκυπταν από τη χρήση ΣΡ στη μεταφορά και τη διανομή, οδήγησε σταδιακά στην αντικατάστασή του από το εναλασσόμενο ρεύμα (ΕΡ), σηματοδοτώντας μια επαναστατική αλλαγή στην πορεία εξέλιξης των ΣΗΕ στη μορφή που τα γνωρίζουμε σήμερα. Αρχικά κοντά στο 1880, αναπτύσσεται η γεννήτρια ΕΡ και ο μετασχηματιστής, ώσπου το 1886 στη Μασαχουσέτη μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια σε απόσταση 1200m με χρήση μετασχηματιστών, καθιστώντας εμφανή σε όλον τον κόσμο τα πλεονεκτήματα στη χρήση του ΕΡ. Τα επόμενα χρόνια ακολουθούν πολύ σημαντικές εφευρέσεις (Nikola Tesla, William Stanley, George Westinghouse) στα πολυφασικά συστήματα ΕΡ, πυροδοτώντας τη ραγδαία παγκόσμια εξάπλωση των ΣΗΕ. Με την έλευση του 20^{ου} αιώνα και την ολοένα αυξανόμενη ανάγκη μεταφοράς μεγαλύτερης ποσότητας σε μεγαλύτερη απόσταση, οδηγούμαστε σταδιακά στη χρήση υψηλότερων τάσεων ενώ η χρήση ΕΡ καθιστά απαραίτητη την τυποποίηση μιας κοινής συχνότητας ώστε να καθίσταται εφικτή η διασύνδεση επιμέρους συστημάτων. Εν τέλει, επικρατούν οι συχνότητες των 60 Hz στη Β.Αμερική και των 50 Hz στην Ευρώπη [1].

1.2 Περιγραφή του ΣΗΕ

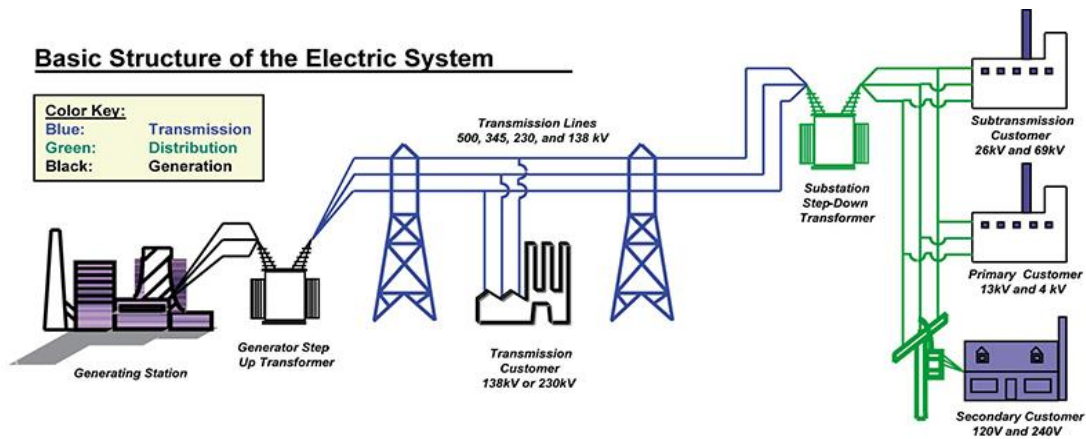
1.2.1 Ορισμός

Ως σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται το σύνολο εκείνο των εγκαταστάσεων και των μέσων που στόχο έχουν την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια εξυπηρετούμενη από αυτό περιοχή κατανάλωσης. Η δυνατότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε ζητηθεί, με το ελάχιστο δυνατό οικονομικό κόστος και την ελάχιστη δυνατή οικολογική επιβάρυνση αποτελούν τις βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ. Ταυτόχρονα επιθυμούμε το σύστημα να εξασφαλίζει σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης [2].

1.2.2 Δομή

Κάθε ΣΗΕ καλείται να εξυπηρετήσει τις ανάγκες ενός συνόλου καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η διαδικασία αυτή της τροφοδότησης μπορεί να διακριθεί σε τρεις επιμέρους λειτουργίες που επιτελεί το ΣΗΕ: την *παραγωγή*, τη *μεταφορά* και τη *διανομή* ηλεκτρικής ενέργειας. Διακρίνονται λοιπόν τα παρακάτω επιμέρους συστήματα:

- Σύστημα παραγωγής: Εδώ παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη μετατροπή κάποιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική στους σταθμούς παραγωγής. Στην πλειοψηφία τους οι σταθμοί παραγωγής είναι θερμοηλεκτρικοί ή υδροηλεκτρικοί, αλλά συνήθως είναι και η παραγωγή από πυρηνικούς σταθμούς ενώ τις τελευταίες δεκαετίες ολοένα και πιο διαδεδομένη καθίσταται η παραγωγή από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Έπειτα και από τη μεσολάβηση των μετασχηματιστών ανύψωσης τάσης, σειρά έχει η μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος υπό υπερυψηλή ή υψηλή τάση.
- Σύστημα μεταφοράς: Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η σπονδυλική στήλη του ΣΗΕ. Ο ρόλος του είναι η μεταφορά της παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες, από το σύστημα παραγωγής προς τους υποσταθμούς που εξυπηρετούν τις περιοχές κατανάλωσης είτε απευθείας στους καταναλωτές υψηλής τάσης. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τα δίκτυα γραμμών στα μέγιστα δυνατά επίπεδα τάσης και τους υποσταθμούς ζεύξης των εν λόγω δικτύων και μετασχηματισμού της τάσης.
- Σύστημα διανομής: Ο ρόλος του είναι η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές μέσω δικτύων μέσης και χαμηλής τάσης και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εξυπηρετούμενης περιοχής. Γενικά περιλαμβάνει τους υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης και τους υποσταθμούς διανομής, καθώς και τις γραμμές μεταφοράς χαμηλών επιπέδων τάσης που φτάνουν στον καταναλωτή.



Εικόνα 1.1 Δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.2.3 Βασικά στοιχεία

Ένα ΣΗΕ αποτελείται από πολλά διαφορετικά επιμέρους στοιχεία, κάθε ένα από τα οποία επιτελεί το δικό του ρόλο στις διαδικασίες παραγωγής, μεταφοράς ή διανομής. Τα σημαντικότερα τέτοια στοιχεία, που συναντάει κανείς σε κάθε ΣΗΕ με ελάχιστες διαφοροποιήσεις ή εξαιρέσεις είναι τα εξής [2] :

- **Γεννήτριες:** οι γεννήτριες ΕΡ είναι μηχανές που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η παροχή μηχανικής ενέργειας στην άτρακτο της γεννήτριας έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφική κίνηση του δρομέα της μηχανής εντός ενός μαγνητικού πεδίου και τελικά την παραγωγή ΕΡ. Η απαιτούμενη μηχανική ενέργεια συνήθως προκύπτει από κάυσεις ορυκτών και παραγωγή ατμού αλλά συχνά εκμεταλλεύεται η δύναμη του νερού και του αέρα.
- **Αγωγοί:** οι αγωγοί έχουν το ρόλο τη μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με την ύπαρξη γραμμών μεταφοράς και καλωδίων, ικανών να μεταφέρουν αποτελεσματικά τεράστιες ποσότητες ενέργειας υπό υψηλές τάσεις. Σημασία έχει η επιλογή των υλικών καθώς λαμβάνονται υπόψη το κόστος, η αγωγιμότητα και οι απώλειες μεταφοράς. Εδώ και δεκαετίες, ο χαλκός θεωρείται η καλύτερη επιλογή καθώς είναι υλικό προσιτό, ανθεκτικό και ιδιαίτερα αγωγίμο.
- **Μετασχηματιστές:** οι μετασχηματιστές είναι συσκευές οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να αυξομειώνουν τα επίπεδα τάσης του μεταφερόμενου ρεύματος χωρίς σημαντικές απώλειες. Ο ρόλος τους στο ΣΗΕ είναι εξαιρετικά σημαντικός καθώς διασφαλίζουν τη μεταφορά ισχύος από την παραγωγή έως την κατανάλωση στα επιθυμητά επίπεδα, με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες.
- **Ηλεκτρονικά ισχύος:** τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι συσκευές που χρησιμοποιούν διατάξεις με ημιαγώγιμα στοιχεία όπως διόδους, τρανζίστορ, θυρίστορ κλπ για να επιτύχουν τον έλεγχο και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσα σε ένα ΣΗΕ. Μπορούν να επιτελέσουν μια ευρεία γκάμα από εργασίες σε ελάχιστο χρόνο. Η πιο

συνηθισμένη είναι η μετατροπή του ΕΡ σε ΣΡ μέσω ανορθωτικών διατάξεων και η μετατροπή του ΣΡ σε ΕΡ μέσω αντιστροφών.

- Πυκνωτές: η πλειοψηφία των φορτίων σε ένα ΣΗΕ ΕΡ είναι επαγωγικά. Αυτή η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος, οδηγεί στην εμφάνιση της λεγόμενης «αέργου ισχύος». Είναι ένας είδος ισχύος που ενώ φαίνεται να «υπάρχει» στο σύστημα και στην ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των στοιχείων του, δεν παράγει κάποιο χρήσιμο έργο. Η ύπαρξή της οδηγεί σε αστάθεια της τάσης, αύξηση των απωλειών και αποσυντονισμό της ομαλής λειτουργίας του δικτύου γι αυτό και πρέπει να ελεγχθεί και να περιοριστεί. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνουν οι πυκνωτές, οι οποίοι αντισταθμίζουν την αέργου ισχύ στο δίκτυο.
- Προστατευτικές διατάξεις: ένα σύστημα το οποίο διαχειρίζεται τεράστιες ποσότητες ενέργειας σε υψηλές τάσεις και εμπεριέχει τον ανθρώπινο παράγοντα οφείλει να διασφαλίζει την ασφάλεια και την προστασία τόσο του ίδιου, όσο και των εργαζομένων και των καταναλωτών. Το ρόλο αυτό επιτελούν οι προστατευτικές διατάξεις που υπάρχουν σε κάθε ΣΗΕ. Οι πιο συνηθισμένες είναι οι ασφάλειες, μια διάταξη που αν εντοπίσει ύπαρξη ρεύματος σε αυξημένη ένταση διακόπτει τη ροή ρεύματος στο κύκλωμα και οι διακόπτες, οι οποίοι αν εντοπίσουν μια δυσλειτουργία στο κύκλωμά τους, είναι σε θέση να το αποκόψουν από το υπόλοιπο σύστημα.
- Φορτία: ο ουσιαστικός σκοπός και λόγος ύπαρξης των ΣΗΕ είναι η εξυπηρέτηση φορτίων και η τροφοδότησή τους με ενέργεια προκειμένου να λειτουργήσουν. Τα φορτία αυτά ποικίλλουν και εκτείνονται από την πιο απλή οικιακή συσκευή έως τον τεράστιο βιομηχανικό εξοπλισμό και η ύπαρξή τους επιφέρει την ισορροπία στο δίκτυο. Το ΣΗΕ οφείλει να διασφαλίσει την ποιότητα της παρεχόμενης, σε αυτά τα φορτία, ισχύος.

1.3 Το Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.3.1 Ιστορική αναδρομή

Ο ηλεκτρισμός θα φτάσει στην Ελλάδα το 1889. Σύμφωνα με τα ιστορικά στοιχεία της ΔΕΗ, εκείνη τη χρονιά κατασκευάστηκε η πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στο κέντρο της Αθήνας από τη «Γενική Εταιρεία Εργοληψιών», φωταγωγώντας αρχικά τα Ανάκτορα και σταδιακά ολόκληρο το κέντρο της πόλης. Την ίδια χρονιά ηλεκτροδοτείται και η Θεσσαλονίκη, η οποία αποτελούσε ακόμα μέρος της Οθωμανικής Αυτοκρατορίας, από τη «Βέλγικη Εταιρεία» στην οποία οι τούρκικες αρχές ανέθεσαν το φωτισμό και την τροχοδρόμηση της πόλης. Περίπου μια δεκαετία αργότερα, εμφανίζονται οι πρώτες πολυεθνικές εταιρείες ηλεκτρισμού και σταδιακά ηλεκτροδοτούνται όλες οι

μεγάλες ελληνικές πόλεις, με αποτέλεσμα το 1929 να έχουν ηλεκτρισμό πάνω από 250 πόλεις με πληθυσμό άνω των 5.000 κατοίκων.

Δεδομένου ότι την εποχή εκείνη ο πληθυσμός της χώρας δεν ήταν συγκεντρωμένος στα αστικά περιβάλλοντα, αλλά κατά μεγάλο ποσοστό διασκορπισμένος σε ορεινές και νησιωτικές περιοχές, η εξυπηρέτηση αυτών των απομακρυσμένων και αραιοκατοικημένων περιοχών ήταν ασύμφορη οικονομικά για τις μεγάλες εταιρείες. Την ηλεκτροδότηση των περιοχών αυτών αναλαμβάνουν οι δημοτικές και κοινοτικές αρχές ή ακόμα και ιδιώτες, κατασκευάζοντας μικρά εργοστάσια, με αποτέλεσμα το 1950 οι εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα να αριθμούν σε 400. Τα πρωτογενή καύσιμα που χρησιμοποιούνταν ήταν κατά κύριο λόγο το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας, τα οποία προφανώς εισάγονταν από το εξωτερικό. Το γεγονός λοιπόν πως η παραγωγή γινόταν από πολλές διαφορετικές, μικρές, διάσπαρτες μονάδες σε συνδυασμό με τη χρήση εισαγόμενων καυσίμων εξώθησε την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ υψηλά επίπεδα, καθιστώντας τον ηλεκτρισμό στην Ελλάδα, αγαθό πολυτελείας.

Τον Αύγουστο του 1950 ιδρύεται η ΔΕΗ, ανοίγοντας το δρόμο για εύκολη πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια καθώς αποτελεί έναν ενιαίο, δημόσιο φορέα που συγκεντρώνει τις δραστηριότητες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας ενώ παράλληλα επικεντρώνεται στην αξιοποίηση εγχώριων πηγών ενέργειας. Τα επόμενα χρόνια, το δίκτυο μεταφοράς ενοποιείται σε ένα εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα ενώ κατασκευάζονται θερμοηλεκτρικοί και υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής, αξιοποιώντας το ελληνικό υπέδαφος που είναι πλούσιο σε κοιτάσματα λιγνίτη και την δύναμη των υδάτων των ελληνικών ποταμών. Τα τελευταία χρόνια, η ΔΕΗ δραστηριοποιείται και με την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [3].

1.3.2 Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ)

Η ΔΕΗ σήμερα διαθέτει μια μεγάλη υποδομή σε εγκαταστάσεις ορυχείων λιγνίτη, παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατέχει περίπου το 68% της εγκατεστημένης ισχύος των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα, περιλαμβάνοντας λιγνιτικούς, υδροηλεκτρικούς και πετρελαϊκούς σταθμούς, σταθμούς φυσικού αερίου καθώς και μονάδες ΑΠΕ. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής της ΔΕΗ το 2007 ανήλθε σε περίπου 12.5 GW, όπως διαφαίνεται αναλυτικά στον πίνακα 1.1.

	Λιγνιτικές Μονάδες	Πετρελαϊκές Μονάδες	Μονάδες Φυσικού Αερίου	Σύνολο ΘΗΣ*	ΥΗΣ**	ΑΠΕ***	ΣΥΝΟΛΟ
Διασυνδεδεμένο	5.288	750	1.966	8.004	3.020	46	11.070
Κρήτη, Ρόδος & λοιπά αυτόνομα νησιά	-	1.656	-	1.656	-	34	1.689
ΣΥΝΟΛΟ		9.660			3.020	80	12.760

* Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί

** Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

*** Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ανήκουν στη "ΔΕΗ ΑΝΑΜΕΩΣΙΜΕΣ ΑΕ")

Πίνακας 1.1 Εγκατεστημένη Ισχύς (MW) Σταθμών ΔΕΗ Α.Ε. (31/12/2007)

Αναμφίβολα, το σημαντικότερο ενεργειακό καύσιμο στο οποίο βασίστηκε ο εξηλεκτρισμός της Ελλάδας έπειτα από την ίδρυση της ΔΕΗ, είναι ο λιγνίτης. Ο λιγνίτης είναι ένα είδος γαιάνθρακα το οποίο βρίσκεται σε αφθονία στο ελληνικό υπέδαφος και υπολογίζεται πως τα αποθέματά του, καθιστούν δυνατή την εκμετάλλευσή του ως καύσιμη ύλη για τουλάχιστον 45 χρόνια ακόμα. Τα μεγαλύτερα λιγνιτωρυχεία της ΔΕΗ είναι αυτά της Πτολεμαΐδας και της Μεγαλόπολης ενώ τεράστια εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα βρίσκονται και στη Βόρεια Ελλάδα. Χαρακτηριστικό της τεράστιας σημασίας του λιγνίτη, είναι το γεγονός πως οι 8 λιγνιτικοί σταθμοί της ΔΕΗ αποτελούν το 42% της εγκατεστημένης ισχύος της και παράγουν περίπου το 56% της καθαρής ηλεκτρικής της παραγωγής [4].

Ο συνολικός αριθμός των σταθμών της ΔΕΗ ανέρχεται σήμερα στους 98. Στο διασυνδεδεμένο σύστημα της ηπειρωτικής χώρας υπάρχουν 34 μεγάλοι θερμικοί και υδροηλεκτρικοί σταθμοί καθώς και 3 αιολικά πάρκα ενώ στο σύστημα Κρήτης, Ρόδου και των λοιπών νησιών υπάρχουν 61 αυτόνομοι σταθμοί παραγωγής εκ των οποίων 39 θερμικοί, 2 υδροηλεκτρικοί, 15 αιολικά πάρκα και 5 φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Η γεωγραφική κατανομή των σταθμών αυτών παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1.



Εικόνα 1.2 Γεωγραφική κατανομή σταθμών ΔΕΗ

Μετά την απόσχιση των κλάδων Μεταφοράς και Διανομής, δημιουργούνται δύο 100% θυγατρικές εταιρείες της ΔΕΗ Α.Ε., ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. και ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε.

1.3.2.1 Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ)

Ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. είναι ο φορέας εκείνος που έχει την ευθύνη της διαχείρισης, λειτουργίας, ανάπτυξης και συντήρησης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) και των διασυνδέσεών του. Το ΕΣΜΗΕ ενσωματώνει το Διασυνδεδεμένο Σύστημα του ηπειρωτικού τμήματος της χώρας και των διασυνδεδεμένων με αυτό νησιών στα επίπεδα υψηλής τάσης (66kV και 150kV) και υπερυψηλής τάσης (400kV).

Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς διαθέτει πάνω από 11.000 χλμ. γραμμών μεταφοράς και αποτελείται ως επί το πλείστον από εναέριες γραμμές, αλλά διαθέτει και υπόγειες γραμμές καθώς και υποβρύχιες διασυνδέσεις. Η σπονδυλική στήλη του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς αποτελείται από τρεις γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος σε ΥΥΤ 400kV, οι οποίες μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια κυρίως από τους σταθμούς της Δυτικής Μακεδονίας που αποτελούν το σπουδαιότερο ενεργειακό κέντρο παραγωγής. Σημειώνεται πως στην περιοχή αυτή παράγεται περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας, ενώ οι αυξημένες ανάγκες κατανάλωσης βρίσκονται στα μεγάλα αστικά κέντρα της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας, εκεί όπου καταναλώνεται περίπου το 65% της παραγόμενης ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό της γεωγραφικής ανισοκατανομής στο παρελθόν αποτελούσε σημαντικό πρόβλημα (ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες) καθώς η παραγωγή βρισκόταν στο Βορρά και η ζήτηση στο Νότο. Σήμερα, η ένταξη νέων μονάδων παραγωγής σε όλα τα μήκη και τα πλάτη της χώρας έχει σαφώς μετριάσει το πρόβλημα, με την Αττική και την Πελοπόννησο να παραμένουν οι πλέον κρίσιμες περιοχές σε ανάγκες φορτίου.

	400kV	Σ.Π. (D.C.) 400kV	150 kV	66 kV	ΣΥΝΟΛΟ
ΕΝΑΕΡΙΕΣ	2.647	107	8.152	39	10.945
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ	0,58		140	15	155
ΥΠΟΓΕΙΕΣ	30		101		131
ΣΥΝΟΛΟ	2.677	107	8.393	54	11.232

Πίνακας 1.2 Γραμμές Μεταφοράς Ελληνικού Δικτύου (χλμ. όδευσης)

Από τον Οκτώβριο του 2004, η Ελλάδα είναι μέλος της UCTE (Union for Coordination of Transmission of Electricity) και το Ελληνικό Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διευρωπαϊκό σύστημα μεταφοράς υπό τη διαχείριση και το γενικότερο συντονισμό του ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). Συγκεκριμένα το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα συνδέεται με τα συστήματα μεταφοράς της Αλβανίας (μέσω μιας γραμμής 150kV και μιας 400kV), της Βουλγαρίας (μέσω μία γραμμής 400kV), της Π.Γ.Δ.Μ (μέσω δύο γραμμών 400kV), της Ιταλίας (μέσω

υποβρυχίου καλωδίου και γραμμής ΣΡ ισχύος 500MW) ενώ τον Ιούνιο του 2008 ολοκληρώθηκε και η διασύνδεση με την Τουρκία (μέσω μιας γραμμής 400kV) [5].



Εικόνα 1.3 Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας



Εικόνα 1.4 Υπόμνημα χάρτη εικόνας 1.3

1.3.2.2 Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ)

Ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. είναι ο φορέας εκείνος που είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία, την ανάπτυξη, τη διαχείριση και τη συντήρηση του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Το ελληνικό δίκτυο διανομής περιλαμβάνει το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής και το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (220/380V) το οποίο μεταφέρει την ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές. Στο δίκτυο περιλαμβάνονται ακόμα οι εναέρια γραμμές, τα καλώδια μέσης και χαμηλής τάσης και ο σχετικός εξοπλισμός προστασίας και ελέγχου.

Τα ποσοτικά μεγέθη του ελληνικού δικτύου διανομής στο τέλος του 2015 ήταν τα εξής [6]:

- 111.130 χλμ. Δίκτυο Μέσης Τάσης
- 125.160 χλμ. Δίκτυο Χαμηλής Τάσης
- 161.180 Υποσταθμοί Μέσης Τάσης προς Χαμηλή Τάση
- 945 χλμ. Δίκτυο Υψηλής Τάσης (εκ των οποίων 200 χλμ. στην Αττική και 745 χλμ. στα μη διασυνδεδεμένα νησιά)
- 225 Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης προς Μέση Τάση (εκ των οποίων 19 κλειστού τύπου, καταμεμημένοι 199 στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα και 26 στα μη Διασυνδεδεμένα νησιά)
- 7.438.455 καταναλωτές (11.444 ΜΤ & 7.427.011 ΧΤ)
- 43.237 GWh καταναλώσεις (10.973 ΜΤ & 32.264 ΧΤ)

Ανάμεσα στις άλλες αρμοδιότητες του ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. είναι και η εξυπηρέτηση των καταναλωτών σε ότι αφορά τη σύνδεσή τους με το δίκτυο, καθώς και η καταμέτρηση και τιμολόγηση των καταναλώσεών τους. Κατά κανόνα εφαρμόζεται τετραμηνιαία καταμέτρηση στους καταναλωτές μικρής ισχύος ΧΤ και μηνιαία καταμέτρηση στους καταναλωτές ΜΤ ή ΧΤ με ισχύ μεγαλύτερη των 35 kVA. Στους συνήθεις καταναλωτές ΧΤ όπως είναι οι οικίες, τα καταστήματα κλπ οι καταμετρητές του ΔΕΔΔΗΕ καταγράφουν απλώς την ένδειξη που βλέπουν στο μετρητή, τη συγκρίνουν με την αντίστοιχη που είχε καταγραφεί πριν 4 μήνες και από τη διαφορά τους προκύπτει η κατανάλωση του τετραμήνου. Η τιμολόγηση ορίζεται με βάση τα τιμολόγια που παρουσιάζονται παρακάτω.

α) Τιμολόγια Χρήσης ΕΔΔΗΕ για Πελάτες Μέσης Τάσης		
Χρέωση Ισχύος (Μοναδιαία Πάγια Χρέωση)	Χρέωση Ενέργειας (Μοναδιαία Μεταβλητή Χρέωση) (λεπτά €/kWh)	
1.179 €/MW Μεγίστης Μηνιαίας τιμής της Μέσης Ωριαίας Ζήτησης τις Ώρες Αιχμής (11π.μ.-2μ.μ.), για κάθε μήνα του έτους	0,29	
β) Τιμολόγια Χρήσης ΕΔΔΗΕ για Πελάτες Χαμηλής Τάσης		
	Χρέωση Ισχύος (Μοναδιαία Πάγια Χρέωση) (€/kVA Συμφωνημένης Ισχύος Παροχής ανά έτος)	Χρέωση Ενέργειας (Μοναδιαία Μεταβλητή Χρέωση) (λεπτά €/kWh)
Οικιακοί Πελάτες ΧΤ	0,54	2,13
Πελάτες ΧΤ Κοινωνικού Οικιακού Τιμολογίου και Τιμολογίου Πολυτέκνων	-	2,37
Πελάτες ΧΤ με μέτρηση μέγιστης ζήτησης ισχύος (παροχή άνω των 25 kVA) και μέτρηση αέργου ισχύος	3,78	1,67
Πελάτες ΧΤ με μέτρηση μέγιστης ζήτησης ισχύος (παροχή άνω των 25 kVA), χωρίς μέτρηση αέργου ισχύος	3,17	1,90
Λοιποί Πελάτες ΧΤ (παροχή έως και 25 kVA)	1,47	1,90

Πίνακας 1.3 Χρεώσεις χρήσης δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Κεφάλαιο 2: Απομακρυσμένος Έλεγχος ΣΗΕ – Έξυπνα Δίκτυα

2.1 Το Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο

Προκειμένου να προσδιορίσει κανείς επιτυχώς την έννοια του απομακρυσμένου ελέγχου ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, οφείλει πρώτα να αναφερθεί στον όρο Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο (Smart Grid).

2.1.1 Ορισμός

Ο όρος «Ευφυές Δίκτυο» στις μέρες μας χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον ως όρος marketing παρά ως τεχνικός. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν υπάρχει ένας αυστηρά λεπτομερής, συγκεκριμένος και καθολικά αποδεκτός ορισμός της έννοιας του Ευφυούς Δικτύου.

- Σύμφωνα με τον ορισμό της ΕΥ'sTP (European Union's Technology Platform):

«είναι το ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο ευφυώς ενσωματώνει, κάνοντας χρήση σύγχρονων τεχνολογιών και συστημάτων μέτρησης, ελέγχου και παρακολούθησης, όλες τις ενέργειες των διασυνδεδεμένων χρηστών – εκείνων που παράγουν, καταναλώνουν ή και κάνουν και τα δύο – με σκοπό η ΗΕ να παράγεται, να μεταφέρεται και να διανέμεται με αξιοπιστία, οικονομία και ασφάλεια.»

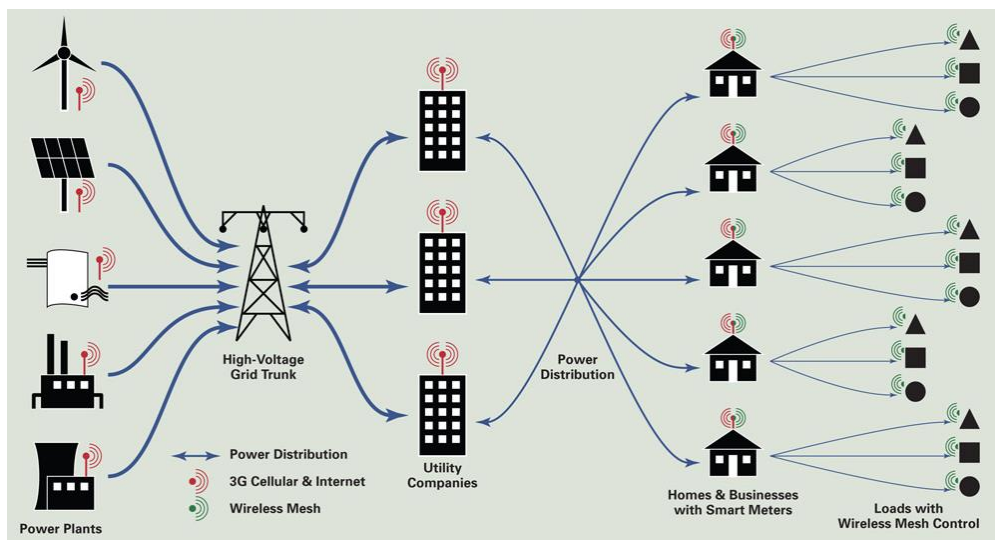
- Ενώ το αμερικανικό NIST (National Institute of Standards and Technology) αναφέρει:

«ο όρος αναφέρεται στον εκσυγχρονισμό του παραδοσιακού ηλεκτρικού δικτύου ενσωματώνοντας την παρακολούθηση, την προστασία και την αυτόματη βελτιστοποίηση των λειτουργιών των διασυνδεδεμένων σε αυτό στοιχείων. Χαρακτηρίζεται από μια αμφίδρομη ροή ενέργειας και πληροφορίας, εισάγοντας στο δίκτυο υπολογιστικό και τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό που παρέχει πληροφορία σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας δυνατή τη σχεδόν άμεση εξισορρόπηση προσφοράς-ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια.»

- Τέλος, σύμφωνα με την Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC):

“το ευφυές δίκτυο εμπεριέχει ο,τιδήποτε σχετικό με το ηλεκτρικό σύστημα από το σημείο της παραγωγής έως το σημείο της κατανάλωσης, με τη διαφορά πως ενσωματώνει τεχνολογίες που καθιστούν το δίκτυο πιο ευέλικτο, διαδραστικό και ικανό να παρέχει ανταπόκριση σε πραγματικό χρόνο.»

Εν συντομία λοιπόν, μπορούμε να ορίσουμε το ΕΗΔ ως ένα δίκτυο που ενσωματώνει τα παραδοσιακά χαρακτηριστικά του ΗΔ παράλληλα με ένα πολυ-επίπεδο στρώμα πληροφοριών και επικοινωνιών και στοχεύει στην αυτοματοποίηση των λειτουργιών του δικτύου [7].



Εικόνα 2.1 Δομή του Ευφυούς Ηλεκτρικού Δικτύου

2.1.2 Χαρακτηριστικά του ΕΗΔ

Το ΕΗΔ συγκεντρώνει τα κάτωθι σημαντικά χαρακτηριστικά:

1. Καθιστά δυνατή την ενημέρωση και τη συμμετοχή του καταναλωτή.

Η διαρκής και αμφίδρομη ροή πληροφοριών είναι σχεδόν σε πραγματικό χρόνο αξιοποιήσιμη τόσο από τους διαχειριστές του δικτύου όσο και από τους καταναλωτές. Έτσι ο καταναλωτής είναι σε θέση να έχει άμεση εποπτεία των καταναλώσεών του και

δυνατότητα επέμβασης στη χρήση που κάνει σε ηλεκτρική ενέργεια και κατά συνέπεια μπορεί να προσαρμόζει τη χρήση αυτή ανάλογα με τις ανάγκες και το κόστος.

2. *Βελτιστοποιεί την αξιοποίηση του εξοπλισμού και τη λειτουργική αποδοτικότητα του ΣΗΕ.*

Το ΕΗΔ αναβαθμίζει το υπάρχον δίκτυο με εξοπλισμό που εξασφαλίζει την αποτελεσματική εξυπηρέτηση των χρηστών, τη συνεχή και ασφαλή παροχή ενέργειας, τη μείωση απωλειών και την αποφυγή συμφορήσεων σε ζήτηση. Η κατάσταση του εξοπλισμού είναι ανά πάσα στιγμή ορατή μέσω ψηφιακών ενδείξεων και κατά συνέπεια η συντήρησή του καθίσταται πολύ πιο εύκολη. Η ανάγκη επέκτασης των υποδομών του δικτύου παύει να υφίσταται καθώς οι ήδη υπάρχουσες υποδομές αξιοποιούνται βέλτιστα.

3. *Επιτρέπει τη μεγαλύτερη διείσδυση ΑΠΕ και αυτόνομων παραγωγών στο δίκτυο.*

Τα εξελιγμένα υπολογιστικά συστήματα του ΕΗΔ είναι σε θέση να εξασφαλίσουν την αξιοπιστία και την ευστάθεια του δικτύου και δημιουργούν ένα πιο ευέλικτο και προσαρμοστικό δίκτυο που γνωρίζει τις ανάγκες ζήτησης ανα πάσα στιγμή. Σε συνθήκες αιχμής φορτίου, η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο ΕΗΔ και πλήρους ελέγχου της ζήτησης, μειώνουν την ανάγκη αύξησης της ηλεκτροπαραγωγής από τις μεγάλες μονάδες και επιτρέπουν την εξυπηρέτηση των αναγκών σε ενέργεια από αλλού. Με τον τρόπο αυτό, ενθαρρύνεται η διείσδυση των ΑΠΕ καθώς και των ιδιωτών παραγωγών.

4. *Διαθέτει ικανότητα αυτοϊασης και ανθεκτικότητα απέναντι σε βλάβες.*

Το ΕΗΔ είναι σε θέση να αντιλαμβάνεται, να εντοπίζει και να αντιμετωπίζει τα σφάλματα τη στιγμή που αυτά εμφανίζονται, κάνοντας χρήση αισθητήρων και ευφύων συσκευών. Το προβληματικό στοιχείο απομονώνεται από το υπόλοιπο σύστημα και η κανονική λειτουργία του δικτύου αποκαθίσταται, χωρίς να είναι καν απαραίτητη η ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Με τον τρόπο αυτό, μειώνονται ή και εξαφανίζονται φαινόμενα διακοπής της παροχής υπηρεσιών στους καταναλωτές συμβάλλοντας σε ένα πιο αξιόπιστο δίκτυο.

Το πολλά υποσχόμενο ΕΗΔ, θέτει πολύ υψηλές προσδοκίες και καθιστά αναπόφευκτη τη σύγκριση με το υπάρχον παραδοσιακό ηλεκτρικό δίκτυο. Στον πίνακα 2.1 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά του ΕΗΔ σε αντιπαραβολή με εκείνα του συμβατικού δικτύου [7].

Συμβατικό δίκτυο ΗΕ	Ευφυές δίκτυο ΗΕ
Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός	Ψηφιακός εξοπλισμός
Μονόδρομη ροή πληροφορίας και ισχύος	Αμφίδρομη ροή πληροφορίας και ισχύος
Ενιαία και προσεγγιστική τιμολόγηση	Ευέλικτη και ακριβής τιμολόγηση
Μηχανικοί μετρητές	Έξυπνοι μετρητές
Κεντριοποιημένη παραγωγή	Διεσπαρμένη παραγωγή
Χειροκίνητη αποκατάσταση βλαβών	Αυτόματη αποκατάσταση βλαβών
Ανενημέρωτος/αδρανής καταναλωτής	Ενημερωμένος/ενεργός καταναλωτής
Φαινόμενα συμφόρησης/υπερφόρτωσης	Αξιοπιστία-Ασφάλεια-Βιωσιμότητα
Περιορισμένη διείσδυση ΑΠΕ	Ενσωμάτωση ΑΠΕ και αυτοπαραγωγών
Διαφορετική λειτουργία δικτύων ανά κράτος	Διεθνώς διασυνδεδεμένα δίκτυα
	Δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας

Πίνακας 2.1 Σύγκριση συμβατικού και ευφυούς δικτύου ΗΕ

2.1.3 Οφέλη του ΕΗΔ

Από το 2005, η συζήτηση για τη μετάβαση από το συμβατικό δίκτυο ΗΕ στο ευφυές δίκτυο, γίνεται όλο και πιο έντονη και καθίσταται όλο και πιο αναγκαία η αναβάθμιση του «γερασμένου» και ανεπαρκούς σύγχρονου δικτύου. Εξετάζοντας το ζήτημα υπό ένα ευρύ πρίσμα και λαμβάνοντας υπόψη διάφορες σχετικές έρευνες εξάγεται με σχετική ασφάλεια το συμπέρασμα πως τα οφέλη μιας τέτοιας μετάβασης υπερτερούν σημαντικά έναντι του κόστους του εγχειρήματος. Τα οφέλη αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε έξι βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τομέα που αφορούν [8]:

- *Αξιοπιστία (Reliability)*
 - Η χρήση έξυπνων μετρητών καθιστά δυνατό τον άμεσο εντοπισμό θεμάτων ποιότητας ισχύος ή απώλειας ισχύος, διευκολύνοντας τους διαχειριστές του συστήματος στην άμεση διάγνωση και αντιμετώπιση.
 - Η δυνατότητα ελέγχου της ζήτησης διευκολύνει τη διαχείριση του συστήματος τις ώρες αιχμής, μειώνοντας την πιθανότητα γενικής διακοπής (blackout) ή άλλων διαταραχών.
 - Το δίκτυο διανομής αποκτά τη δική του ευφυΐα καθώς εξελιγμένοι αισθητήρες και συσκευές διευκολύνουν τον εντοπισμό ενός προβληματικού στοιχείου, είτε ενημερώνοντας και προλαμβάνοντας τη βλάβη είτε απομονώνοντάς το από το υπόλοιπο σύστημα έπειτα από την εμφάνιση της βλάβης.

- *Οικονομικά (Economics)*
 - Οι προηγμένες υποδομές μέτρησης με έξυπνους μετρητές και δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας, παρέχουν στους καταναλωτές μετρητικές ενδείξεις τιμών σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Το γεγονός αυτό δημιουργεί κίνητρο στον καταναλωτή να ενδιαφερθεί για τις καταναλώσεις του αντιμετωπίζοντάς τις σαν ένα ακόμα προϊόν που αγοράζει και ως εκ τούτου αναμένεται να οδηγήσει σε μείωση της ζήτησης και κατ'επέκταση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας.
 - Περιορισμός των ρευματοκλοπών.
 - Η αναμενόμενη μείωση βλαβών θα οδηγήσει και σε μείωση του κόστους για την αποκατάστασή τους, συνεπώς σε εξοικονόμηση κεφαλαίων που μπορούν να διατεθούν σε άλλους σκοπούς.
 - Η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο, σημαίνει και τη δυνατότητα τοπικής παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας που εκτός από τη στήριξη του δικτύου στον έλεγχο της ζήτησης, συνεπάγεται και το «άνοιγμα» των ενδιαφερόμενων παραγωγών στην αγορά ηλεκτρισμού.

- *Αποδοτικότητα (Efficiency)*
 - Οι καταναλωτές πλέον είναι σε θέση να κατανοήσουν και να αλληλεπιδράσουν με τις λειτουργίες του δικτύου, πραγματοποιώντας μια πιο αποδοτική διαχείριση της καταναλισκόμενης ενέργειας στις κατοικίες και τις επιχειρήσεις τους, με προφανή οφέλη και για το ίδιο το δίκτυο.
 - Ο εξαιρετικά προηγμένος εξοπλισμός δίνει στους διαχειριστές του δικτύου τη δυνατότητα να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία του, αξιοποιώντας στο μέγιστο τα υφιστάμενα διασυνδεδεμένα στοιχεία (Improved Asset Utilization)
 - Η δυνατότητα ελέγχου της ροής ισχύος μέσω προηγμένων συστημάτων, μειώνει τόσο τις απώλειες ισχύος όσο και τη ζήτηση αιχμής.
 - Το έξυπνο δίκτυο καθιστά τις ανάγκες σε εξοπλισμό εγκαίρως προβλέψιμες, διευκολύνοντας τη συντήρηση και την αντικατάστασή του, συνεισφέροντας παράλληλα στην επέκταση της διάρκειας ζωής του.

- *Περιβάλλον (Environment)*
 - Η αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ στο δίκτυο έχει προφανή περιβαλλοντικά οφέλη καθώς μορφές ενέργειας όπως η ηλιακή ή η αιολική δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αισθητή μείωση των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων καθώς και των ζημιωγόνων επεμβάσεων στα φυσικά οικοσυστήματα.
 - Πολλές απρόσμενες βλάβες του δικτύου που μέχρι πρότινος οδηγούσαν σε εξαιρετικά ρυπογόνες καταστροφές μετασχηματιστών και εμφανίσεις πετρελαιοκηλίδων, θα μπορούν πλέον να προβλεφθούν και να αποφευχθούν.
 - Η αλληλεπίδραση των καταναλωτών με έννοιες όπως η «πράσινη ενέργεια», πιθανότατα θα προσφέρει κίνητρα ευαισθητοποίησης και ενασχόλησης με την προστασία του περιβάλλοντος.



Εικόνα 2.2 Τα αλυσιδωτά οφέλη του Ευφυούς Ηλεκτρικού Δικτύου

- *Προστασία και ασφάλεια (Security and Safety)*
 - Οι διαχειριστές του δικτύου έχουν πρόσβαση στην κατάσταση κάθε καταναλωτή ξεχωριστά και είναι σε θέση σε πραγματικό χρόνο να επέμβουν συνδέοντας ή αποσυνδέοντας φορτία, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια του καταναλωτή.
 - Πολλές φορές, μια διακοπή ρεύματος ή μια βλάβη, μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την υγεία ή την ασφάλεια ενός ατόμου. Το ΕΗΔ εξασφαλίζει την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων.
 - Οι διαχειριστές του δικτύου, αξιοποιώντας τους σύγχρονους αισθητήρες, τα αμφίδρομα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και τις προηγμένες συσκευές ελέγχου, διαθέτουν τα απαραίτητα εργαλεία για να ανιχνεύσουν, να εντοπίσουν, να επέμβουν και να διορθώσουν οποιοδήποτε σφάλμα προκύψει. Μειώνεται έτσι η πιθανότητα να προκύψουν επείγουσες καταστάσεις που θα έχουν αλυσιδωτές αντιδράσεις σε ένα εκτενές μέρος του δικτύου με εξαιρετικά επιζήμιες συνέπειες.
 - Το γεγονός ότι οι Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής ενός δικτύου λειτουργούν σε μεγάλο βαθμό αυτόνομα, αποτελεί δικλείδα ασφαλείας καθώς είναι σπάνιο έως αδύνατο, να τεθούν όλες ταυτόχρονα εκτός λειτουργίας.

Συνολικά λοιπόν, το πόρισμα που προκύπτει είναι πως η αναβάθμιση του συμβατικού δικτύου στο ευφυές δίκτυο θα έχει ευεργετικά αποτελέσματα για όλες τις ενδιαφερόμενες ομάδες.

Οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας έχουν την ευκαιρία να εξοικονομήσουν τεράστια ποσά σε λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης, ενώ η προοπτική ανοίγματος της παραγωγής ΑΠΕ σε νέες αγορές διαφαίνεται πιο έντονη από ποτέ. Από την άλλη, το ρίσκο

που καλούνται να λάβουν σε ένα τέτοιο εγχείρημα είναι η γρήγορη και αποτελεσματική απόσβεση των επενδεδυμένων κεφαλαίων.

Οι καταναλωτές είναι και αυτοί κερδισμένοι καθώς τους δίνεται η ευκαιρία να μειώσουν τους λογαριασμούς τους, έχοντας τον έλεγχο και την εποπτεία των καταναλώσεών τους. Επιπλέον, καθίσταται ευκολότερο για εκείνους να πάψουν να αποτελούν μόνο καταναλωτές του δικτύου και να γίνουν και παραγωγοί συνεισφέροντας αμφίδρομα στη λειτουργία του. Το ρίσκο για τον καταναλωτή αφορά στην πιθανότητα εφαρμογής του ευφυούς δικτύου χωρίς τα οφέλη του να γίνουν άμεσα αντιληπτά από εκείνον.

Η κοινωνία γενικότερα, θα ωφεληθεί από μια αναζωογονημένη οικονομία, που ενισχύεται με θέσεις εργασίας καθώς και μια πτωτική τάση στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ σημαντικό όφελος για το κοινωνικό σύνολο αποτελούν οι βελτιωμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Πρακτικά, το εγχείρημα αυτό δεν ενέχει κάποιο ουσιαστικό ρίσκο υπό μακροσκοπικό πρίσμα [8].

2.2 Αυτοματοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (Power System Automation)

Ο όρος «αυτοματοποίηση ΣΗΕ» αναφέρεται στη διαδικασία αυτόματου ελέγχου ενός ΣΗΕ μέσω συσκευών μέτρησης και ελέγχου [9]. Ένα αυτοματοποιημένο ΣΗΕ ουσιαστικά αποτελείται από δύο υποσυστήματα: το κεντρικό σύστημα που ορίζει έτσι κι αλλιώς το ΣΗΕ και αφορά την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας και το εξοπλιστικό σύστημα μετρήσεων και ελέγχου που αναφέρεται στο σύνολο εκείνο των συσκευών που παρακολουθούν, ελέγχουν και προστατεύουν το ΣΗΕ. Η διαδικασία της αυτοματοποίησης μπορεί να διαιρεθεί σε τρία διακριτά στάδια:

- *Συλλογή δεδομένων (data acquisition)*: αυτό είναι το στάδιο στο οποίο συλλέγονται οι πληροφορίες. Τα δεδομένα μετρώνται, συνηθέστερα σε αναλογική μορφή τιμών έντασης ή τάσης, μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή και είναι διαθέσιμα να χρησιμοποιηθούν από την ίδια τη μετρητική συσκευή, ή να αποσταλούν σε κάποια άλλη συσκευή του δικτύου είτε σε οποιαδήποτε βάση δεδομένων προσβάσιμη από τους διαχειριστές.
- *Εποπτεία (supervision)*: σε αυτό το στάδιο, διαχειριζόμενος κατάλληλα τον όγκο της πληροφορίας που έχει αποκομιστεί, ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός υπό το χειρισμό του εκπαιδευμένου προσωπικού είναι σε θέση να επιτηρεί την κατάσταση του ΣΗΕ.

Ο εποπτικός εξοπλισμός αποτελείται κατά κύριο λόγο από οθόνες και οπτικοακουστικό εξοπλιστικό σύστημα.

- Έλεγχος (*control*): το στάδιο του ελέγχου αφορά το συντονισμό του συστήματος μέσω της διαχείρισης του εξοπλισμού. Οι χειριστές των μηχανημάτων και των συσκευών, είναι σε θέση να εκτελούν ρυθμιστικές εντολές και να ανταποκρίνονται στις ανάγκες του συστήματος βασιζόμενοι στη διαρκή εποπτεία του.

2.2.1 Αυτοματοποίηση Δικτύου Διανομής (Distribution Automation – DA)

Η μετάβαση από το συμβατικό ΣΗΕ σε ένα έξυπνο αυτοματοποιημένο ΣΗΕ συνεπάγεται τη μεταμόρφωσή του σε πολλαπλά επίπεδα αλλά η βαθμίδα εκείνη στην οποία αντιστοιχεί το μεγαλύτερο βάρος εφαρμογής, είναι το δίκτυο διανομής. Η σημασία των δικτύων διανομής για το ΣΗΕ είναι καθοριστική καθώς συνδέουν ουσιαστικά την παραγωγή με την κατανάλωση, όπως έχει όμως ήδη αναφερθεί το επίπεδο εποπτείας και ελέγχου της διανομής είναι σήμερα σχετικά χαμηλό. Ως εκ τούτου, η ανάγκη αναβάθμισης του εξοπλισμού όσο και η ανάγκη εφαρμογής τροποποιήσεων που θα καταστήσουν εφικτή τη διεύθυνση διεσπαρμένης παραγωγής θα επιφέρουν τεράστιες αλλαγές στις υποδομές διανομής, στις οποίες ως γνωστόν ανήκει η συντριπτική πλειοψηφία των γραμμών του δικτύου [10].

Ο εκσυγχρονισμός του δικτύου διανομής αναμένεται να έχει σημαντικά οφέλη σε ζητήματα αξιοπιστίας, στα οποία το σημερινό δίκτυο υστερεί. Επι παραδείγματι, η παρούσα διαμόρφωσή του, εκθέτει το δίκτυο διανομής στο έλεος ακραίων καιρικών φαινομένων με επιπτώσεις στην ορθή λειτουργία του. Ακόμα, η ακτινική δομή του έχει ως αποτέλεσμα την έντονη αλληλεξάρτηση μεταξύ των στοιχείων του, σε βαθμό που πολλές φορές ένα σφάλμα σε κάποιο στοιχείο να επηρεάσει δυσανάλογα μεγάλο αριθμό καταναλωτών. Αξίζει να αναφερθεί πως περίπου για το 80% των προβλημάτων αξιοπιστίας που εμφανίζει ένα ΣΗΕ και προκαλούν τη δυσαρέσκεια των καταναλωτών, είναι υπεύθυνο το σύστημα διανομής. Είναι προφανές λοιπόν γιατί η αξιοπιστία του συστήματος διανομής έχει αμέση συνάρτηση με το επιπέδο ικανοποίησης των καταναλωτών και γιατί η ανάγκη αναβάθμισής του προκύπτει επιτακτική. Το στοίχημα όμως για τις εταιρείες και τους διαχειριστές του δικτύου είναι η κατά το δυνατόν οικονομικότερη υλοποίηση του εγχειρήματος, κάτι που σημαίνει πως ζητούμενο είναι η βέλτιστη αξιοποίηση του υπάρχοντος δικτύου και των υποδομών του και όχι η υπερδιαστασιολόγησή του με αλόγιστες επεκτάσεις και δαπάνες.

Η αυτοματοποίηση ενός δικτύου διανομής είναι μια διαδικασία πολυσύνθετη, η οποία μπορεί να αναλυθεί σε πολλαπλά ιεραρχικά επίπεδα, ξεκινώντας από τον προμηθευτή που αποτελεί το ανώτερο επίπεδο και καταλήγοντας στον καταναλωτή. Ο όγκος των πληροφοριών προς διαχείριση και κατα συνέπεια οι ανάγκες σε εξοπλισμό είναι μεγέθη ανάλογα του ιεραρχικού επιπέδου. Συνοπτικά, η δομή ενός αυτοματοποιημένου δικτύου διανομής παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3.



Εικόνα 2.3 Τα επίπεδα εφαρμογής ενός αυτοματοποιημένου Δικτύου Διανομής

2.2.1.1 Σύστημα Διαχείρισης Διανομής (*Distribution Management System – DMS*)

Το DMS αφορά κυρίως τα ανώτερα επίπεδα εφαρμογής του αυτοματοποιημένου δικτύου (τους προμηθευτές και τα κέντρα ελέγχου) και ορίζεται ως ένα πλήθος εφαρμογών που αφορούν στην εποπτεία και τον έλεγχο του δικτύου διανομής με στόχο την αποδοτική λειτουργία και διαχείρισή του. Το κέντρο ελέγχου βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις πληροφορίες που λαμβάνονται από το DMS για τη λήψη αποφάσεων, την πραγματοποίηση επεμβάσεων και την εκτέλεση εντολών. Ταυτόχρονα, το DMS αλληλεπιδρά με ανεξάρτητα συστήματα όπως το *Customer Information System – CIS*, που αποτελεί μια βάση δεδομένων με προγράμματα τιμολόγησης και καταναλωτικά προφίλ πελατών ή το *Geographic Information System – GIS*, ένα πληροφοριακό σύστημα το οποίο εμπεριέχει δεδομένα χαρτογράφησης και επιτρέπει τη διαχείρισή τους σε ψηφιακό περιβάλλον. Είναι προφανές, πόσο διευκολύνεται ο διαχειριστής στον εντοπισμό και στην αποκατάσταση μιας βλάβης λόγω της αλληλεπίδρασης με τα συστήματα αυτά.

Οι σημαντικότερες λειτουργίες που επιτελεί το DMS είναι οι εξής:

- *Έλεγχος τάσης και αέργου ισχύος (Volt-VAR Control – VVC)*: η αντιστάθμιση της αέργου ισχύος στο δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα λιγότερες απώλειες και μικρότερες διακυμάνσεις στις τιμές τάσης.

- *Εντοπισμός και απομόνωση σφάλματος και αποκατάσταση λειτουργίας (Fault Location, Isolation and Service Restoration – FLISR):* η δυνατότητα άμεσου εντοπισμού μιας βλάβης και αποκατάστασής της μέσω απομόνωσης του προβληματικού στοιχείου και ανακατεύθυνσης της ροής ισχύος, είναι απαραίτητη σε ένα σύγχρονο αξιόπιστο δίκτυο διανομής. Η λειτουργία FLISR συνδυαστικά με τη VVC παρέχουν στο σύστημα εντυπωσιακές ικανότητες αυτοϊάσης.
- *Πρόβλεψη διανεμόμενου φορτίου (Distribution Load Forecasting – DLF):* δίνεται η δυνατότητα στον προμηθευτή να προβλέπει τις ανάγκες φορτίου, έστω και βραχυπρόθεσμα, συμβάλλοντας τα μέγιστα στο σχεδιασμό και τη διαχείριση της εταιρείας του.
- *Ανάλυση ροής φορτίου και εκτίμηση κατάστασης (Power Flow Analysis and State Estimation):* τόσο η ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου όσο και η πιθανότητα μελλοντικής επέκτασής του απαιτούν πιο συχνή, πιο γρήγορη και πιο έγκυρη ανάλυση της ροής φορτίου, στην οποία ακριβώς στοχεύει το DMS του αυτοματοποιημένου δικτύου.
- *Βέλτιστη Αναδιαμόρφωση Δικτύου (Optimal Network Reconfiguration):* γνωρίζοντας τις περιοχές κατανάλωσης στις οποίες υπάρχει συμφόρηση, δίνεται η δυνατότητα στο διαχειριστή να καταναίμει βέλτιστα τα φορτία στους πιθανούς παρόχους, επιφέροντας την ιδανική ισορροπία στο δίκτυο.



Εικόνα 2.4 Αναπαράσταση εκσυγχρονισμένου DMS

2.2.1.2 Αυτοματοποίηση υποσταθμών (Substation Automation – SA)

Η έννοια της SA αφορά την εποπτεία και τον έλεγχο του εξοπλισμού ενός υποσταθμού και στοχεύει στη ενσωμάτωση λειτουργιών προστασίας, ελέγχου και διαχείρισης δεδομένων χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο δυνατό υλικοτεχνικό εξοπλισμό, με σκοπό να εξοικονομήσει χρήματα, χώρο και χρόνο.

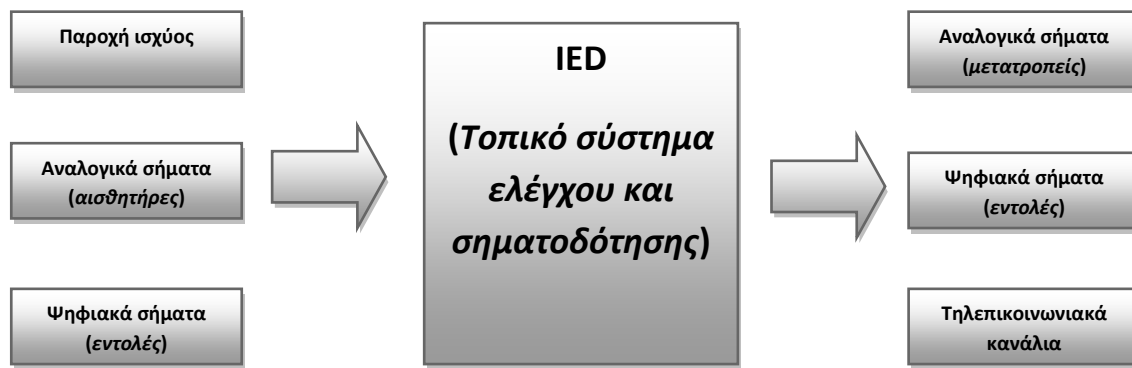
Μπορεί να χωριστεί σε δύο κύρια επίπεδα. Το πρώτο και χαμηλότερο αφορά την αυτοματοποίηση σε επίπεδο εξοπλισμού του ΣΗΕ το οποίο εμπεριέχει μετρητικές και ελεγκτικές συσκευές όπως ηλεκτρονικά ισχύος, διακόπτες κλπ. Η ενσωμάτωση οθονών και

σύγχρονων μέσων παρακολούθησης και ελέγχου, σημαίνει μείωση στα κόστη συντήρησης και αύξηση στη διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών, των διακοπών σε κυκλώματα υψηλών τάσεων και άλλων κρίσιμων στοιχείων που υπάρχουν στον υποσταθμό. Το δεύτερο επίπεδο αφορά την αυτοματοποίηση σε επίπεδο υποσταθμού και εμπεριέχει την ενσωμάτωση ευφυών συσκευών και διατάξεων, όπως το κέντρο απομακρυσμένου ελέγχου ή το κέντρο έκτακτης ανάγκης. Οι απομακρυσμένες μονάδες τερματικών τροφοδοσίας (FRTUs) οι οποίες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι ενός αυτοματοποιημένου υποσταθμού, είναι σε θέση να επιτελέσουν μια σειρά από λειτουργίες όπως η διακοπή παροχής σε περίπτωση σφάλματος, η μέτρηση βασικών μεγεθών (συχνότητα, ισχύς, συντελεστής ισχύος) και η καταγραφή παραμορφώσεων όπως η διακυμάνση τάσης, οι αρμονικές κλπ. Το γεγονός ότι οι μονάδες αυτές επικοινωνούν άμεσα και αμφίδρομα με το κέντρο διαχείρισης του δικτύου παρέχει μεγάλη ευελιξία και αξιοπιστία στο δίκτυο και καθιστά την αυτοματοποίηση υποσταθμών ένα ιδιαίτερα σημαντικό τμήμα της αυτοματοποίησης του δικτύου διανομής, σε σημείο που πολλές φορές οι δύο όροι ταυτίζονται [9].

2.2.2 Έξυπνες Ηλεκτρονικές Συσκευές (Intelligent Electronic Devices – IED)

Ένα σύγχρονο αυτοματοποιημένο δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει ανα πάσα στιγμή πληροφορίες στο διαχειριστή του και ως εκ τούτου πρέπει να διαθέτει κατάλληλα μετρητικά συστήματα, ικανά να συλλέξουν αλλά και να μεταφέρουν τις πληροφορίες αυτές. Επιπροσθέτως, η πληροφορία που παρέχεται από τα συστήματα εποπτείας και ελέγχου, είναι άσκοπη εάν δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμη με στόχο τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνουν οι IED που είναι ενσωματωμένες στο δίκτυο [10].

Ως IED μπορούμε να ορίσουμε κάθε συσκευή που διαθέτει ένα επίπεδο «ευφυίας» και επεξεργαστικής ικανότητας, η οποία λαμβάνοντας δεδομένα από αισθητήρες και ελεγκτικές διατάξεις που περιέχει, είναι σε θέση να εκτελεί εντολές και να επεμβαίνει στο σύστημα. Εξοπλισμένες με προηγμένες τεχνολογίες που επιτρέπουν αμφίδρομη επικοινωνία και απομακρυσμένο έλεγχο, προσαρμόζονται με ευκολία στις αλλαγές και τις διαταραχές που συμβαίνουν στο δίκτυο. Η άμεση διασύνδεση των IED με το κέντρο ελέγχου αλλά και μεταξύ τους, δημιουργεί ένα σύστημα που είναι σε θέση να «σκέφτεται» και να «δρα» κατά βούληση, καθιστώντας ιδιαίτερα εύκολο τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση σφαλμάτων και δίνοντας την ικανότητα αυτοϊασης στο δίκτυο. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει σχηματικά τις διασυνδέσεις μιας IED με το υπόλοιπο σύστημα.



Εικόνα 2.5 Διασύνδεση IED με το υπόλοιπο σύστημα

Μερικές από τις πιο συνήθεις IED που χρησιμοποιούνται στο αυτοματοποιημένο ΣΗΕ είναι οι εξής:

- Απομακρυσμένη Τερματική Μονάδα (Remote Terminal Unit – RTU): συνήθως συναντάται στους υποσταθμούς του δικτύου. Είναι μια συσκευή η οποία αποτελεί τερματικό σημείο διεπαφής μεταξύ των φυσικών συσκευών του συστήματος και του συστήματος ελέγχου.
- Διακόπτης Αυτόματης Επαναφοράς (Recloser): είναι ένας διακόπτης ισχύος ο οποίος ακολουθεί τη γνωστή αρχή λειτουργίας όλων των διακοπών, με τη διαφορά πως μπορεί να προγραμματιστεί έτσι ώστε να επαναφέρει τη λειτουργία του κυκλώματος έπειτα από ένα ορισμένο διάστημα, είτε αυτόματα είτε τηλεχειριζόμενα. Μετά το πέρας των επιλεγμένων προσπαθειών αποκατάστασης, αν το σφάλμα επιμένει, η ηλεκτροδότηση διακόπτεται οριστικά και ο διακόπτης απαιτεί χειροκίνητη επαναρύθμιση.
- Ψηφιακός Καταγραφέας Σφάλματος (Digital Fault Recorder): είναι μια συσκευή που μπορεί να καταγράψει πληροφορίες σχετικά με διαταραχές του συστήματος (αρμονικές, αστάθεια τάσης και συχνότητας). Με τον τρόπο αυτό, το αυτοματοποιημένο δίκτυο αποκτά «μνήμη» και είναι σε θέση να ανταποκρίνεται ευκολότερα σε σφάλματα.
- Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής (Programmable Logic Controller – PLC): είναι μια συσκευή η οποία μπορεί εύκολα να επαναπρογραμματίζεται ώστε να εκτελεί λογικό έλεγχο του συστήματος σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με τις επιθυμίες και τις ανάγκες του διαχειριστή, παρέχοντάς του τεράστια ευελιξία.
- Ηλεκτρονικός Μετρητής (Electronic Meter): σχετίζεται κυρίως με το τμήμα του δικτύου διανομής που αφορά στους καταναλωτές. Είναι η συσκευή που μπορεί να πραγματοποιήσει ακριβείς ψηφιακές μετρήσεις τιμών τάσης, έντασης και ισχύος και να τις αποθηκεύσει ώστε να δημιουργήσει ένα αρχείο μετρήσεων προσβάσιμο τόσο από το διαχειριστή όσο και από τον καταναλωτή.

2.3 Έξυπνοι μετρητές

Η ανάγκη των προμηθευτών ηλεκτρικής ενέργειας να είναι σε θέση να παρακολουθούν την ποσότητα ενέργειας που παρέχουν και να χρεώνουν ανάλογα τον καταναλωτή, προέκυψε από την πρώτη στιγμή που το ηλεκτρικό ρεύμα έγινε εμπορεύσιμο αγαθό. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στο σχεδιασμό και την κατασκευή διατάξεων που έχουν τη δυνατότητα μέτρησης βασικών ηλεκτρικών μεγεθών, όπως η τάση και το ρεύμα και βάσει αυτών των στοιχείων, μπορούν και υπολογίζουν με ακρίβεια την καταναλισκόμενη ισχύ. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται *μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας (meters)* και χρησιμοποιούνται σε κάθε εγκατάσταση που καταναλώνει ενέργεια, όπως μια κατοικία, μια επιχείρηση, μια βιομηχανία κλπ.

Η αρχή λειτουργίας ενός μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στη διαρκή μέτρηση των στιγμιαίων τιμών τάσης και έντασης, οι οποίες καθιστούν υπολογίσιμη την ισχύ. Ο πάροχος της ηλεκτρικής ενέργειας έχει πρόσβαση στα στοιχεία αυτά και κοστολογεί ανάλογα τον πελάτη του. Η επικρατέστερη μονάδα μέτρησης για τις καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος είναι η *κιλοβατώρα (kilowatt hour – kWh)* η οποία, όπως λέει και το όνομά της, είναι η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνει ένα φορτίο 1 kW σε διάστημα μίας ώρας.

2.3.1 Είδη μετρητών

Οι μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

Ηλεκτρομηχανικοί (συμβατικοί) μετρητές:

Η πλειοψηφία των υπαρχουσών υποδομών και εγκαταστάσεων είναι εξοπλισμένη με το γνωστό «ρολόι», το συμβατικό μονοφασικό ή τριφασικό μετρητή που είναι συνήθως εγκατεστημένος στην εξωτερική πλευρά ενός κτιρίου. Η λειτουργία του βασίζεται στην αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μέσω της μέτρησης του αριθμού των περιστροφών ενός μη μαγνητικού, αλλά ηλεκτρικά αγώγιμου μεταλλικού δίσκου (συνήθως αλουμινένιου). Η περιστροφική κίνηση του δίσκου προκαλείται από δύο πηνία, τα οποία είναι συνδεδεμένα έτσι ώστε το ένα να παράγει μαγνητική ροή ανάλογη της τάσης και το άλλο ανάλογη του ρεύματος, η αλληλεπίδραση των οποίων προσομοιάζει στην ουσία σε μια μηχανή επαγωγής δύο φάσεων. Η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου είναι ως εκ τούτου ανάλογη της ποσότητας ισχύος που διαρρέει το κύκλωμα. Μία διάταξη από μηχανικά μέρη καταγράφει τις περιστροφές και οπτικοποιεί τη μέτρηση στο καντράν του μετρητή.

Ηλεκτρονικοί μετρητές:

Οι ηλεκτρονικοί μετρητές αποτελούν εξέλιξη των ηλεκτρομηχανικών μετρητών. Η διάταξη αποτελείται από αισθητήρες τάσης και ρεύματος, μετατροπείς σημάτων και άλλα στοιχεία ενσωματωμένα σε μια μητρική πλακέτα-μικροεπεξεργαστή. Λαμβάνουν αναλογικές μετρήσεις τάσης και ρεύματος, τις οποίες μετατρέπουν σε ψηφιακές και τις μεταδίδουν σε ψηφιακές οθόνες (LCD ή LED). Διαθέτουν τη δυνατότητα να υπολογίσουν πιο σύνθετα μεγέθη όπως η άεργος ισχύς, ο συντελεστής ισχύος ή οι αρμονικές παραμορφώσεις και υποστηρίζουν δυνατότητες μέτρησης ανάλογα με τις ζώνες ώρας και τη ζήτηση φορτίου, καθώς διαθέτουν «μνήμη». Ορισμένοι διαθέτουν και δυνατότητα απομακρυσμένης επικοινωνίας ή τηλεχειρισμού.

Ηλεκτρομηχανικός Μετρητής	Ηλεκτρονικός Μετρητής
Δυνατότητα μέτρησης βασικών μεγεθών (τάση και ρεύμα)	Δυνατότητα μέτρησης συντελεστή ισχύος, αέργου ισχύος κλπ
Μηχανικά εξαρτήματα (τριβές, φθορά)	Απουσία κινητών μερών
Αναλογική-μηχανική μέτρηση	Ψηφιακή μέτρηση
Επαρκής ακρίβεια	Εξαιρετική ακρίβεια
Μονόδρομη επικοινωνία	Αμφίδρομη επικοινωνία
Μη διαδραστικός με τον καταναλωτή	Εύκολη συμμετοχή του καταναλωτή
Χειροκίνητες διαδικασίες	Αυτοματοποιημένες διαδικασίες
Χαμηλό κόστος	Σχετικά υψηλό κόστος

Πίνακας 2.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών συμβατικού – ηλεκτρονικού μετρητή

Τα πλεονεκτήματα του ηλεκτρονικού μετρητή έναντι του ηλεκτρομηχανικού είναι εμφανή. Σταδιακά, οι συμβατικοί μετρητές αντικαθίστανται από σύγχρονες τεχνολογίες οι οποίες διαρκώς εξελίσσονται. Οι ολοένα αυξανόμενες δυνατότητες του ηλεκτρονικού μετρητή, περιλαμβάνουν την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ προμηθευτή – καταναλωτή, ενσωματωμένα συστήματα πληροφορίας, παρακολούθησης και ελέγχου των καταναλώσεων, αυτοματοποιημένες ρυθμιστικές λειτουργίες όπως η εξομάλυνση τάσης ή συχνότητας και ικανότητα ασύρματης επικοινωνίας με άλλες συσκευές. Κατά αυτόν τον τρόπο, ορίζεται πλέον η έννοια του *έξυπνου μετρητή*, μιας συσκευής που μέρα με τη μέρα χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο από τους μεγάλους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας στα πλαίσια του εκσυγχρονισμού και της αυτοματοποίησης των δικτύων τους [11].

2.3.2 Μετρητικά συστήματα

2.3.2.1 Συμβατική καταγραφή μέτρησης (Conventional Meter Reading)

Η διαδικασία καταμέτρησης με τη χρήση συμβατικών μετρητών, περιλαμβάνει την καταγραφή των καταναλώσεων ανά ένα τακτό χρονικό διάστημα (τουλάχιστον ενός μήνα) και την απασχόληση τεχνικού προσωπικού της εταιρείας-παρόχου. Δεν εξασφαλίζει απόλυτη ακρίβεια είτε λόγω απόκλισης των ενδείξεων από τις πραγματικές εξαιτίας φθοράς στο μετρητή είτε λόγω ανάμειξης του ανθρώπινου παράγοντα στη διαδικασία και την πιθανότητα λάθους.

Στην Ελλάδα, ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. εφαρμόζει τετραμηνιαία καταμέτρηση στους καταναλωτές Χαμηλής Τάσης που αποτελεί τη μεγαλύτερη μερίδα πελατών (οικίες, καταστήματα, μικρές επιχειρήσεις κλπ) και μηνιαία στους καταναλωτές Μέσης και Υψηλής Τάσης [12]. Το τεχνικό προσωπικό καταγράφει την ένδειξη στους μετρητές και το μηχανογραφικό σύστημα της εταιρείας υπολογίζει αυτόματα την κατανάλωση του τετραμήνου ως τη διαφορά της ένδειξης αυτής από την ένδειξη προ τετραμηνίας. Στο ενδιάμεσο διάστημα, ο πελάτης ενημερώνεται για τις καταναλώσεις του μέσω των κατ' εκτίμηση καταναλώσεων («έναντι»), οι οποίες προκύπτουν αυτόματα βασιζόμενες σε αλγόριθμους που περιλαμβάνουν το ιστορικό του καταναλωτικού προφίλ, επιτυγχάνοντας μια σχετική ακρίβεια εκτός κι αν οι καταναλωτικές συνήθειες του πελάτη έχουν αλλάξει άρδην.

2.3.2.2 Αυτοματοποιημένη καταγραφή μέτρησης (Automated Meter Reading - AMR)

Η τεχνολογία αυτή αποτελεί το επόμενο στάδιο εξέλιξης των μετρητικών συστημάτων, αναπτύχθηκε αρχικά στα μέσα της δεκαετίας του '80 και διαδόθηκε λίγο αργότερα, στις αρχές της δεκαετίας του '90 χρησιμοποιούμενη από τις μεγάλες εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση αυτού του μετρητικού συστήματος δεν απαιτεί χειροκίνητες καταμετρήσεις, αλλά τις πραγματοποιεί αυτόματα και αποστέλλει τα αποτελέσματα κατευθείαν στον πάροχο. Η επικοινωνία παρόχου – καταναλωτή παραμένει μονόδρομη, αλλά υπάρχει η δυνατότητα για συχνότερες καταμετρήσεις (ακόμα και σε ημερήσια βάση) και φυσικά πιο ακριβείς. Οι χρεώσεις βασίζονται σε παρακολούθηση της κατανάλωσης σχεδόν σε πραγματικό χρόνο και όχι σε εκτιμήσεις με βάση ιστορικά στοιχεία, παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία και έλεγχο στον καταναλωτή.

2.3.2.3 Προηγμένες υποδομές μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure – AMI)

Ο όρος AMI πρωτοεμφανίστηκε περίπου το 2005 και ακόμα και σήμερα μπορεί λανθασμένα να ταυτιστεί με την τεχνολογία AMR. Οι δύο τεχνολογίες έχουν λειτουργικές ομοιότητες, η αλήθεια όμως είναι πως η AMI βασίζεται μεν στην AMR αλλά αποτελεί εξέλιξη της. Το σύστημα AMI επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία προμηθευτή – καταναλωτή και διαθέτει ικανότητα αδιάληπτης παρακολούθησης και μέτρησης των καταναλώσεων και επικοινωνίας με τον πάροχο σε πραγματικό χρόνο. Ένα σύστημα AMI, περιλαμβάνει τις μετρητικές διατάξεις, ένα επικοινωνιακό δίκτυο αμφίδρομης επικοινωνίας και ένα σύστημα το οποίο παραλαμβάνει και διαχειρίζεται τα δεδομένα.



Εικόνα 2.6 Η έννοια του συστήματος AMI

Τα μετρητικά αυτά συστήματα επιτρέπουν την πραγματοποίηση περιοδικών μετρήσεων (ωριαίες ή ακόμα συχνότερες), διαθέτουν δυνατότητα παροχής πληροφοριών όπως η ζήτηση φορτίου, η ροή ενέργειας, η ποιότητα του παρεχόμενου ρεύματος και (καθότι διαθέτουν «μνήμη») δυνατότητα πρόσβασης στο ιστορικό καταναλώσεων, διακοπών ρεύματος ή διαταραχών τάσης. Διαθέτουν υπερσύγχρονα συστήματα εποπτείας και ελέγχου και ως εκ τούτου μπορούν να ενημερώσουν άμεσα για μια πιθανή μηχανική βλάβη, τον εντοπισμό διαρροής ενέργειας (πχ ρευματοκλοπή) ή για μια επερχόμενη διακοπή. Η ενσωματωμένη «ευφυΐα» που διαθέτουν τους επιτρέπει να πραγματοποιούν προβλέψεις φορτίου και βέλτιστη διαχείριση του εξοπλισμού, καθώς και να εκτελούν απομακρυσμένους χειρισμούς φορτίων, επιτυγχάνοντας αυτόματα την επαναφορά του συστήματος μετά από κάποιο σφάλμα.

2.3.3 Meter Data Management System (MDMS)

Απαραίτητη για τη λειτουργία ενός ευφυούς μετρητικού συστήματος, εκτός από την ύπαρξη μετρητικού τεχνολογικού εξοπλισμού και επικοινωνιακού δικτύου, είναι η ύπαρξη

συστημάτων συντονισμού και διαχείρισης του τεράστιου όγκου της πληροφορίας. Τα συστήματα αυτά, γνωστά ως MDMS, ενσωματώνουν λογισμικό ικανό να συλλέξει και να αποθηκεύσει τα δεδομένα που παρέχουν οι έξυπνοι μετρητές σε πραγματικό χρόνο και παρέχουν τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου διαφόρων διαδικασιών. Ανάμεσα στις λειτουργίες τους είναι η αρχειοθέτηση της πληροφορίας σε βάσεις δεδομένων και η εύκολη πρόσβασή της, η δυνατότητα απομακρυσμένων χειρισμών ή επαναφοράς του συστήματος σε έκτακτες περιπτώσεις, η ανάλυση, εκτίμηση και επεξεργασία των μετρήσεων καθώς και η επίβλεψη και βέλτιστη διαχείριση του εξοπλισμού. Η ίδια η δομή των MDM συστημάτων επιτρέπει και ενθαρρύνει την αλληλεπίδραση της εταιρείας-παρόχου με περιβάλλοντα που ενσωματώνουν εφαρμογές λογισμικού, που αφορούν διαδικασίες όπως:

- *Τιμολόγηση*: πολιτικές τιμολογήσεων (Time of Use - TOU, Critical Peak Pricing - CPP)
- *Διακοπές ρεύματος*: ηχητική ειδοποίηση, αυτοματοποιημένη αποκατάσταση (Outage Management System – OMS, Geographic Information System - GIS)
- *Διασφάλιση αξιοπιστίας*: επικύρωση μετρητικών δεδομένων, αποφυγή λαθών, ακρίβεια (Validation Estimation Editing – VEE)
- *Εξυπηρέτηση καταναλωτή*: πρόβλεψη ζήτησης, καταγραφή καταναλωτικού προφίλ (Customer Information System – CIS)

Τα MDMS αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των Ευφυών Δικτύων, καθώς διασφαλίζουν ακρίβεια και αποτελεσματικότητα στην εξυπηρέτηση, στοιχεία που αποτελούν στόχο κάθε ευφυούς μετρητικού συστήματος. Πολύ συχνά, το σύστημα MDM εγκαθίσταται και λειτουργεί προτού πραγματοποιηθεί η τοποθέτηση των έξυπνων μετρητών καθώς είναι σε θέση να συμβάλλει στην πρόβλεψη της βέλτιστης εγκατάστασης του εξοπλισμού. Το μέγεθος ενός συστήματος διαχείρισης μετρητικών δεδομένων ποικίλλει και είναι ανάλογο των μεγεθών που ενσωματώνει το σύστημα που καλείται να υποστηρίξει, όπως ο όγκος των προς διαχείριση πληροφοριών και ο αριθμός των πελατών. Ανεξάρτητα πάντως από το μέγεθός τους, τα εν λόγω συστήματα, δεδομένης της ραγδαίας τεχνολογικής ανάπτυξης και διόγκωσης της διακινούμενης πληροφορίας, οφείλουν να είναι τεχνολογικά επεκτάσιμα προκειμένου να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε μελλοντικές προκλήσεις [10].

2.3.4 Οφέλη και κίνδυνοι από τη χρήση έξυπνων μετρητών

Η εγκατάσταση και χρήση των έξυπνων μετρητών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του ευφυούς δικτύου και αναμένεται να προκαλέσει ποικίλλες αλλαγές στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή που τα γνωρίζουμε σήμερα. Η μετάβαση στα έξυπνα μετρητικά συστήματα αναμφίβολα αποτελεί μια σπουδαία τεχνολογική αναβάθμιση και ως εκ τούτου αναμένεται να επιφέρει πολλαπλά οφέλη στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας ειδικότερα και στην κοινωνία γενικότερα. Ταυτόχρονα όμως αποτελεί μια τεχνολογία με

περιορισμένη εφαρμογή μέχρι στιγμής, η οποία χρήζει περαιτέρω μελέτης προκειμένου να διασφαλιστεί πως η χρήση της δε θα επιφέρει κινδύνους [11].

2.3.4.1 Αναμενόμενα οφέλη

Οι ομάδες που αναμένεται να επωφεληθούν από την εγκατάσταση των έξυπνων μετρητών είναι πολλές και περιλαμβάνουν τόσο τους καταναλωτές όσο και τους προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας, το ίδιο το δίκτυο διανομής καθώς και το ευρύτερο κοινωνικό σύνολο.

Συγκεκριμένα οι καταναλωτές είναι σε θέση:

- Να ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο για τις καταναλώσεις τους και να έχουν πλήρη έλεγχο και εποπτεία του καταναλωτικού τους προφίλ.
- Να διαχειρίζονται κατάλληλα και να προγραμματίζουν την κατανάλωση προς όφελός τους, καθώς οι μετρητές είναι σε θέση να λαμβάνουν εντολές που αφορούν τη λειτουργία των συσκευών, τη σύνδεση/αποσύνδεση από το δίκτυο κ.α.
- Να επικοινωνούν αμφίδρομα με τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, είτε λαμβάνοντας χρήσιμες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο είτε αποστέλλοντας δεδομένα, ερωτήσεις, παράπονα.
- Να αποκτήσουν ευκολότερα πρωτοβουλίες και κίνητρα ενσωμάτωσης διεσπαρμένης παραγωγής στο οικιακό δίκτυο. Η παραγωγή από ΑΠΕ ελέγχεται από το ευφυές δίκτυο, με αποτέλεσμα η παραγωγή, η κατανάλωση και η αποθήκευση ενέργειας να ρυθμίζεται βέλτιστα για τον καταναλωτή.
- Να απολαμβάνουν υπηρεσίες παροχής υψηλότερης ποιότητας ρεύματος καθώς και μεγαλύτερη ασφάλεια.
- Να αγοράζουν φτηνότερα την ηλεκτρική ενέργεια λόγω του αποδοτικότερου συστήματος διαχείρισης.

Αντίστοιχα, δίνεται στους προμηθευτές η δυνατότητα:

- Να δρουν πιο ευέλικτα στην αγορά και να παρέχουν ανταγωνιστικά προϊόντα και τιμολογήσεις, τα οποία αντιστοιχούν στις ανάγκες του κάθε καταναλωτή ξεχωριστά.
- Να εξαλείψουν τα προβλήματα που προκύπτουν μέσω της διαδικασίας συμβατικής μέτρησης (ενδεχόμενο ανθρώπινου λάθους, ανεπαρκής πρόβλεψη - μεσολάβηση μεγάλων διαστημάτων ανάμεσα σε δύο μετρήσεις, δαπάνες για το προσωπικό που πραγματοποιεί τις μετρήσεις).

- Να διαθέτουν καλύτερη εποπτεία του δικτύου και συνεπώς να παρεμβαίνουν άμεσα όπου και όποτε είναι αναγκαίο (απομόνωση βλάβης, προστασία καταναλωτή – δικτύου, ρευματοκλοπές).
- Να έχουν πρόσβαση σε ψηφιακά δεδομένα και βάσεις δεδομένων με αποτέλεσμα την ικανοποιητική πρόβλεψη των αναγκών σε ζήτηση φορτίου και τη βέλτιστη διαχείριση πόρων, εξοπλισμού και κεφαλαίων.
- Να επωφελείται από τις πληροφορίες που παρέχει η αμφίδρομη σε πραγματικό χρόνο επικοινωνία με τον καταναλωτή.

Επιπλέον, επωφελείται ο ίδιος ο διαχειριστής του δικτύου καθώς τα έξυπνα μετρητικά συστήματα του επιτρέπουν:

- Να διαχειρίζεται βέλτιστα τον εξοπλισμό καθώς διαθέτει άριστη εποπτεία και αυξημένες δυνατότητες ελέγχου και επέμβασης.
- Να παρέχει υπηρεσίες βελτιωμένης ποιότητας μέσω της αξιοποίησης πληροφοριών που αφορούν σε χαρακτηριστικά του δικτύου (ποιότητα ρεύματος, ρύθμιση τάσης – συχνότητας).
- Να προλαμβάνει βλάβες ή όταν αυτό δεν είναι δυνατό, να τις απομονώνει άμεσα και αποτελεσματικά, επιτυγχάνοντας τη μέγιστη ασφάλεια τόσο του δικτύου και του εξοπλισμού του, όσο και του καταναλωτή.

Εν τέλει, οφέλη προκύπτουν για όλο το κοινωνικό σύνολο, που έχει την ευκαιρία:

- Να ευαισθητοποιηθεί και να δράσει για το περιβάλλον (διείσδυση ΑΠΕ, μείωση εκπομπής αερίων ρύπων).
- Να επενδύσει ποσά τα οποία εξοικονόμησε από την ηλεκτρική ενέργεια, σε άλλες πτυχές του τομέα της ενέργειας και όχι μόνο.

2.3.4.2 Πιθανοί κίνδυνοι

Παράλληλα με τα πολλαπλά οφέλη που αναμένονται από τη χρήση μιας τέτοιας τεχνολογίας, προκύπτουν όπως είναι φυσικό και ορισμένα ζητήματα τα οποία χρήζουν προσοχής και διερεύνησης. Τα ζητήματα αυτά αφορούν σε κινδύνους που σχετίζονται με:

- Τη διασφάλιση της σωστής εξυπηρέτησης των καταναλωτών. Τα συστήματα αυτά δίνουν στους προμηθευτές σαφώς περισσότερες δυνατότητες παρέμβασης έναντι των καταναλωτών και ως εκ τούτου τη δυνατότητα αυθαιρεσίας σε ζητήματα χρεώσεων, διακοπών παροχής. Απαραίτητη κρίνεται λοιπόν η ύπαρξη κατάλληλης νομοθεσίας και όρων στη σύμβαση μεταξύ καταναλωτή και παρόχου, ώστε να προστατεύεται ο καταναλωτής.
- Την προστασία των προσωπικών δεδομένων των καταναλωτών. Η ύπαρξη ιδιωτικών πληροφοριών σε ψηφιακά δεδομένα, εκτός της ευκολίας που παρέχει στον εντοπισμό και τη μεταφορά, ενέχει και τον κίνδυνο της υποκλοπής ή της παράνομης δημοσίευσης. Για τον περιορισμό του εν λόγω κινδύνου, μέτρα μπορεί να λάβει τόσο ο πάροχος (εξουσιοδότηση πρόσβασης σε προσωπικά δεδομένα σε συγκεκριμένα άτομα υπό συγκεκριμένες συνθήκες, χρήση κρυπτογραφίας στα υπολογιστικά συστήματα) όσο και η πολιτεία (νομοθεσία).
- Την προστασία και αντιμετώπιση ηλεκτρονικών επιθέσεων. Όπως και όλα τα συστήματα που χρησιμοποιούν υπολογιστές, τηλεπικοινωνίες και το διαδίκτυο έτσι και το έξυπνο μετρητικό σύστημα είναι ευάλωτο σε κακόβουλες απομακρυσμένες ηλεκτρονικές επιθέσεις. Σε περίπτωση μιας τέτοιας επίθεσης, βρίσκονται εκτεθειμένοι τόσο οι καταναλωτές, όσο και οι πάροχοι και το ίδιο το δίκτυο και ο δράστης της επίθεσης αποκτά πρόσβαση σε απόρρητες πληροφορίες και μερικό ή ολικό έλεγχο του συστήματος. Ως εκ τούτου, επιτακτική είναι η διασφάλιση της αποτελεσματικής αντιμετώπισης τέτοιων επιθέσεων με αμυντικά ηλεκτρονικά συστήματα και τείχη προστασίας, κρυπτογραφία, δυνατότητα χειροκίνητης απομακρυσμένης διακοπής λειτουργίας του δικτύου που έχει πληγεί κ.α.
- Τη διασφάλιση της υγείας των καταναλωτών. Οι έξυπνοι μετρητές ως γνωστόν είναι ηλεκτρονικές συσκευές που επικοινωνούν ασύρματα κάνοντας χρήση τηλεπικοινωνιών και ως εκ τούτου εκπέμπουν σήματα και ακτινοβολίες. Οι εκπομπές αυτές είναι στα ελάχιστα δυνατά επίπεδα παρόλαυτα ένα κομμάτι της παγκόσμιας κοινότητας είναι σκεπτική απέναντι στη χρήση ασύρματης τεχνολογίας και επισημαίνει κινδύνους για άτομα «ηλεκτρομαγνητικά υπερευαίσθητα» των οποίων η έκθεση σε ασύρματες τεχνολογίες προκαλεί ζαλάδα, υπερκόπωση, προβλήματα ύπνου κ.α. Προφανώς προτού γίνει καθολική εφαρμογή των έξυπνων μετρητών, προαπαιτείται η διασφάλιση πως τέτοιου είδους κίνδυνοι δεν είναι υπαρκτοί.

2.3.5 Οι έξυπνοι μετρητές στο Ελληνικό Δίκτυο

Ο φορέας εκείνος που είναι αρμόδιος για την ενσωμάτωση έξυπνων μετρητικών συστημάτων στο ελληνικό δίκτυο είναι ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. Η παρούσα κατάσταση του ελληνικού δικτύου περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο έργο σε πελάτες Μέσης Τάσης, ένα έργο το οποίο βρίσκεται σε εξέλιξη και στοχεύει στην εξυπηρέτηση μεγάλων πελατών Χαμηλής Τάσης (ισχύος άνω των 55kVA) καθώς και ορισμένα πιλοτικά προγράμματα που δρομολογούνται και τελικά αποσκοπούν στην καθολική αντικατάσταση των συμβατικών

μετρητών από ηλεκτρονικούς και την εξυπηρέτηση όλων των πελατών ΧΤ που αποτελούν και το μεγαλύτερο κομμάτι του καταναλωτικού κοινού. Αναλυτικότερα:

- *Σύστημα τηλεμέτρησης πελατών ΜΤ (ολοκληρωμένο)*

Το έργο «Μελέτη, προμήθεια και εγκατάσταση συστήματος τηλεμέτρησης και επεξεργασίας μετρητικών δεδομένων Μέσης Τάσης» ολοκληρώθηκε το Νοέμβριο του 2009 και χρηματοδοτήθηκε πλήρως από το Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης. Εξυπηρετεί 13.500 πελάτες (καταναλωτές/παραγωγούς) Μέσης Τάσης και κατ' ουσίαν διαχειρίζεται το 23% της διανεμόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο ελληνικό δίκτυο [13].

- Οι χώροι στους οποίους εγκαταστάθηκαν οι μετρητικές διατάξεις επιλέχθηκαν με τα εξής κριτήρια: να είναι εύκολα επισκέψιμοι και προσβάσιμοι στο αρμόδιο προσωπικό, να είναι επαρκώς προστατευμένοι από επιδράσεις υγρασίας, θέρμανσης και σκόνης και ο εξοπλισμός να στηρίζεται σε στοιχεία που δεν υπόκεινται σε κραδασμούς.
- Οι μετρητές είναι τριφασικοί ηλεκτρονικοί μετρητές 2 στοιχείων – 3 αγωγών, ενεργού (κλάση ακρίβειας 1) και αέργου (κλάση ακρίβειας 2) ισχύος, ασυμμέτρου φόρτισης. Τα μετρητικά δεδομένα που συλλέγονται έχει επιλεγεί να αποστέλλονται ανά 15 λεπτά κάνοντας χρήση επικοινωνιακών δικτύων GSM/GPRS ή PSTN μέσω τηλεφωνικών γραμμών.
- Ο ΔΕΔΔΗΕ συλλέγει τις μετρήσεις μέσω AMR συστημάτων. Η λήψη μετρήσεων πραγματοποιείται είτε ημερησίως με τηλεμέτρηση είτε μηνιαίως με τηλεμέτρηση ή επιτόπια λήψη ενδείξεων. Οι μετρητές έχουν δυνατότητα επικοινωνίας με Κεντρικό Σταθμό Τηλεμέτρησης μέσω του πρωτοκόλλου DLMS.

- *Σύστημα τηλεμέτρησης μεγάλων πελατών ΧΤ (σε εξέλιξη)*

Το έργο «Εγκατάσταση συστήματος τηλεμέτρησης μεγάλων πελατών Χαμηλής Τάσης» ξεκίνησε το Φεβρουάριο του 2013 λαμβάνοντας μερική χρηματοδότηση από το Δ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης και ανατέθηκε στην εταιρεία ΙΝΤΡΑΚΑΤ Α.Ε. Στοχεύει στην εξυπηρέτηση πελατών ΧΤ με μεγαλύτερη συμφωνημένη ισχύ και αφορά κυρίως σε βιοτεχνίες, μεγάλα καταστήματα, σχολεία, αρδευτικές περιοχές κλπ. Αρχικός στόχος ήταν η εγκατάσταση μετρητικού εξοπλισμού σε 65.000 τέτοιους πελάτες, οι οποίοι αντιστοιχούν περίπου στο 11% της διανεμόμενης ενέργειας.

- Το έργο περιλαμβάνει την κατασκευή δύο πανομοιότυπων Κέντρων Τηλεμέτρησης (ένα κύριο και ένα εφεδρικό) αρχικής δυναμικότητας 100.000 μετρητικών σημείων με δυνατότητα επέκτασης στα 250.000.

- Θα εγκατασταθούν 60.000 μετρητές σε πελάτες με συμφωνημένη ισχύ κατηγορίας Νο 5 (85kVA), Νο 6 (135kVA) και Νο 7 (250kVA) και 5.000 μετρητές σε πελάτες κατηγορίας Νο 3 (35kVA) και Νο 4 (55kVA).
- Η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω δικτύων GSM/GPRS.

- *Σύστημα τηλεμέτρησης πελατών ΧΤ (υπό διαβούλευση)*

Για το έργο «Πιλοτικό σύστημα τηλεμέτρησης και διαχείρισης της ζήτησης παροχών ηλεκτρικής ενέργειας οικιακών και μικρών εμπορικών καταναλωτών και εφαρμογής έξυπνων δικτύων» έχει διακηρυχτεί διαγωνισμός εύρεσης αναδόχου. Στοχεύει στην εξυπηρέτηση πελατών ΧΤ που αποτελούν και την πλειοψηφία των καταναλωτών και σε βάθος χρόνου αποσκοπεί στην πλήρη ενσωμάτωση των έξυπνων μετρητικών συστημάτων σε όλη την επικράτεια. Σε πρώτη φάση αναμένεται να εφαρμοστεί δοκιμαστικά εγκαθιστώντας 160.000 μετρητές σε επιλεγμένες περιοχές της χώρας (νομός Ξάνθης, Λευκάδα, Λήμνος, Λέσβος, Αγ. Ευστράτιος), με στόχο να τεκμηριωθεί τεχνοοικονομικά το εγχείρημα και να προχωρήσει σε ευρεία εφαρμογή [14].

- Τα μετρητικά συστήματα θα είναι τεχνολογίας AMI και θα ενσωματώνουν σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες: φερέσυχνα Μ.Τ και Χ.Τ (Power Line Carrier/ Distribution Line Carrier – PLC/DLC) σε ποσοστό 40%, διαδικτυακό πρωτόκολλο (TCP/IP) σε ποσοστό 40%, ασύρματη τεχνολογία GPRS/GSM σε ποσοστό 10%, ραδιοσυχνότητα (RF mesh) σε ποσοστό 5% και οποιαδήποτε τεχνολογία επιλογής του αναδόχου σε ποσοστό 5%. Η παραπάνω ποσόστωση είναι η ενδεικτικά προτεινόμενη από τον ΔΕΔΔΗΕ.
- Τα Κέντρα Τηλεμέτρησης κατά την πιλοτική εφαρμογή αρκεί να διαθέτουν τη δυνατότητα υποστήριξης έως 200.000 μετρητικών σημείων αλλά πρέπει να είναι επεκτάσιμα για την υποστήριξη συνολικά 7.500.000 σημείων προκειμένου με την εφαρμογή του μακροπρόθεσμου σχεδίου να καλύπτονται οι ανάγκες ολόκληρης της επικράτειας.

2.4 Τηλεπικοινωνιακά δίκτυα στο Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό του ΕΗΔ είναι η δυνατότητα διαχείρισης και μεταφοράς δεδομένων και η επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων του. Η ενσωμάτωση ολοένα και περισσότερων AMI συστημάτων στα ηλεκτρικά δίκτυα, οδηγεί σε μια νέα εποχή στην οποία η ανάπτυξη ολοκληρωμένης τηλεπικοινωνιακής υποδομής καθίσταται αναγκαία για την ύπαρξη ενός σύγχρονου ηλεκτρικού δικτύου. Βασική πρόκληση για τους σχεδιαστές των συστημάτων αυτών, αποτελεί η δόμησή τους με τρόπο εργονομικό και βέλτιστα

λειτουργικό καθώς και η επιλογή των κατάλληλων υπάρχουσων τεχνολογιών (ή και η ανάπτυξη καινούριων) για την εκτέλεση των λειτουργιών τους.

2.4.1. Δομή δικτύων επικοινωνίας

Όπως συμβαίνει με όλα τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, έτσι και τα δίκτυα επικοινωνίας του ΕΗΔ διαθέτουν συγκεκριμένη αρχιτεκτονική και διακριτή ιεράρχηση [15]. Ο διαχωρισμός μπορεί να γίνει σε τρία βασικά επίπεδα με κριτήριο το εύρος της γεωγραφικής κάλυψης:

- *Home Area Network – HAN (ή Premise Area Network – PAN)*

Τα δίκτυα αυτά αποτελούν τη χαμηλότερη βαθμίδα επικοινωνίας στις εφαρμογές του ευφυούς δικτύου. Αφορούν στη διασύνδεση μεταξύ των συσκευών σε μια οικία και επιτρέπουν τη διαχείριση της κατανάλωσης (απόκριση ανάλογη της ζήτησης) αξιοποιώντας τα μετρητικά δεδομένα. Οι απαιτήσεις για τη λειτουργία αυτών των δικτύων είναι σχετικά χαμηλές, για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται τεχνολογίες οικονομικές, μικρής ισχύος και περιορισμένου βεληνεκού εξοπλισμού. Οι τεχνολογίες αυτές είναι συνήθως ασύρματες αλλά μπορεί να είναι και ενσύρματες, χρησιμοποιώντας είτε την υπάρχουσα είτε πρόσθετη καλωδίωση. Δημοφιλή ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούνται στα HANs είναι το πρωτόκολλο επικοινωνίας IEEE 802.11, κοινώς γνωστό ως WiFi, καθώς και το συγγενικό στο Bluetooth, πρωτόκολλο επικοινωνίας IEEE 802.15.4, ή αλλιώς ZigBee. Το πιο δημοφιλές ενσύρματο δίκτυο που αξιοποιούν τα HANs, είναι το Homeplug (IEEE 1901), ένα πρότυπο PLC τεχνολογίας που αξιοποιεί την ήδη υπάρχουσα οικιακή καλωδίωση και ακολουθεί το Ethernet (IEEE 802.3) το οποίο απαιτεί καινούρια καλωδίωση. Αντίστοιχη κατηγορία δικτύων με τα HANs, με ανάγκες στον εξοπλισμό ανάλογες της κλίμακάς τους, είναι και τα Business Area Networks (BANs) και τα Industrial Area Networks (IANs).

- *Neighborhood Area Network – NAN (ή Local Area Network – LAN)*

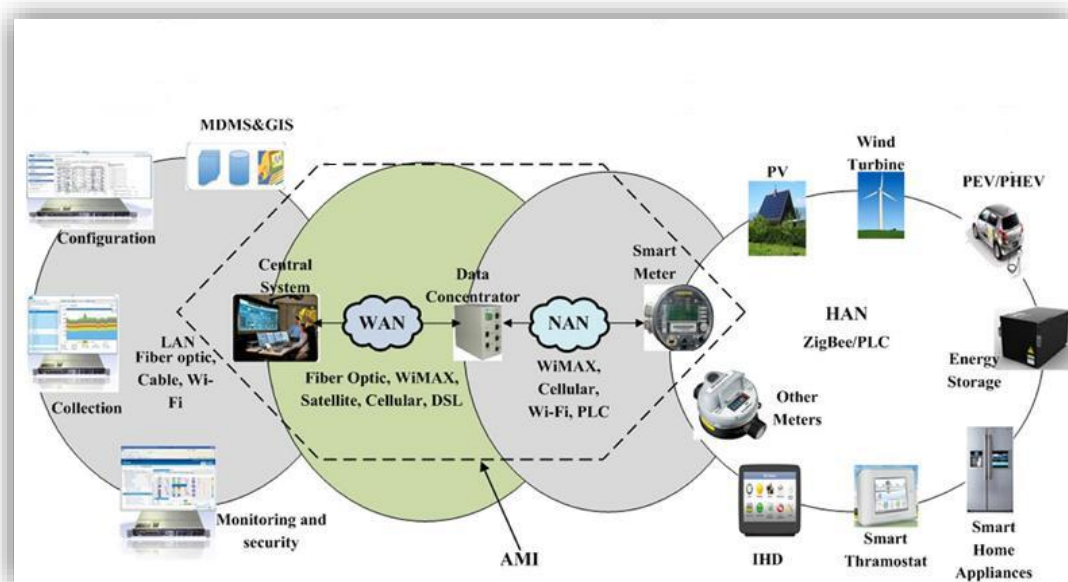
Η αμέσως υψηλότερη βαθμίδα αποτελεί το ενδιάμεσο δίκτυο επικοινωνίας του ευφυούς δικτύου και αφορά στη διασύνδεση των δύο ακραίων βαθμίδων. Τα NANs επιτρέπουν τη διασύνδεση συσκευών σε μια σαφώς ευρύτερη περιοχή από μια οικία ή μια επιχείρηση και είναι υπεύθυνα για την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ οικιακού καταναλωτή (HAN) και του προμηθευτή/διαχειριστή του δικτύου (WAN). Τα δεδομένα αποστέλλονται από τους μετρητές και συγκεντρώνονται σε ένα σημείο που συνήθως είναι ένας υποσταθμός ή ένα κέντρο ελέγχου, στο οποίο διαθέτει πρόσβαση ο διαχειριστής του δικτύου. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συχνά είναι ασύρματες, όπως πρωτόκολλα της οικογένειας WiMAX (IEEE 802.16) ή πιο σύγχρονες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας (UMTS, GPRS, LTE), εξίσου συνήθεις είναι όμως και οι ενσύρματες τεχνολογίες, ως επί το

πλείστον βασισμένες σε PLC πρότυπα όπως οι BPL (Broadband over Power Lines) που χρησιμοποιούν τη δημόσια καλωδίωση για μεταφορά δεδομένων.

- *Wide Area Network – WAN*

Τα δίκτυα αυτά αποτελούν την υψηλότερη βαθμίδα επικοινωνίας στο δίκτυο επικοινωνίας του ΕΗΔ και συχνότερα αναφέρονται ως backhaul δίκτυα. Ρόλος του backhaul δικτύου (ή «δικτύου οπισθόζευξης» σε μία πιο ελεύθερη μετάφραση) είναι η διασύνδεση του κυρίως δικτύου ή του δικτύου κορμού με τα δίκτυα εκτός του ορισμένου πλαισίου που αποτελεί το ΕΗΔ. Το backhaul θα μπορούσε να οριστεί ως το σημείο εκείνο του δικτύου που βρίσκεται στα όρια του αυστηρά ορισμένου ιεραρχημένου δικτύου και αποτελεί το διάυλο επικοινωνίας με τα εξωτερικά δίκτυα.

Τα WANs εκτείνονται σε μια σαφώς ευρύτερη γεωγραφική έκταση και είναι υπεύθυνα για τη διακίνηση της πληροφορίας σε μια μακροσκοπική κλίμακα για ολόκληρο το δίκτυο διανομής καθώς περιλαμβάνουν τους τερματικούς σταθμούς ελέγχου του δικτύου. Εφαρμογές των WANs στα ευφυή δίκτυα έχουν ήδη αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, όπως η αυτοματοποίηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στα συστήματα που αφορούν τη διανομή (κεφ. 2.2.1) ή η διαχείριση των πληροφοριών των AMI συστημάτων στα MDMS (κεφ. 2.3.3). Για να επιτελέσουν τις λειτουργίες αυτές χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο υπηρεσίες κυψελωτών δικτύων που χρησιμοποιούνται στην κινητή τηλεφωνία (cellular services – UMTS, LTE, GSM, GPRS). Εφαρμογή βρίσκουν και ορισμένες ενσύρματες τεχνολογίες, με τις πιο δημοφιλείς να είναι τα PLC πρωτόκολλα και οι τεχνολογίες Ethernet (πχ οπτικές ίνες).



Εικόνα 2.7 Σχηματική αναπαράσταση των βαθμίδων του δικτύου επικοινωνίας του ΕΗΔ

2.4.2. Τεχνολογίες και πρωτόκολλα επικοινωνίας

Τα δίκτυα επικοινωνίας ενός ΕΗΔ είναι δίκτυα πολυεπίπεδα και σύνθετα, τα οποία ενσωματώνουν διάφορες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες. Η ανάγκη για βέλτιστη διαχείριση του τεράστιου όγκου δεδομένων, καθώς και για αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων του ΕΗΔ, γρήγορα και αξιόπιστα, απαιτεί τη χρήση τεχνολογίας που μπορεί να καλύψει τις προϋποθέσεις αυτές. Ταυτόχρονα, το ΕΗΔ ενσωματώνει διαφορετικές εφαρμογές και διαδικασίες, όπου η καθεμία έχει διαφορετικές απαιτήσεις μετάδοσης πληροφορίας υπό διαφορετικές συνθήκες. [16] Για παράδειγμα, μια διαδικασία μπορεί να απαιτεί ικανότητα διαχείρισης μεγάλου όγκου πληροφορίας ενώ μια άλλη να εστιάζει στη γρήγορη και ακριβή μετάδοση της πληροφορίας. Η διαδικασία επιλογής των τεχνολογιών αυτών λαμβάνει υπόψη τις εκάστοτε ανάγκες και παραμέτρους, καθώς δεν υπάρχει κάποια επικρατέστερη τεχνολογία και ως αποτέλεσμα, συνηθέστερη είναι η χρήση συνδυασμού τεχνολογιών. Συνήθως, τα κριτήρια που προκύπτουν για την επιλογή μιας τεχνολογίας έναντι των υπολοίπων είναι τα ακόλουθα:

- *Ρυθμός μετάδοσης (data rate ή bandwidth)*: αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία μεταδίδεται η πληροφορία, συνήθως μετράται σε bits/δευτερόλεπτο (bits per second – bps). Διαφορετικά είδη τεχνολογιών υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης που συνήθως κυμαίνονται από δεκάδες ή εκατοντάδες kbps έως μερικά Mbps (Gbps στο άμεσο μέλλον).
- *Εμβέλεια (Range)*: αναφέρεται στη μέγιστη απόσταση αποτελεσματικής επικοινωνίας μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Οι τεχνολογίες περιορισμένης εμβέλειας εξυπηρετούν ένα βεληνεκές κάποιων μέτρων με τις τεχνολογίες υψηλής εμβέλειας να αγγίζουν αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων.
- *Αξιοπιστία (Reliability)*: αναφέρεται σε παραμέτρους που σχετίζονται με την ποιότητα μετάδοσης της πληροφορίας, όπως η *διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput)* που αφορά στο ρυθμό μετάδοσης πληροφοριών επιτυχώς, χωρίς απώλειες και αλλοιώσεις, και η *καθυστέρηση μεταφοράς (latency)* που αφορά στη χρονική καθυστέρηση από τη στιγμή αποστολής της πληροφορίας από τον πομπό μέχρι την παραλαβή και αποκωδικοποίησή της από το δέκτη. Μια αξιόπιστη τεχνολογία αναμένεται να πετυχαίνει throughput κοντά στο 100% και latency μερικών ms (έως κάποια sec).
- *Κόστος (Cost)*: αναφέρεται στις δαπάνες που είναι αναγκαίες για τη χρήση της τεχνολογίας, συμπεριλαμβάνοντας την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρησή της.

Στον επόμενο πίνακα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά κάποιες από τις σημαντικότερες εφαρμογές του ΕΗΔ, καθώς και οι κύριες λειτουργικές τους απαιτήσεις ως προς τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται παραπάνω [17].

Application	Data Rate	Throughput	Latency
Substation Automation	9.6-56 Kbps	99-99.99%	15-200 ms
AMI	10-100 Kbps/κόμβο 500 Kbps (backhaul)	>98%	2 s
Demand Response	14-100 Kbps/κόμβο	99%	500 ms – μερικά λεπτά
Distribution Automation (DA)	9.6-56 Kbps	>99.5%	20-200 ms
Outage Management System (OMS)	56 Kbps	98%	2-10 s
Customer Information System(CIS)	56 Kbps	99%	< 15 s
Meter Data Management	56 Kbps	99%	2 s
Distributed Energy Resources & Storage	9.6-56 Kbps	99-99.99%	300-2000 ms
Home Energy Management	9.6-56 Kbps	99-99.99%	300-2000 ms
Pricing	Ανάλογα την πολιτική τιμολόγησης	99-99/99%	< 1 min
Wide Area Situational Awareness Systems (WASA)	0.6-1.5 Mbps	99-99.99%	15-200 ms

Πίνακας 2.3 Λειτουργικές απαιτήσεις των εφαρμογών του ΕΗΔ

Σε κάθε περίπτωση επιλέγεται μια ή περισσότερες τεχνολογίες που καλύπτουν τις λειτουργικές απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Πέρα από τις διαφοροποιήσεις των τεχνολογιών αυτών ως προς τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται παραπάνω, η κύρια κατηγοριοποίησή τους έγκειται στην ικανότητα ή μη της ασύρματης εφαρμογής τους [18].

2.4.2.1 Ασύρματες τεχνολογίες επικοινωνίας

Οι τεχνολογίες αυτές, όπως δηλώνει και το όνομά τους, επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ στοιχείων που δε διαθέτουν φυσική σύνδεση, συνηθέστερα μέσω ραδιοκυμάτων.

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματά τους είναι το γεγονός πως καθιστούν εφικτές διασυνδέσεις σε σημεία δυσπρόσιτα και απομονωμένα καθώς και το σχετικά χαμηλό τους κόστος σε υποδομές. Από την άλλη, η φύση της λειτουργίας τους, τις καθιστά πιο ευάλωτες σε εξωτερικές παρεμβάσεις και αλλοιώσεις. Οι επικρατέστερες ασύρματες τεχνολογίες με δυνατότητα εφαρμογής στα ΕΗΔ είναι οι εξής:

- WiFi (IEEE 802.11): Η πιο δημοφιλής ασύρματη τεχνολογία για απομακρυσμένη πρόσβαση στο διαδίκτυο, προσφέρει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης σε ένα επιτρεπτό κόστος. Το πρότυπο 802.11n έχει επιτύχει εντυπωσιακές επιδόσεις.
- WiMAX (IEEE 802.16): Διαθέτει εφαρμογές παρόμοιες με αυτές του WiFi και αποτελεί τον κύριο ανταγωνιστή του καθώς παρέχει σαφώς μεγαλύτερη εμβέλεια σε ικανοποιητικές ταχύτητες. Χρησιμοποιείται ως backhaul τεχνολογία σε δίκτυα 2G, 3G και 4G.
- Zigbee (IEEE 802.15.4): Το Zigbee αποτελεί επιλογή χαμηλού κόστους και κατανάλωσης και αντίστοιχα διαθέτει δυνατότητες μικρής εμβέλειας και χαμηλού ρυθμού μετάδοσης.
- RF (Radio Frequencies): Οι ραδιοσυχνότητες εν γένει, εμπεριέχουν όλο το φάσμα συχνοτήτων από 3kHz έως 300 GHz. Σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές χρησιμοποιούνται συνήθως οι UHF (Ultra High Frequencies), 300MHz–3GHz, είτε τα μικροκύματα (microwaves) σε δορυφορικές επικοινωνίες, κυψελωτά δίκτυα κλπ.
- Bluetooth (IEEE 802.15.1): Μια ασύρματη τεχνολογία χαμηλής ισχύος ιδανική για ανταλλαγή δεδομένων σε κοντινές αποστάσεις και υλοποίηση WPANs (Wireless Personal Area Networks), με δυνατότητες που ποικίλλουν ανάλογα με την έκδοση και την κλάση του Bluetooth.
- GSM (Global System for Mobile communications): Πρόκειται για την υπηρεσία κυψελωτού δικτύου που αναφέρεται σε όλα τα πρωτόκολλα δεύτερης γενιάς (2G) και χρησιμοποιείται στην κινητή τηλεφωνία.
- GPRS (General Packet Radio Service): Βασισμένη στην GSM τεχνολογία, επιτρέπει εφαρμογές αποστολής και λήψης δεδομένων, καθώς και σύνδεσης στο διαδίκτυο στην κινητή τηλεφωνία. Πρόκειται για τεχνολογία που αναπτύχθηκε ανάμεσα στα δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς, για το λόγο αυτό θεωρείται 2.5G.
- EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution): Γνωστό και ως βελτιωμένο GPRS (Enhanced GPRS), το πρωτόκολλο EDGE αποτελεί τη μεταβατική τεχνολογία που επέφερε τις αλλαγές απόδοσης που επιτρέπουν τη χρήση 2G δικτύων σε 3G εφαρμογές.
- UMTS (Universal Mobile Telecommunications System): Βασισμένο και αυτό στο πρότυπο GSM, το UMTS είναι μια υπηρεσία κυψελωτού δικτύου τρίτης γενιάς (3G) με εφαρμογές στην κινητή τηλεφωνία. Η 3G τεχνολογία αναβάθμισε σημαντικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου και κυρίως το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
- LTE (Long Term Evolution): Αποτελεί εξέλιξη των 3G τεχνολογιών, βασισμένο στις τεχνολογίες GSM/EDGE και UMTS. Επιτρέπει μεταδόσεις υψηλών ταχυτήτων σε εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας και η αναβαθμισμένη έκδοση LTE-Advanced θεωρείται τεχνολογία τέταρτης γενιάς (4G).

Συγκεντρωτικά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των παραπάνω ασύρματων τεχνολογιών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Τεχνολογία	Εύρος Ζώνης	Εμβέλεια	Ρυθμός μετάδοσης	Εφαρμογές
WiFi	2.4/5 GHz	<250 m	<600 Mbps	HAN, NAN
WiMAX	2.3/2.5/3.5 GHz	<50 km	70 Mbps	NAN, WAN, AMI
Zigbee	2.4 GHz/784-915 MHz)	100 m	250 kbps	HAN, AMI
RF	3 kHz-300 GHz	60 km	100 Mbps	WAN
Bluetooth	2.4-2.485 GHz	<100 m	<24 Mbps	HAN
GSM	0.9/1.8 GHz	<35 km	9.6 kbps	NAN, WAN, AMI, Demand Response
GPRS			<114 kbps	
EDGE			240 kbps	
UMTS			0.384-2 Mbps	
LTE	0.7/0.8/1.9/2.5 GHz	<100 km	<100 Mbps	

Πίνακας 2.4 Σύγκριση ασύρματων τεχνολογιών επικοινωνίας

2.4.2.2 Ενσύρματες τεχνολογίες επικοινωνίας

Οι τεχνολογίες αυτές αφορούν στη μετάδοση δεδομένων μέσω καλωδιώσεων. Παραμένουν δημοφιλείς παρά την πρακτική υπεροχή των ασύρματων τεχνολογιών, καθώς θεωρούνται πιο σταθερές (ασφαλείς σε παρεμβολές, σχετικά ανεξάρτητες των καιρικών συνθηκών, μη εξαρτημένες από μπαταρίες ή άλλες πηγές). Η προφανής αδυναμία τους έγκειται στις δυσκολίες, οικονομικές και μη, που προκύπτουν από την εγκατάσταση και συντήρηση των υποδομών και των διασυνδέσεών τους. Οι επικρατέστερες ασύρματες τεχνολογίες είναι οι εξής:

- DSL (Digital Subscriber Line): Αποτελεί την πλέον διαδεδομένη ενσύρματη τεχνολογία πρόσβασης στο διαδίκτυο σε σταθερά δίκτυα (όπως τα οικιακά). Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη μετάδοση δεδομένων μέσω των χάλκινων καλωδίων των τηλεφωνικών γραμμών αξιοποιώντας υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Η συχνότερη DSL εφαρμογή είναι η ADSL (Asymmetric DSL), την οποία χαρακτηρίζει η

ασυμμετρία στην ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων – ταχύτερη από τον πάροχο στο χρήστη (download) και βραδύτερη από το χρήστη στον πάροχο (upload). Τελευταία, αντικαθίσταται σταδιακά από τη VDSL (Very-high-bit-rate DSL), η οποία εξασφαλίζει αισθητά υψηλότερες ταχύτητες και προσπαθεί να εξαλείψει την ασυμμετρία, περιορίζεται όμως από την απόσταση και τη χρήση οπτικών ινών.

- Οπτικές Ίνες (Optical Fibers): Πρόκειται για μια τεχνολογία που βασίζεται στη μετάδοση δεδομένων μέσω γυάλινων/πλαστικών ινών εξαιρετικά μικρής διαμέτρου μέσω της διάδοσης φωτός κατά μήκος τους. Επιτυγχάνουν εξαιρετικούς ρυθμούς μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις και επιπρόσθετα είναι εξαιρετικά ανθεκτικές σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, στοιχεία που τις καθιστούν ανώτερες των συμβατικών καλωδίων. Με την πάροδο του χρόνου, και την ολοένα αυξανόμενη χρήση τους, το κόστος της τεχνολογίας αυτής έχει πάψει να είναι απαγορευτικό.
- PLC (Power Line Communication): Η τεχνολογία αυτή αξιοποιεί τις υπάρχουσες καλωδιώσεις με τρόπο παρόμοιο με τη DSL, με τη διαφορά πως εκμεταλλεύεται τις γραμμές μεταφοράς ισχύος των ηλεκτρικών δικτύων για τη μετάδοση των ψηφιακών δεδομένων. Αξιοποιείται σε εφαρμογές αυτοματοποίησης δικτύου και σύνδεσης στο διαδίκτυο αλλά λόγω της φύσης της είναι μια τεχνολογία ευαίσθητη σε παρεμβολές. Μια πολύ διαδεδομένη εφαρμογή της PLC τεχνολογίας, είναι το Homeplug, αξιοποιώντας οικιακές καλωδιώσεις με ποικίλλες χρήσεις σε δίκτυα επιπέδου HAN ενώ πολύ σύνηθης είναι και η τεχνολογία BPL (Broadband over Power Lines), η οποία αξιοποιεί τις δημόσιες ηλεκτρικές καλωδιώσεις για γρηγορότερη μετάδοση δεδομένων σε ευρύτερη κλίμακα.

Συγκεντρωτικά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ενσύρματων τεχνολογιών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Τεχνολογία		Εύρος ζώνης	Εμβέλεια	Ρυθμός μετάδοσης	Εφαρμογές
DSL	ADSL	26-138 kHz (UL) 138-1104 kHz(DL)	-	<9 Mbps (DL) <640 Kbps (UL)	NAN
	VDSL	25kHz-12MHz	-	< 100 Mbps	NAN,WAN
Οπτικές ίνες		< 3*10 ⁸ GHz	< 2 km	100 Mbps /1 Gbps	WAN, backhaul
PLC	Homeplug	2-86 MHz	< 300 m	80/200 Mbps	HAN,NAN
	BPL	1.7-30 MHz	-	< 500 Mbps	NAN,WAN

Πίνακας 2.5 Σύγκριση ενσύρματων τεχνολογιών επικοινωνίας

2.4.3 Ειδικά πρωτόκολλα επικοινωνίας του ΕΗΔ

Υπάρχει πληθώρα εφαρμογών και τεχνολογικών συστημάτων που έχουν ήδη αναπτυχθεί ή βρίσκονται υπό ανάπτυξη με σκοπό την ενσωμάτωση στα ΕΗΔ. Ένα σοβαρό όμως πρόβλημα που παρακωλύει σε ένα βαθμό την ευρεία χρήση τους, έγκειται στην απουσία καθολικά αποδεκτών πρωτοκόλλων που θα επιτρέψουν την πλήρη ενσωμάτωση των τεχνολογιών αυτών και τη μεταξύ τους λειτουργικότητα, και αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση για όσους οραματίζονται την ανάπτυξη των ΕΗΔ. Οι διεθνείς οργανισμοί, κινούνται προς αυτή την κατεύθυνση και βρίσκονται στη διαδικασία προτυποποίησης της επικοινωνίας του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, εισηγούμενοι καθολικά ενοποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Τα πρότυπα αυτά, ως επί το πλείστον βασίζονται και αποτελούν εξέλιξη ήδη υπάρχοντων πρωτοκόλλων με εφαρμογές σε συστήματα αυτοματισμού [18].

Τα σημαντικότερα από αυτά είναι:

- Common Information Model (CIM): Ένα πλαίσιο βασικών πρωτοκόλλων για την ενοποίηση διαφόρων συστημάτων διαχείρισης πληροφοριών εντός του ΕΗΔ. Το πρότυπο IEC 61970 αναφέρεται στον τομέα της μεταφοράς ενώ το IEC 61969 στον τομέα της διανομής. Βρίσκει εφαρμογές σε συστήματα AMI, DA, DR, Energy Storage, Energy/Distribution Management Systems (EMS/DMS).
- IEC 61850: Αφορά την επικοινωνία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και των υποσταθμών σε όλα τα επίπεδα, ενσωματώνοντας τα συστήματα Substation Automation στο CIM. Εφαρμογές του πρωτοκόλλου: DA, Substation Automation (SA), AMI, EMS, DMS.
- Open Automated Demand Response (OpenADR): Αφορά κυρίως σε αυτοματοποιημένες εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας καθώς εστιάζει στην παροχή πληροφοριών τιμολόγησης και ελέγχου του φορτίου. Η βασική χρήση του είναι σε συστήματα Demand Response.
- IEC 62351: Πρόκειται για ένα πλαίσιο από πρωτόκολλα που αφορούν στην προστασία του δικτύου και την ασφάλεια μεταφοράς δεδομένων. Βρίσκει εφαρμογή στις περισσότερες εκφάνσεις του ΕΗΔ, σε συστήματα EMS, DMS, AMI, DR, SA, DA και σε επίπεδο HAN.
- ANSI C12.18/C12.19 και IEC 62056: Πρόκειται για πρωτόκολλα ειδικά σχεδιασμένα προκειμένου να εξυπηρετούν την αμφίδρομη μεταφορά των μετρητικών δεδομένων στα συστήματα AMI. Σχετίζονται με εφαρμογές τιμολόγησης, ζήτησης φορτίου, DR, Energy Storage, HAN.
- IEC 61400-25: Μία ομάδα πρωτοκόλλων που αναφέρονται στον έλεγχο και την εποπτεία ανεμογεννητριών και στα συστήματα επικοινωνίας του αιολικού πάρκου με το ΕΗΔ. Βρίσκουν κυρίως εφαρμογή σε συστήματα EMS, DMS και Distributed Energy Resources (DER).

Κεφάλαιο 3: 3G Δίκτυα – Το πρωτόκολλο UMTS

3.1 Ιστορική αναδρομή

Ο τομέας των τηλεπικοινωνιών και ειδικότερα της κινητής τηλεφωνίας βρίσκεται σε καλπάζουσα ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες. Η ανάγκη για πρόσβαση σε ασύρματη επικοινωνία οπουδήποτε και οποτεδήποτε, σε συνδυασμό με τον ολοένα αυξανόμενο αριθμό συνδρομητών, έχει δρομολογήσει σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις στις υποδομές και τον εξοπλισμό των δικτύων. Από την εποχή των σταθερών τηλεφωνικών γραμμών και των πρώτων κυψελωτών δικτύων (cellular networks), έχουν γίνει πολλά και σημαντικά βήματα για να φτάσουμε στη σύγχρονη ψηφιακή εποχή που εστιάζει στην παροχή πακέτων υπηρεσιών που συγχωνεύουν υπηρεσίες φωνής, πολυμέσων και μετάδοσης δεδομένων σε εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες. Η τεράστια πρόκληση για τις εταιρείες τηλεπικοινωνιών είναι η ανάπτυξη τεχνολογιών γρήγορης και αξιόπιστης διασύνδεσης, αξιοποιώντας την παρουσία των ανεξάντλητων υπηρεσιών διαδικτύου και των εμπειριών που προσφέρουν στο συνδρομητή [19].

Αν θέλει κανείς να ορίσει το σημείο καμπής στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών, την τεχνολογία εκείνη που έφερε την επανάσταση στο χώρο, τότε πρέπει να αναφερθεί στην ενσωμάτωση υπηρεσιών κυψελωτών δικτύων στην κινητή τηλεφωνία. Τα κυψελοειδή δίκτυα εισάγουν τις εξής καινοτομίες: i) χρησιμοποιούν ένα αυστηρά συγκεκριμένο και αδειοδοτημένο κομμάτι του φάσματος συχνοτήτων για αποκλειστική χρήση από τις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, ii) αξιοποιούν τη δυνατότητα ραδιοκάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών, χωρίζοντας τις σε περιοχές-κελιά (εξαγωνικά), καθένα από τα οποία χρησιμοποιεί συγκεκριμένες, μη επικαλυπτόμενες συχνότητες αλλά όχι απαραίτητα διαφορετικές. Το κυψελωτό δίκτυο διαθέτει λοιπόν τη δυνατότητα εξυπηρέτησης μεγάλου αριθμού χρηστών, χωρίς να απαιτεί μεγάλο εύρος φάσματος καθώς αξιοποιεί την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Οι τεχνολογίες αυτές, διαθέτουν πλέον μια μακρά διαδρομή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και ο διαχωρισμός τους γίνεται σε γενιές τεχνολογιών, με την κάθε μια να έχει να επιδείξει υψηλότερες ταχύτητες και βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τις προηγούμενες. Σήμερα, η πιο σύγχρονη τεχνολογία θεωρούνται τα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) αλλά σταδιακά δρομολογείται η μετάβαση προς τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G).

Η πρώτη γενιά κυψελωτών δικτύων (1G) εμφανίστηκε στην αγορά περίπου στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και χρησιμοποιούσε αναλογική μετάδοση για να υποστηρίξει φωνητικές υπηρεσίες μέσω τεχνικών διαμόρφωσης συχνότητας. Τα πιο δημοφιλή αναλογικά συστήματα για υλοποιήσεις 1G δικτύων ήταν τα ευρωπαϊκά NMT (Nordic Mobile Telephones) και TACS (Total Access Communication Systems), με το αμερικανικό AMPS (Advanced Mobile Phone System) να ακολουθεί λίγο αργότερα. Τα συστήματα αυτά,

υποστήριζαν μεταδόσεις με ταχύτητες έως 2.4 kbps, παρείχαν στο χρήστη βασικές δυνατότητες κινητικότητας αλλά διέθεταν τα τεράστια μειονεκτήματα της μεταξύ τους ασυμβατότητας (σε επίπεδο εθνικών δικτύων) και της μη αποδοτικής διαχείρισης του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων λόγω της αρχής λειτουργίας τους.

Λίγα χρόνια αργότερα, στα τέλη της δεκαετίας τους 1980, παρουσιάζονται τα *δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (2G)* τα οποία παρουσιάζουν δύο ιδιαίτερα σημαντικές διαφοροποιήσεις από τον προκάτοχό τους. Η πρώτη αφορά στο πρόβλημα ασυμβατότητας των δικτύων καθώς τα 2G δίκτυα προσέφεραν αναβαθμισμένες υπηρεσίες περιαγωγής (roaming). Το πρότυπο GSM (Global System for Mobile communications) αρχικά αναπτύχθηκε προς αυτή την κατεύθυνση χρησιμοποιούμενο ευρέως στην Ευρώπη, έπειτα στην Ασία και στη συνέχεια σε ολόκληρο τον κόσμο, καταλήγοντας να καθιερωθεί ως το επικρατέστερο ενοποιημένο διεθνές πρωτόκολλο. Η δεύτερη σημαντική διαφοροποίηση αφορά στην ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών πολλαπλής πρόσβασης, κυρίως χρονικής διαίρεσης TDMA (Time Division Multiple Access) ή διαίρεσης κώδικα CDMA (Code Division Multiple Access). Τα 2G ψηφιακά συστήματα υποστήριζαν τόσο υπηρεσίες φωνής όσο και μετάδοσης δεδομένων σχετικά χαμηλής ποιότητας σε ικανοποιητικές ταχύτητες κοντά στα 10 kbps και σύντομα εισήγαγαν εφαρμογές μηνυμάτων κειμένου (SMS – Short Message Service), οι οποίες όμως αύξησαν τις λειτουργικές απαιτήσεις. Η χρήση τεχνολογιών HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), οι οποίες βασίζονταν σε τεχνικές άθροισης GSM καναλιών, κατάφερε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις αυτές αναφορικά με την ταχύτητα αλλά περιορίσε αισθητά το διαθέσιμο εύρος ζώνης, το οποίο αποτελούσε ιδιαίτερα σημαντικό πόρο για τις εταιρείες τηλεπικοινωνίας.

Οι αναβαθμίσεις που γίνονται τα επόμενα χρόνια, σηματοδοτούν το στάδιο μετάβασης από τα δίκτυα δεύτερης στα δίκτυα τρίτης γενιάς και συχνά αναφέρονται ως δίκτυα 2.5G και 2.75G. Το πρώτο βήμα γίνεται με την ανάπτυξη του προτύπου GPRS (General Packet Radio Service), το οποίο εισάγει την τεχνική μεταγωγής πακέτου (packet switching) επιτρέποντας τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου μέσω της ευέλικτης διαχείρισης των δεδομένων σε πακέτα. Οι τεχνολογίες GPRS παρέχουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 150 kbps, υψηλότερη ποιότητα διασύνδεσης και τη δυνατότητα χρέωσης ανάλογη του όγκου δεδομένων και όχι της διάρκειας σύνδεσης. Το GPRS αποτελεί αναβάθμιση της υπάρχουσας δομής δικτύου GSM και όχι μια αυτόνομη τεχνολογία και θεωρείται το ενοποιημένο πρότυπο που αναφέρεται στα δίκτυα 2.5G. Μια περαιτέρω αναβάθμιση της GSM τεχνολογίας αποτέλεσε το πρότυπο EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) και συνηθίζεται τα δίκτυα δεύτερης γενιάς με εφαρμογές EDGE να αναφέρονται ως δίκτυα 2.75G. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας αυτής σε ένα GSM δίκτυο είναι σχετικά ανώδυνη και οικονομική καθώς δεν απαιτεί ιδιαίτερες αλλαγές σε εξοπλισμό, λογισμικό και τεχνικά χαρακτηριστικά αλλά επιτυγχάνει εντυπωσιακή διαφορά σε ταχύτητες μετάδοσης, αγγίζοντας τα 400 kbps. Οι τεχνολογίες 2G, 2.5G και 2.75G έχουν καταφέρει να παραμείνουν εξαιρετικά δημοφιλείς επιλογές έως σήμερα, παρά την εμφάνιση πιο σύγχρονων και πιο αποδοτικών τεχνολογιών γιατί παρέχουν ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσιών σε ένα επιτρεπτό κόστος και ως εκ τούτου πολύ συχνά προτιμώνται για τεχνικοοικονομικούς λόγους.

Η μετάβαση από τον 20^ο στον 21^ο αιώνα, σηματοδοτεί και τη μετάβαση από τα 2G δίκτυα στα *δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς (3G)*. Τα 3G δίκτυα αναπτύχθηκαν με σκοπό να παρέχουν υπηρεσίες ανεξάρτητα από την τεχνολογική πλατφόρμα στην οποία λειτουργούν, διαμορφώνοντας ένα διεθνώς κοινό πρότυπο σχεδιασμού δικτύου. Τα πρότυπα των τεχνολογιών τρίτης γενιάς οφείλουν να πληρούν τις προϋποθέσεις που αναφέρει το πρωτόκολλο IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000), όπως τις όρισε η ITU (International Telecommunications Union). Μεταξύ των προϋποθέσεων αυτών, ορίζεται και ένα ελάχιστο όριο ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στα 200 kbps (peak data rate), χαρακτηριστικό των εξαιρετικών τεχνικών χαρακτηριστικών που διαθέτουν οι 3G τεχνολογίες. Από το 2001 που πρωτοεμφανίστηκε και έπειτα, το σύστημα UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) θεωρείται η επικρατούσα 3G τεχνολογία. Αποτελεί εξέλιξη του GSM προτύπου και αξιοποιεί την εναέρια τεχνολογική πλατφόρμα W-CDMA (Wideband-Code Division Multiple Access), επιτρέποντας στο χρήστη ταχύτητες 144 kbps (όταν βρίσκεται σε κινούμενο οχήμα), 384 kbps (όταν περπατάει πεζός), ακόμα και 2 Mbps (σε εσωτερικούς χώρους). Κάποιες ακόμη σημαντικές αναβαθμίσεις από τα 2G δίκτυα είναι η ικανότητα παροχής υπηρεσιών πολυμέσων (βίντεο κλήση, διαδικτυακές πλατφόρμες κ.α) και δορυφορικών συνδέσεων (GPS - Global Positioning System), υπηρεσιών περιαγωγής παγκοσμίως και ταχύτατης περιήγησης στο διαδίκτυο. Οι ταχύτητες μετάδοσης των 3G δικτύων βελτιώθηκαν περαιτέρω τα επόμενα χρόνια, με την εμφάνιση πρωτοκόλλων όπως το HSPA (High Speed Packet Access) που επεκτείνει και αναβαθμίζει την απόδοση δικτύων που βασίζονται στην W-CDMA και θεωρείται τεχνολογία 3.5G. Η μεταγενέστερη έκδοση του, το HSPA+ (Enhanced HSPA) υιοθετεί τεχνολογίες διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) πολλαπλών κεραιών και βρίσκει εφαρμογές σε 3G δίκτυα πλησιάζοντας ταχύτητες τέταρτης γενιάς (3.75G δίκτυα). Οι τεχνολογίες 3.5G και 3.75G έχουν θεωρητικά δυνατότητα ρυθμών μετάδοσης της τάξης των δεκάδων ή εκατοντάδων Mbps.

Φτάνοντας στο σήμερα, η πλέον αναπτυσσόμενη τεχνολογία στο χώρο των τηλεπικοινωνιών, είναι τα *δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G)*. Η σημαντικότερη καινοτομία που εισάγουν τα 4G συστήματα έγκειται στη χρήση αποκλειστικά IP (Internet Protocol) τεχνολογιών με σκοπό τη δημιουργία μιας πλατφόρμας που θα περιέχει όλες τις διαθέσιμες εφαρμογές ασύρματης κινητής τηλεφωνίας και θα είναι πλήρως διαλειτουργική. Ενσωματώνουν προχωρημένες τεχνικές διαμόρφωσης όπως η OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) και εξοπλισμό με κατευθυνόμενες «έξυπνες» κεραιές. Προς το παρόν, δεν υπάρχει κάποια τεχνολογία που να έχει προτυποποιηθεί διεθνώς ως τεχνολογία 4G, έχοντας επιτύχει τις ταχύτητες που θέτουν οι διεθνείς οργανισμοί σαν όριο. Ο επικρατέστερος υποψήφιος είναι το πρότυπο LTE (Long Term Evolution) που αποτελεί διάδοχο του UMTS [19].

Όπως φανερώνει η πορεία εξέλιξης των κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας, οι ερευνητές και οι βιομηχανίες στην προσπάθειά τους να ανταποκριθούν στις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις επικοινωνίας, αντιμετωπίζουν μια βασική πρόκληση και εστιάζουν την ανάπτυξη των σύγχρονων συστημάτων προς αυτή την κατεύθυνση: την ενσωμάτωση όλων των υπαρκτών τεχνολογιών σε ένα ενοποιημένο παγκόσμιο πρότυπο.

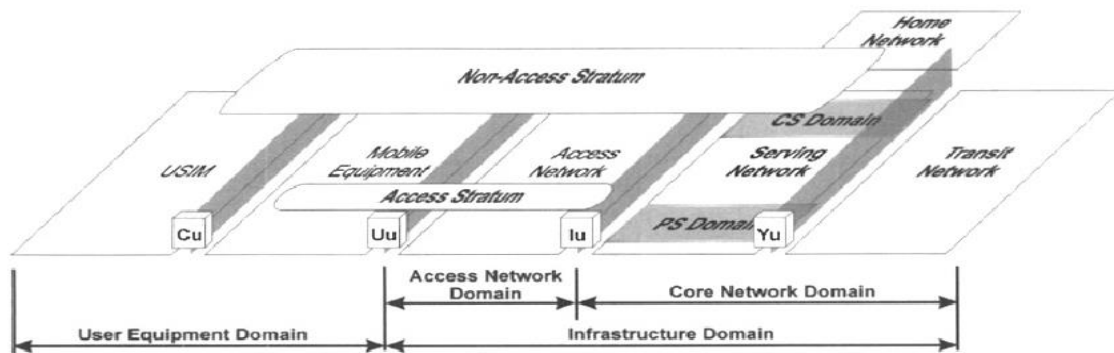
	1G	2G	3G	4G
Μετάδοση	Αναλογική	Ψηφιακή	Ψηφιακή	Ψηφιακή
Υπηρεσίες	Φωνή	Φωνή, Δεδομένα	Φωνή, Δεδομένα, Πολυμέσα	Φωνή, Δεδομένα, Πολυμέσα
Μεταγωγή	Circuit switched	Circuit & Packet switched	Κυρίως Packet switched	Packet switched
Ταχύτητα	< 2.4 kbps	≈ 10 kbps (<400kbps 2.75G)	200 kbps - Mbps	100 Mbps - Gbps

Πίνακας 3.1 Η εξέλιξη των κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας

3.2 Αρχιτεκτονική δικτύου UMTS

Αν θέλει κανείς να αναφερθεί στην αρχιτεκτονική δομή ενός δικτύου UMTS, θα ήταν καλό να διαχωρίσει το δομικό μοντέλο σε υποσυστήματα, ανάλογα με την αναλυτική προσέγγιση που επιλέγει. Όσον αφορά το επίπεδο φυσικών δομικών στοιχείων (εξοπλισμού) και των μεταξύ τους διασυνδέσεων, γίνεται αναφορά στην έννοια των περιοχών (domains) του δικτύου. Μία σαφής διαφοροποίηση που υπάρχει και σχετίζεται με τη φύση της διακίνησης δεδομένων διαχωρίζει το 3G δίκτυο στις περιοχές μεταγωγής πακέτου (packet-switched domains) και στις περιοχές μεταγωγής κυκλώματος (circuit-switched domains). Διαχωρισμός του δικτύου σε domains, πραγματοποιείται επίσης εξετάζοντας τα δομικά στοιχεία που το αποτελούν και πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται δύο κύριες περιοχές: η περιοχή υποδομής (Infrastructure domain) και η περιοχή εξοπλισμού χρήστη (User Equipment domain - UE). Η περιοχή υποδομής διακρίνεται με τη σειρά της σε δύο υποπεριοχές: την περιοχή κεντρικού δικτύου (Core Network domain – CN) και την περιοχή δικτύου πρόσβασης (Access Network domain), η οποία συγκεκριμένα για δίκτυα UMTS με τεχνολογίες W-CDMA, αναφέρεται ως UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network). Η επόμενη μοντελοποίηση γίνεται σε επίπεδο δομής πρωτοκόλλων και των λειτουργικών διαδικασιών που προβλέπουν. Στη δομική αυτή προσέγγιση, γίνεται αναφορά στην έννοια των στρωμάτων (strata) και ο διαχωρισμός γίνεται και πάλι σε δύο επίπεδα, στο στρώμα πρόσβασης (access stratum) και στο στρώμα μη πρόσβασης (non-access stratum). Ο όρος stratum αναφέρεται στη διαδικασία ομαδοποίησης όλων των σχετικών με ένα είδος υπηρεσίας που παρέχουν μία ή περισσότερες domains, πρωτοκόλλων. Έτσι, το στρώμα πρόσβασης περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα που διαχειρίζονται διεργασίες μεταξύ της περιοχής UE και του δικτύου πρόσβασης, συνήθως σχετικές με τις διαδικασίες σύνδεσης στο δίκτυο, ενώ το στρώμα μη πρόσβασης περιλαμβάνει πρωτόκολλα επιφορτωμένα με την επικοινωνία UE και κεντρικού δικτύου (CN) σχετικά με διαδικασίες που αφορούν το εσωτερικό του δικτύου [20].

Αρκετά βοηθητικό στην οπτικοποίηση της γενικής δομής του UMTS δικτύου και στην κατανόηση της διασύνδεσης μεταξύ των στρωμάτων και των περιοχών του, είναι το παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση αρχιτεκτονικής δομής 3G δικτύου

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η περιοχή του κεντρικού δικτύου (CN) περιλαμβάνει τρία τμήματα υποδικτύων: το δίκτυο εξυπηρέτησης (Serving Network), το δίκτυο διαμετακόμισης (Transit Network) και το κύριο δίκτυο (Home Network). Το δίκτυο εξυπηρέτησης είναι εκείνο που παρέχει στο χρήστη τις απαραίτητες υπηρεσίες του CN, για το λόγο αυτό έχει πρόσβαση σε Packet Switched/Circuit Switched εφαρμογές και επικοινωνεί αμφίδρομα με το δίκτυο πρόσβασης σε επίπεδο ανταλλαγής πληροφοριών. Το δίκτυο διαμετακόμισης επωμίζεται τις διαδικασίες επικοινωνίας του δικτύου εξυπηρέτησης με κάποιο απομακρυσμένο σημείο (με τον όρο απομακρυσμένο εννοείται το σημείο που βρίσκεται εκτός του δικτύου του εξυπηρετούμενου UE). Τέλος, το κύριο δίκτυο εκτελεί λειτουργίες που αφορούν τη διαχείριση συνδρομών ή τις πληροφορίες ασφαλείας για κάθε χρήστη συνδεδεμένο στο δίκτυο. Είναι προφανές λοιπόν, πως το CN και τα υποδίκτυά του είναι επιφορτωμένα με τη βέλτιστη διαχείριση των εσωτερικών διεργασιών και την εκτέλεση λειτουργιών που δε σχετίζονται με τεχνολογίες πρόσβασης. Η περιοχή εκείνη που ασχολείται με τις διαδικασίες πρόσβασης των τερματικών χρηστών UE στο κυρίως UMTS δίκτυο και τις υπηρεσίες του, είναι το δίκτυο πρόσβασης.

Ο διαμοιρασμός των εργασιών εντός του δικτύου και οι πολλαπλές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε μια πληθώρα περιοχών και στρωμάτων, προσδίδουν στο UMTS την ευελιξία που απαιτείται ώστε να είναι σε θέση να εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό χρηστών, παρέχοντας υπηρεσίες υψηλής ποιότητας και το σημαντικότερο όλων, να επιτρέπει εύκολα και αξιόπιστα την πρόσβαση διαφορετικών τεχνολογιών στα δίκτυά του.

3.2.1 Κυψελοειδής δομή

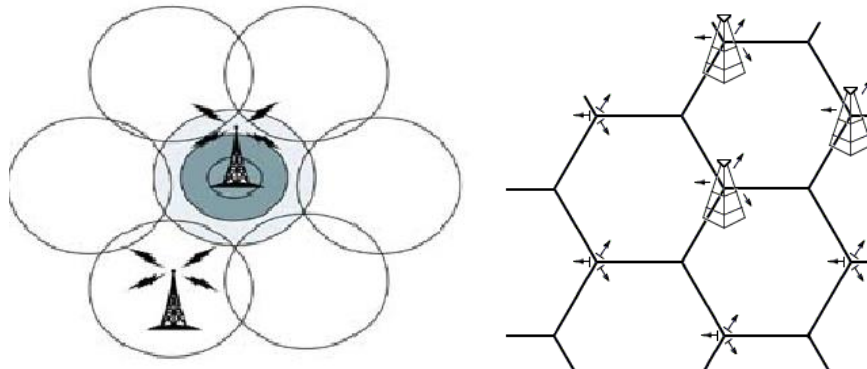
Μία από τις βασικές προκλήσεις για τις εταιρείες τηλεπικοινωνίες τις περασμένες δεκαετίες, αποτελούσε η επίλυση του ζητήματος της χωρητικότητας του δικτύου. Δεδομένου ότι το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων είναι ένας πόρος αυστηρά καθορισμένος και περιορισμένος που αποτελεί παραδοσιακά τροχοπέδη για τις τεχνολογίες αυτές, η βέλτιστη αξιοποίησή του ήταν ανέκαθεν βασική προτεραιότητα. Οι παλαιότερες τεχνολογίες μετάδοσης αντιμετώπιζαν προβλήματα τόσο με την απόσταση, η οποία επηρέαζε σημαντικά την ποιότητα του σήματος, όσο και με την εξυπηρέτηση των χρηστών καθότι περιορισμένος αριθμός καναλιών σήματος σήμαινε και περιορισμένη δυνατότητα χρήσης.

Σε αυτά ακριβώς τα ζητήματα εστίασε και προσπάθησε να τα επιλύσει, η τεχνολογία των κυψελωτών δικτύων. Η βασική ιδέα στηρίζεται στη διαίρεση μιας μεγάλης γεωγραφικής περιοχής σε πολλές μικρότερες περιοχές που ονομάζονται κυψέλες (ή κελιά – cells), καθεμία ελεγχόμενη από ένα σταθμό βάσης (base station), ο οποίος επιτρέπει στον εξυπηρετούμενο χρήστη τη σύνδεση στο δίκτυο. Οι σταθμοί βάσης δύο γειτονικών κελιών εκπέμπουν σε διαφορετικές συχνότητες για να μην υπάρχουν επικαλύψεις σήματος και παρεμβολές. Δυο κελιά όμως που δεν είναι γειτονικά, μπορούν να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα και εκεί έγκειται η καινοτομία της τεχνικής επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων που εισήγαγαν τα κυψελωτά δίκτυα. Έτσι, αν μια κλήση απαιτεί τη χρήση συχνότητας που χρησιμοποιείται ήδη από τον κοντινότερο σταθμό βάσης, αναζητείται μέσω διαδικασιών εντοπισμού (locating) ο καταλληλότερος σταθμός βάσης με την ίδια συχνότητα διαθέσιμη και η κλήση παραπέμπεται σε αυτόν.

Στα πλαίσια του σχεδιασμού του κυψελωτού δικτύου, τίθεται το ζήτημα ορισμού του μεγέθους των κελιών. Η εμβέλεια του σταθμού βάσης και η ισχύς εκπομπής των κεραιών του, είναι παράμετροι προκαθορισμένες και αμετάβλητες και είναι αυτές που πρωταρχικά ορίζουν τις δυνατότητες επιλογής μεγέθους. Από εκεί και έπειτα, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των κυψελών, τόσο πιο αποδοτικά αξιοποιείται το φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων, αλλά ταυτόχρονα απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός σταθμών βάσης για μια δεδομένη περιοχή. Αφήνεται στην κρίση του σχεδιαστή του δικτύου, η επιλογή της ισορροπίας ανάμεσα σε αποδοτικότητα και κόστος.

Οι πρώτοι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούσαν ισοτροπικές κεραιές, οι οποίες θεωρητικά εκπέμπουν ομοιόμορφα σε μια συγκεκριμένη ακτίνα γύρω τους, δημιουργώντας μια κυκλική περιοχή κάλυψης. Τα κυκλικά σχήματα είναι όμως δύσκολα διαχειρίσιμα καθώς είτε εφάπτονται αφήνοντας ακάλυπτες περιοχές είτε επικαλύπτονται δημιουργώντας παρεμβολές. Καθίστανται ως εκ τούτου ακατάλληλα για χρήση σε αστικά περιβάλλοντα που υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις εξυπηρέτησης. Σταδιακά, η ανάπτυξη των σταθμών βάσης οδήγησε στην καθιέρωση χρήσης κατευθυντικών κεραιών με αποτέλεσμα τα κελιά που δημιουργούνται να προσομοιάζουν εξάγωνα [20]. Ο πιο διαδεδομένος τύπος σταθμού βάσης χρησιμοποιεί 3 κατευθυντικές κεραιές, με την καθεμία να καλύπτει μια περιοχή 120° χωρίζοντας την περιοχή κάλυψης του σταθμού σε 3 τομείς (sectors) και να εκπέμπει κατ' αυτό τον τρόπο σε τρία διαφορετικά κελιά με τρεις

διαφορετικές συχνότητες. Η επιθυμητή δομή του δικτύου επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση τριών τέτοιων σταθμών στις κορυφές τριών μη διαδοχικών γωνιών του ίδιου εξαγωνικού κελιού.



Εικόνα 3.2 Δίκτυα σταθμών βάσης με i) ιστροπικές (αριστερά) και ii) κατευθυντικές (δεξιά) κεραιές

Με τον τρόπο αυτό, παρέχεται ευελιξία αναφορικά με την κατασκευή του δικτύου καθώς τα μεγέθη των κελιών είναι διαχειρίσιμα και μεταβλητά. Στην πράξη φυσικά οι περιοχές κάλυψης δε σχηματίζουν τέλεια σχήματα, λόγω της ύπαρξης φυσικών (λόφοι) ή τεχνητών (κτήρια) εμποδίων αλλά ο σχεδιασμός των δικτύων κατ' αυτόν τον τρόπο είναι προσομοιωτικός και προσεγγιστικός. Η χρήση κατευθυντικών κεραιών συνηθίζεται στα αστικά περιβάλλοντα, με τα κελιά να είναι μικρά σε μέγεθος, πολλά σε αριθμό και πυκνά τοποθετημένα στις πυκνοκατοικημένες περιοχές, μεγαλύτερα και λιγότερα στις πιο αραιοκατοικημένες. Ισοτροπικές κεραιές πλέον χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιβάλλοντα με λίγα εμπόδια, κυρίως στην ύπαιθρο.

Σημαντική πρόκληση για τους σχεδιαστές των κυψελωτών δικτύων αποτελεί ακόμη, η διαχείριση ζητημάτων κινητικότητας των χρηστών εντός του δικτύου. Στην περίπτωση ενός χρήστη ο οποίος κατά τη διεξαγωγή μιας κλήσης του, μετακινείται από ένα κελί σε κάποιο γειτονικό του, πρέπει να θεωρείται δεδομένο πως η κλήση ούτε θα διακοπεί, ούτε θα επηρεαστεί σε ποιότητα. Οι διαδικασίες αυτόματης αλλαγής συχνοτήτων και σύνδεσης του κινούμενου χρήστη με τον κατάλληλο σταθμό βάσης, αναφέρονται συχνά με τον όρο *handover* και αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό λειτουργίας των κυψελωτών δικτύων. Σε μια τέτοια μετάβαση από ένα σταθμό βάσης σε κάποιον άλλο, η διαδικασία κατά την οποία το χρησιμοποιούμενο κανάλι αποδεσμεύεται προτού δεσμευτεί το καινούριο κανάλι, αναφέρεται ως *hard handover*, ενώ η κατάσταση παράλληλης χρήσης δύο (ή περισσότερων) καναλιών περιγράφεται ως *soft handover*. Και οι δύο τεχνικές χρησιμοποιούνται στα UMTS δίκτυα αναλόγως των περιστάσεων, με το *soft handover* να δεσμεύει μεν περισσότερους πόρους του δικτύου αλλά να παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία στη μετάβαση.

3.2.2 Εξοπλισμός Χρήστη - User Equipment (UE)

Η περιοχή του UE ουσιαστικά αποτελεί το τερματικό των δικτύων UMTS και το στοιχείο εκείνο του δικτύου που είναι πιο προσβάσιμο στο χρήστη. Είναι το σύστημα συσκευών, εφαρμογών και πρωτοκόλλων που χρησιμοποιείται για την πρόσβαση των συνδρομητών στις υπηρεσίες του δικτύου. Παλαιότερα, δεν υπήρχε ανάγκη χρήσης του όρου UE, καθώς η τερματική συσκευή του χρήστη συνήθως ήταν ένα κινητό τηλέφωνο. Πλέον όμως, με τις λειτουργικές δυνατότητες των δικτύων αισθητά αναβαθμισμένες, ο όρος UE καθιερώθηκε για την περιγραφή ενός συστήματος που μπορεί να εξυπηρετήσει από ένα απλό κινητό τηλέφωνο μέχρι ένα τερματικό δεδομένων και πληθώρα άλλων συσκευών. Παρολαυτά, δεν είναι σωστή η ταύτιση του όρου με τη συσκευή που αποτελεί την πλατφόρμα διασύνδεσης με το χρήστη, η οποία ναι μεν ανήκει στον UE, αλλά είναι μόνο η κορυφή του παγόβουνου ενός κολοσσιαίου σύνθετου συστήματος. Ο UE συνδέει το χρήστη με το κυρίως δίκτυο UMTS μέσω της διεπαφής με το δίκτυο πρόσβασης, διατηρώντας αμφίδρομη επικοινωνία με τους σταθμούς βάσης. Οι κύριες αρμοδιότητές του ως προς το κύριο δίκτυο είναι ο έλεγχος των κλήσεων, η διαχείριση της διεκπεραίωσής τους, ζητήματα που αφορούν τις διαδικασίες ταυτοποίησης καθώς και τα ζητήματα κινητικότητας χρήστη εντός δικτύου.

Ο εξοπλισμός χρήστη αποτελείται από τον Κινητό Εξοπλισμό (Mobile Equipment - ME), τον Τερματικό Εξοπλισμό (Terminal Equipment – TE) και την Μονάδα Παγκόσμιας Ταυτότητας Συνδρομητή (Universal Subscriber Identity Module - USIM). Η USIM πρόκειται για ένα λογικό κύκλωμα, ενσωματωμένο σε μια κάρτα που χρησιμοποιείται από τις κινητές συσκευές για τη σύνδεσή τους στο δίκτυο. Έχει ομοιότητες με την κάρτα SIM των GSM δικτύων, αλλά αποτελεί αναβάθμισή της παρέχοντας αυξημένη χωρητικότητα και πιο αξιόπιστες διαδικασίες κωδικοποίησης. Η ταυτοποίηση του χρήστη κατά τη σύνδεση γίνεται μέσω των αριθμών IMSI (International Mobile Subscriber Identity) και MSISDN (Mobile Station Integrated Services Digital Network) προκειμένου να αποκτήσει πρόσβαση στις υπηρεσίες του παρόχου. Ο TE είναι το κομμάτι εκείνο του εξοπλισμού, το οποίο επιτρέπει τη λειτουργικότητα των εφαρμογών του χρήστη και ορίζει το τερματικό κομμάτι της τηλεπικοινωνιακής πλατφόρμας. Διαθέτει πρόσβαση στα τηλεπικοινωνιακά πρωτόκολλα και μπορεί να ελέγχει τις παραμέτρους και την κατάσταση της σύνδεσης του χρήστη με το δίκτυο παροχής. Ο ME αναφέρεται στο αμιγώς κινητό κομμάτι του εξοπλισμού, δηλαδή συνήθως στην τερματική συσκευή που χρησιμοποιεί ο συνδρομητής για τη σύνδεσή του. Οι συσκευές που υποστηρίζουν χρήση δικτύων 3G διαθέτουν εξαιρετικά τεχνικά χαρακτηριστικά, σύγχρονα λογισμικά και πρόσβαση σε υψηλές ταχύτητες. Κάθε ασύρματη συσκευή διαθέτει ψηφιακά κυκλώματα επεξεργασίας του σήματος ζώνης βάσης (baseband processors), προκειμένου να επιτυγχάνει την ασύρματη ζεύξη με τις κεραιές δικτύου UMTS. Απαραίτητη είναι η ύπαρξη κυκλώματος ραδιοσυχνοτήτων το οποίο διαχειρίζεται το RF σήμα είτε η συσκευή δρα ως πομπός είτε ως δέκτης. Η σχεδίαση του RF κυκλώματος αποτελεί πρόκληση για τους κατασκευαστές καθώς οι ενισχυτές ισχύος ραδιοσυχνοτήτων επιβαρύνουν σημαντικά την κατανάλωση συσκευής, δεδομένου ότι η διαμόρφωση W-CDMA απαιτεί τη χρήση γραμμικών ενισχυτών, οι οποίοι έχουν αυξημένες απαιτήσεις ισχύος. Παρολαυτά, ακόμα και μια συσκευή που κυκλωματικά

επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ισχύος, εξακολουθεί να έχει σημαντικές καταναλώσεις καθώς διαχειρίζεται απαιτητικά λογισμικά με δυνατότητες εφαρμογών πολυμέσων και άλλων λειτουργιών μη διαθέσιμων σε συσκευές παλαιότερης γενιάς. Σε αυτή την κατεύθυνση, με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης δυνατής αυτονομίας συσκευής παρά τις υψηλές απαιτήσεις, οι κατασκευαστές αναβαθμίζουν διαρκώς την τεχνολογία μπαταριών. Η επικρατέστερη τεχνολογία αυτή τη στιγμή, είναι οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion) οι οποίες επιτυγχάνουν ικανοποιητική διάρκεια ζωής και διαθέτουν σχετικά μικρό μέγεθος και βάρος [21].

3.2.3 Δίκτυο Επίγειας Ασύρματης Πρόσβασης UMTS (UMTS Terrestrial Radio Access Network – UTRAN)

Το δίκτυο UTRAN μεσολαβεί μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη (UE) και του κεντρικού δικτύου (CN) και είναι επιφορτωμένο με τη δημιουργία και τη διατήρηση σύνδεσης μεταξύ των δύο περιοχών. Στα UMTS δίκτυα, η περιοχή UTRAN είναι στην ουσία η περιοχή που ορίστηκε ως «δίκτυο πρόσβασης». [21] Είναι υπεύθυνο για όλες τις διαδικασίες που αφορούν την ασύρματη επικοινωνία και μετάδοση, καθώς και για τη διαχείριση πόρων του δικτύου.

Τα δύο κύρια δομικά στοιχεία του UTRAN είναι ο σταθμός βάσης (base station), ο οποίος στα συστήματα UMTS αναφέρεται ως Node-B και ο Ελεγκτής Ασύρματου Δικτύου (Radio Network Controller – RNC). Αναφορικά με την αρχιτεκτονική δομή του, το UTRAN ενός UMTS συστήματος αποτελείται από Υποσυστήματα Ασύρματου Δικτύου (Radio Network Subsystems – RNS), καθένα από τα οποία περιέχει έναν αριθμό σταθμών βάσης Node-Bs που ελέγχονται από έναν κόμβο ελέγχου RNC. Οι σταθμοί βάσης είναι τα στοιχεία εκείνα που επικοινωνούν απευθείας με τον εξοπλισμό χρήστη και εξυπηρετούν την περιοχή κάλυψης (κελί) που τους αναλογεί. Όλες οι διαδικασίες λήψης (uplink) ή μετάδοσης (downlink) δεδομένων εντός του κελιού εκτελούνται από τα συστήματα του σταθμού βάσης, ακόμα και αν δύο φορητές συσκευές χρηστών επιθυμούν τη μεταξύ τους διασύνδεση, απαιτείται πρώτα η διαμεσολάβηση του σταθμού βάσης. Οι Node-Bs γενικά διαθέτουν μια τηλεπικοινωνιακή κεραία και περιφερειακό εξοπλισμό (ενισχυτές ισχύος, ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος, εφεδρικές μπαταρίες). Η εναέρια πλατφόρμα επικοινωνίας που χρησιμοποιούν είναι η W-CDMA, η οποία ενσωματώνει φυσικά κανάλια ασύρματης ζεύξης στα οποία μεταφέρονται πληροφορίες από τα κανάλια μετάδοσης. Οι πληροφορίες αυτές, προωθούνται στον κόμβο ελέγχου, ο οποίος τις επεξεργάζεται και πραγματοποιεί τους ανάλογους χειρισμούς. Εν γένει, οι σταθμοί βάσης διαθέτουν ελάχιστη αυτονομία λειτουργικότητας, καθώς ελέγχονται πλήρως από τους RNC και η λειτουργία τους περιορίζεται στην εκτέλεση των ασύρματων ζεύξεων. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, οι κόμβοι RNC αποτελούν τον εγκέφαλο του UTRAN, το στοιχείο εκείνο που επωμίζεται τις διαδικασίες μεταγωγής και ελέγχου. Αξιοποιώντας τον όγκο δεδομένων που τους παρέχουν οι σταθμοί βάσης, φέρουν σε πέρας όλες τις λειτουργίες ελέγχου που αφορούν στην

εγκαθίδρυση, στη διατήρηση και στον τερματισμό των συνδέσεων. Μια ακόμη βασική λειτουργία του RNC, είναι η διαχείριση των ασύρματων πόρων του δικτύου (Radio Resource Management – RRM), μέσω της οποίας εγγυάται η σταθερότητα του επικοινωνιακού διαύλου και η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Σε αυτή τη διαδικασία περιλαμβάνεται:

- Ο έλεγχος των μεταγωγών μεταξύ των σταθμών βάσης (handover), που επιτρέπει την κινητικότητα του χρήστη εντός του δικτύου.
- Ο έλεγχος ισχύος, που αφορά σε παραμέτρους όπως η ισχύς μετάδοσης των συστημάτων πρόσβασης W-CDMA και η διαχείριση χωρητικότητας του δικτύου.
- Η εκτέλεση διαδικασιών ταυτοποίησης και κωδικοποίησης, η παροχή αδειών πρόσβασης και η εξασφάλιση προστασίας δεδομένων.
- Η διαχείριση πρωτοκόλλων που αφορούν τις μεταγωγές πακέτων προς το κεντρικό δίκτυο.

3.2.4 Κεντρικό Δίκτυο (Core Network – CN)

Το κεντρικό δίκτυο (CN) του UMTS μπορεί να θεωρηθεί η βασική πλατφόρμα για όλες τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που παρέχει το δίκτυο στους συνδρομητές. Ουσιαστικά πρόκειται για την περιοχή μεταξύ του δικτύου πρόσβασης UTRAN και των δικτύων εκτός του UMTS συστήματος, όπως το διαδίκτυο. Τυπικά, το κεντρικό δίκτυο είναι επιφορτισμένο με δύο κατηγορίες λειτουργιών, αυτές που σχετίζονται με υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος (CS) και εκείνες που αφορούν σε υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου (PS). Ο διαχωρισμός αυτός αντικατοπτρίζεται και στη δομή του CN.

Τα συστήματα CS σχετίζονται κυρίως με λειτουργίες σύνδεσης που περιλαμβάνουν τη δέσμευση πόρων του δικτύου, όπως για παράδειγμα οι διαδικασίες δέσμευσης και αποδέσμευσης ενός ή περισσότερων καναλιών κατά τη διάρκεια μιας κλήσης. Η τεχνολογία των συστημάτων αυτών είναι σε μεγάλο βαθμό βασισμένη στα GSM δίκτυα δεύτερης γενιάς και διευκόλυνε τη μετάβαση στα UMTS δίκτυα. Η CS περιοχή του κεντρικού δικτύου διαθέτει τα εξής βασικά δομικά στοιχεία που αλληλεπιδρούν (σε ένα βαθμό ταυτίζονται) σε επίπεδο συσκευών και λογισμικού:

- *Mobile Switching Centre/Visitor Location Register (MSC/VLR)*: Τα συστήματα αυτά έχουν άμεση εξάρτηση και συνεργασία και είναι κυρίως υπεύθυνα για τη διαχείριση δραστηριοτήτων που αφορούν συνδέσεις μεταγωγής κυκλώματος και ζητήματα διαχείρισης κινητικότητας (Mobility Management – MM) όπως ο εντοπισμός και η καταχώρηση τοποθεσίας ή ζητήματα ασφάλειας. Ο MSC είναι ένας κόμβος ο οποίος αντλεί δεδομένα από το δίκτυο πρόσβασης και από το εξυπηρετούμενο VLR σύστημα και τα δρομολογεί εντός του κεντρικού δικτύου. Ο VLR είναι ουσιαστικά μια βάση δεδομένων η οποία διατηρεί πληροφορίες που αφορούν διαδικασίες ταυτοποίησης, ελέγχου πρόσβασης και ασφάλειας των

συνδρομητών για όλη τη διάρκεια της σύνδεσής τους. Όλες αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν στο VLR να καταχωρεί προσωρινά την τοποθεσία κάθε συνδρομητή ώστε να εξυπηρετηθεί εκείνη τη στιγμή από τα κατάλληλα συστήματα αλλά χάνονται μετά το πέρας της περιόδου σύνδεσης. Επιπλέον, τα συστήματα MSC/VLR περιέχουν την τεχνολογία διακωδικοποίησης, απαραίτητη για την ψηφιακή μετατροπή δεδομένων φωνητικής κωδικοποίησης (σημαντική διαφοροποίηση από τη GSM τεχνολογία που τα συστήματα διακωδικοποίησης ήταν ενσωματωμένα στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης)

- *Gateway Mobile Switching Centre (GMSC)*: Ο κόμβος αυτός αναλαμβάνει τις διαδικασίες σύνδεσης (εισερχόμενης/εξερχόμενης) των συστημάτων MSC/VLR από και προς τα δίκτυα εκτός UMTS. Κατά τη διεξαγωγή CS συνδέσεων, ο GMSC εγκαθιδρύει ένα αναγνωριστικό μονοπάτι επικοινωνίας με ένα MSC/VLR σύστημα, το οποίο περιέχει όλα τα στοιχεία σύνδεσης του εξυπηρετούμενου συνδρομητή. Το κατάλληλο MSC/VLR σύστημα το επιλέγει ο ίδιος GMSC διεξάγοντας διαδικασίες ανάκτησης πληροφοριών τοποθεσίας.

Από την άλλη, τα συστήματα PS σχετίζονται με λειτουργίες σύνδεσης που δεν απαιτούν δέσμευση πόρων του δικτύου, καθώς η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μεταφορά δεδομένων με χρήση πακέτων. Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται και αποτελούν εξέλιξη του προηγμένου προτύπου δεύτερης γενιάς (2.5G) GPRS και παρέχουν στο δίκτυο ευελιξία και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σχέση με τις συμβατικές CS. Τα βασικά δομικά στοιχεία της PS περιοχής του κεντρικού δικτύου είναι τα εξής:

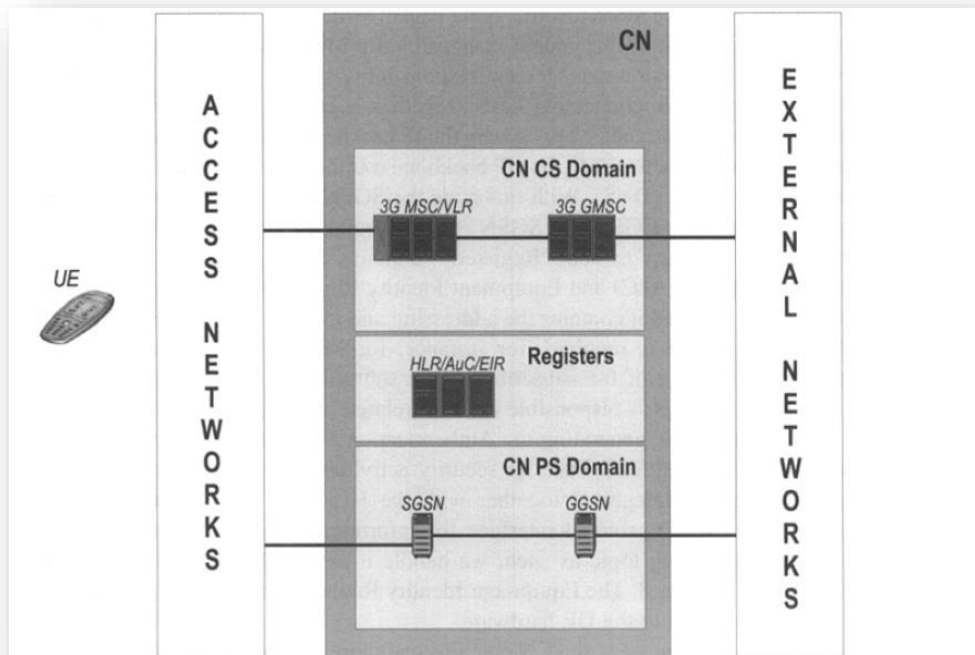
- *Serving GPRS Support Node (SGSN)*: Ο κόμβος SGSN εξυπηρετεί ένα ρόλο αντίστοιχο με το ρόλο του κόμβου MSC συστήματος της CS περιοχής. Επικοινωνεί με το UTRAN, διαθέτει πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων και δρομολογεί τα μεταφερόμενα πακέτα στο κεντρικό δίκτυο. Καθώς αποτελεί το βασικό σημείο πρόσβασης του χρήστη στο δίκτυο, όταν μια συσκευή UE συνδεθεί στην PS περιοχή ο SGSN επιφορτώνεται με τη διαδικασία ταυτοποίησης. Μόλις αυτή ολοκληρωθεί, καταχωρεί τον συνδρομητή στο δίκτυο και είναι υπεύθυνος για όλα τα ζητήματα MM που τον αφορούν.
- *Gateway GPRS Support Node (GGSN)*: Όπως και ο SGSN, έτσι και ο κόμβος GGSN έχει αντιστοιχία ρόλων με ένα στοιχείο της CS περιοχής, τον κόμβο GMSC. Κατά βάση εξυπηρετεί τη μεταγωγή πακέτων από και προς τα εξωτερικά δίκτυα που χρησιμοποιούν πακέτα, όπως το διαδίκτυο, διαθέτοντας άμεση σύνδεση με έναν εξυπηρετούμενο κόμβο SGSN. Πρόκειται για έναν ευφυή δρομολογητή (router), ο οποίος προωθεί δεδομένα και αποδίδει IP διευθύνσεις μόνο στους ενεργούς χρήστες. Ως εκ τούτου, διαθέτει αρχείο ενεργών χρηστών και γνωρίζει σε ποιο SGSN υπάγονται. Ο ρόλος του ως διαχειριστή της μεταγωγής πακέτων και διεκπεραιωτή των κλήσεων, τον καθιστά χρήσιμο εργαλείο τιμολόγησης καθώς διαθέτει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τη διεξαγωγή τους (διάρκεια, τοποθεσία κλπ).

Το δίκτυο που διασυνδέει τους GSN κόμβους αναφέρεται συχνά ως δίκτυο κορμού IP (Internet Protocol backbone), το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ένα ιδιωτικό ενδοδίκτυο του συστήματος, το οποίο διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα δίκτυα με εφαρμογές τείχους προστασίας. Για το λόγο αυτό, καθίσταται απαραίτητη η ύπαρξη ενός Εξυπηρετητή Ονομάτων Τομέα (Domain Name Server – DNS) στην περιοχή PS, ο οποίος διαθέτει αρχείο των IP διευθύνσεων των στοιχείων του συστήματος και επιτρέπει στους GSN κόμβους την κατάλληλη δρομολόγηση των πακέτων [21].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τόσο τα CS όσο και τα PS συστήματα έχουν βασιστεί και παρουσιάζουν έντονες ομοιότητες με τεχνολογίες παλαιότερων γενεών (GSM και GPRS αντίστοιχα). Η διαλειτουργικότητα που παρουσιάζει το UMTS αποτελεί άμεση συνάρτηση αυτού του γεγονότος και είναι ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό.

Άξια αναφοράς είναι εν τέλει, τα συστήματα καταχωρητών (registers) που εμπεριέχει το κεντρικό δίκτυο. Πρόκειται για βάσεις δεδομένων που περιέχουν πληροφορίες διευθύνσεων και στοιχείων ταυτοποίησης, στις οποίες διαθέτουν πρόσβαση τόσο οι CS όσο και οι PS κόμβοι. Οι καταχωρητές δε συμμετέχουν στη διακίνηση δεδομένων. Οι κόμβοι καταχωρητών που συναντά κανείς στο UMTS δίκτυο είναι οι εξής:

- *Home Location Register (HLR)*: Σε αυτή τη βάση δεδομένων, βρίσκονται αποθηκευμένα στοιχεία για τους συνδρομητές, τα οποία είναι σχετικά σταθερά και αμετάβλητα όπως τα στοιχεία ταυτοποίησής του, ο τηλεφωνικός αριθμός του, οι υπηρεσίες στις οποίες δικαιούται πρόσβαση καθώς και γενικές πληροφορίες για την τελευταία τοποθεσία του. Κάθε συνδρομητής καταχωρείται σε ένα μόνο HLR. Κατά την πραγματοποίηση μιας κλήσης, ο HLR ταυτοποιεί τα δεδομένα τοποθεσίας μέσω του VLR και παραπέμπει το χρήστη στον ανάλογο κόμβο εξυπηρέτησης του UTRAN.
- *Authentication Centre (AuC)*: Όλοι οι φορείς πιστοποίησης που χρησιμοποιεί το σύστημα, από τις παραμέτρους ασφαλείας που χρησιμοποιούν οι κόμβοι μέχρι τους κλειδαρίθμους της USIM, προκύπτουν από το AuC. Τυπικά το AuC είναι ενσωματωμένο στην ίδια πλατφόρμα λογισμικού με τον καταχωρητή HLR. Κατά την αίτηση σύνδεσης του χρήστη στο δίκτυο, το AuC επικοινωνεί με τον HLR και εκκινεί τις διαδικασίες ταυτοποίησης και κατόπιν τις διαδικασίες κρυπτογράφησης και προστασίας προσωπικών δεδομένων. Όπως είναι λογικό, λόγω του περιεχομένου τους, τα συστήματα αυτά αποτελούν τον πιο συχνό στόχο ηλεκτρονικών επιθέσεων και για το λόγο αυτό προστατεύονται από firewalls και λογισμικά προστασίας. Η ασφάλεια των συστημάτων που σχετίζονται με ζητήματα MM αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό ερευνητικό κομμάτι στην ανάπτυξη σύγχρονων δικτύων.
- *Equipment Identity Register (EIR)*: Ο καταχωρητής EIR διαθέτει αρχείο με τις συσκευές κινητού εξοπλισμού που δικαιούνται πρόσβαση στο δίκτυο καθώς και με εκείνες στις οποίες η πρόσβαση απαγορεύεται (πχ λόγω απώλειας ή κλοπής). Χρησιμοποιώντας τον αναγνωριστικό αριθμό IMEI (International Mobile Equipment Identity) που διαθέτει κάθε συσκευή, πραγματοποιεί τις διαδικασίες ταυτοποίησης και δέχεται ή απορρίπτει την αίτηση σύνδεσης.



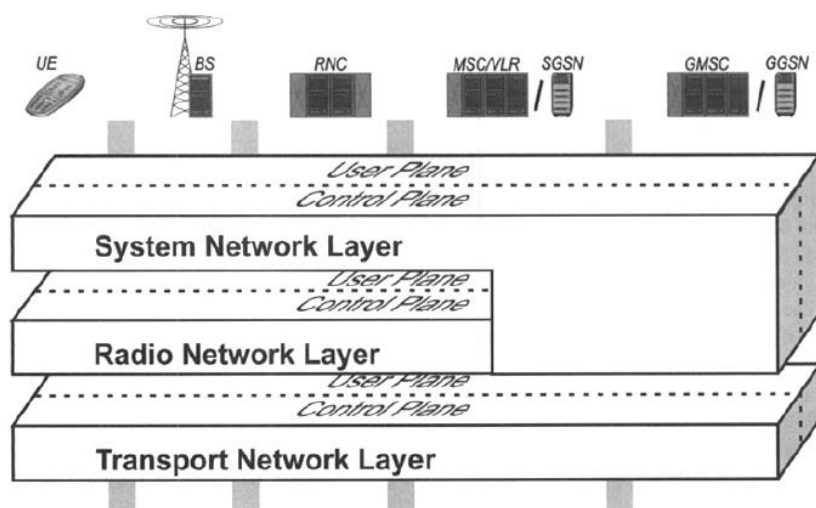
Εικόνα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση της δομής του κεντρικού δικτύου CN

3.2.5 Πρωτόκολλα

Στις προηγούμενες παραγράφους, η ανάλυση της αρχιτεκτονικής δομής του UMTS δικτύου προσεγγίστηκε μέσω του λειτουργικού διαχωρισμού των στοιχείων του συστήματος και της μεταξύ τους επικοινωνίας. Εξίσου σημαντικός είναι όμως και ο ρόλος των πρωτοκόλλων του συστήματος, του συνόλου εκείνου των διεπαφών που ελέγχουν τις λειτουργίες και συντονίζουν τις επιμέρους βαθμίδες του δικτύου.

Τα πρωτόκολλα διαθέτουν και αυτά τη δική τους αρχιτεκτονική δομή και συγκεκριμένα για τα δίκτυα UMTS ακολουθείται η μοντελοποίηση OSI (Open Systems Interconnection), που σημαίνει ότι τηρείται ιεραρχική δομή όπου κάθε στρώμα παρέχει υπηρεσίες στο αμέσως υψηλότερό του. Σε μια προσπάθεια απόδοσης μιας ομογενοποιημένης σύνθεσης στα πρωτόκολλα που περιλαμβάνει ένα UMTS σύστημα, ο διεθνής φορέας 3GPP (3rd Generation Partnership Project) εφαρμόζει τον εξής διαχωρισμό πρωτοκόλλων σε στρώματα (σε οριζόντια στρωματοποίηση), ξεκινώντας από το χαμηλότερο: στρώμα δικτύου μεταφοράς (Transport Network Layer), στρώμα ασύρματου δικτύου (Radio Network Layer) και στρώμα δικτύου συστήματος (System Network Layer). Ανεξάρτητα από το στρώμα στο οποίο ανήκει κάποιο πρωτόκολλο, ένας δεύτερος διαχωρισμός γίνεται σε δύο επίπεδα: το επίπεδο ελέγχου (control plane) και το επίπεδο χρήστη (user plane). Το στρώμα δικτύου μεταφοράς περιλαμβάνει πρωτόκολλα τα οποία συντονίζουν τις λειτουργίες μετάδοσης δεδομένων μεταξύ των στοιχείων του συστήματος,

πρόκειται ουσιαστικά για ένα μεταγωγικό υποδίκτυο που επιτηρεί την ομαλή ροή δεδομένων. Μετά το πρώτο στρώμα, οι λειτουργίες του συστήματος διαμοιράζονται από τα δύο επόμενα στρώματα που εξασφαλίζουν τη διασυνεργασία μεταξύ της περιοχής UE και του CN. Συγκεκριμένα, το στρώμα ασύρματου δικτύου περιλαμβάνει πρωτόκολλα που αφορούν στις διαδικασίες ασύρματης ζεύξης ενώ το στρώμα δικτύου συστήματος περιλαμβάνει κυρίως πρωτόκολλα επικοινωνιακών υπηρεσιών. Όσον αφορά το διαχωρισμό επιπέδων, τα πρωτόκολλα σε επίπεδο ελέγχου εστιάζουν στη διαχείριση και τον έλεγχο των τηλεπικοινωνιακών πόρων και των εφαρμογών για ολόκληρο το σύστημα ενώ σε επίπεδο χρήστη εστιάζουν στη διατήρηση αμφίδρομης και αξιόπιστης ροής δεδομένων μεταξύ της συσκευής χρήστη και του UMTS δικτύου. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός πως στο στρώμα δικτύου μεταφοράς πολλά από τα πρωτόκολλα ανήκουν και στα δύο επίπεδα, με τον έντονο διαχωρισμό να γίνεται στα υψηλότερα στρώματα.



Εικόνα 3.4 Η αρχιτεκτονική δομή του UMTS δικτύου σε επίπεδο πρωτοκόλλων

Πριν την εφαρμογή του 3GPP μοντέλου, η επικρατούσα μοντελοποίηση της αρχιτεκτονικής δομής του UMTS δικτύου σε επίπεδο πρωτοκόλλων εμπεριείχε την προσέγγισή του με μοντέλα αναφοράς που αντιστοιχούν στις περιοχές του δικτύου. Η μοντελοποίηση αυτή, αν και πιο σύνθετη, εξακολουθεί να θεωρείται αποδεκτή και επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση και οπτικοποίηση του αρχιτεκτονικού μοντέλου. Σε αυτή την προσέγγιση, μπορούν να γίνουν περαιτέρω κατηγοριοποιήσεις των πρωτοκόλλων ανάλογα με την περιοχή του δικτύου που εξυπηρετούν: στρώμα πρόσβασης (AS) και στρώμα μη πρόσβασης (NAS), πρωτόκολλα CS και πρωτόκολλα PS. Το AS όπως έχει ήδη αναφερθεί, περιγράφει το στρώμα πρωτοκόλλων ανάμεσα στον UE και το UTRAN ενώ το NAS ανάμεσα στον UE και το CN. Τα πρωτόκολλα CS προφανώς αφορούν υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος ενώ τα πρωτόκολλα PS, υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου. Ο διαχωρισμός σε επίπεδα ελέγχου και χρήστη εξακολουθεί να ισχύει και σε αυτήν τη μοντελοποίηση.

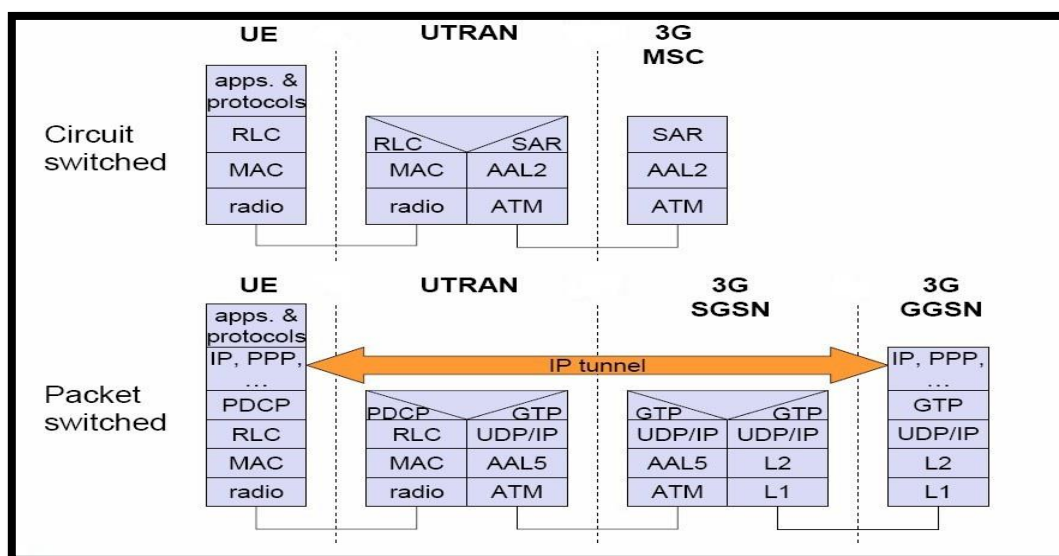
Σε μια γενική περιγραφή του μοντέλου, το στρώμα πρόσβασης AS περιλαμβάνει τρία επίπεδα και τερματίζει στον κόμβο RNC. Το πρώτο επίπεδο (L1) ενσωματώνει την πλατφόρμα Physical (PHY), η οποία αξιοποιώντας την W-CDMA τεχνολογία, αντιστοιχίζει τη ροή δεδομένων από τα κανάλια μεταφοράς στα φυσικά (physical) κανάλια και αντίστροφα - τερματίζει στο σταθμό βάσης. Το επόμενο επίπεδο (L2) περιλαμβάνει τα υποεπίπεδα Medium Access Control (MAC) και Radio Link Control (RLC) – τερματίζουν στον κόμβο RNC. Στο επίπεδο αυτό, αρχικά η MAC πλατφόρμα μετατρέπει τα κανάλια από φυσικά σε λογικά, φροντίζει για τη βέλτιστη κατανομή τους στις διασυνδέσεις τερματικών ή κόμβων και διεκπεραιώνει τις διαδικασίες σηματοδότησης πρόσβασης (αίτηση και χορήγηση). Κατόπιν στο υποεπίπεδο RLC προστίθενται λειτουργίες ελέγχου λογικής σύνδεσης στα κανάλια αυτά, τα οποία τελικά παραπέμπονται για χρήση στο τελευταίο επίπεδο ως φορείς ασύρματης ζεύξης (Radio Bearers – RBs). Σε επίπεδο ελέγχου, η μεσολάβηση της RLC πλατφόρμας είναι επαρκής, σε επίπεδο χρήστη όμως και ειδικά για πρωτόκολλα PS, απαιτείται η παρέμβαση ενός ακόμα υποεπιπέδου σύγκλισης, του Packet Data Convergence Protocol (PDCP). Το PDCP επιτρέπει τη μεταφορά IP πακέτων δεδομένων και καθιστά τα πρωτόκολλα υψηλών επιπέδων αναγνώσιμα από τα πρωτόκολλα ασύρματης πρόσβασης, παρέχοντας ευελιξία και διαλειτουργικότητα στα ανώτερα επίπεδα. Χαρακτηριστική τεχνική του PDCP πρωτοκόλλου είναι η συμπίεση/αποσυμπίεση των πληροφοριών, που επιτρέπει καλύτερη διαχείριση πόρων. Το τρίτο επίπεδο (L3) ενσωματώνει τα πρωτόκολλα RRC (Radio Resource Control) και περιλαμβάνει λειτουργίες διαχείρισης των συνδέσεων και των RBs – τερματίζει στον κόμβο RNC. Η πλατφόρμα RRC διαθέτει κυρίως διαχειριστικό ρόλο και διατηρεί συνδέσεις ελέγχου με την πλειοψηφία των διεπαφών του συστήματος, ενσωματώνει όμως και λειτουργίες κινητής σύνδεσης και ειδοποιήσεων.

Πάνω από το L3 που ορίζει και το πέρας του AS, βρίσκεται το NAS το οποίο ενσωματώνει μια πληθώρα από πρωτόκολλα και εφαρμογές αναλόγως με τα επίπεδα και τις περιοχές στις οποίες αναφέρεται. Τα πρωτόκολλα αυτά μεταφέρονται ως επί το πλείστον κατά τις διαδικασίες εγκαθίδρυσης σύνδεσης και σηματοδότησης μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη και του κεντρικού δικτύου. Ο βασικός διαχωρισμός του NAS μπορεί να γίνει αρχικά σε δύο επίπεδα. Το πρώτο και χαμηλότερο σχετίζεται με διαδικασίες Mobility Management (MM) και αναφέρεται ως MM πρωτόκολλο στις CS περιοχές και GMM (GPRS MM) πρωτόκολλο στις PS περιοχές. Το δεύτερο επίπεδο περιέχει τα πρωτόκολλα που αφορούν διαδικασίες Communication Management (CM) και περιλαμβάνει τις εξής ομάδες πρωτοκόλλων:

- *Call Control (CC) protocols*: ελέγχουν τις διαδικασίες διεξαγωγής μιας κλήσης μεταγωγής κυκλώματος, από την εγκαθίδρυση μέχρι τη διακοπή της και αφορούν την CS περιοχή του κεντρικού δικτύου.
- *Session Management (SM) protocols*: ελέγχουν τις διαδικασίες διεξαγωγής συνεδριών μεταφοράς πακέτων και PDP (Packet Data Protocol) περιεχομένου και αφορούν την PS περιοχή του κεντρικού δικτύου.
- *Supplementary Services (SS) protocols*: ελέγχουν την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση συμπληρωματικών υπηρεσιών σχετικών και μη με τις διαδικασίες κλήσεων.

- *Short Message Service (SMS) protocol*: ελέγχουν την παράδοση μηνυμάτων κειμένου από και προς τον εξοπλισμό χρήστη - στην PS περιοχή αναφέρονται ως GSMS πρωτόκολλα (GPRS SMS).

Τα προηγούμενα συστήματα GSM ενσωμάτωναν ομάδες πρωτοκόλλων Mobile Application Part (MAP) που αφορούσαν τεχνολογίες μεταγωγής κυκλώματος. Η MAP πλατφόρμα εξακολούθησε να χρησιμοποιείται και στα UMTS συστήματα, η ενσωμάτωση όμως GPRS τεχνολογίας στα δίκτυα τρίτης γενιάς δημιούργησε την ανάγκη αναβάθμισης της MAP ώστε να υποστηρίζει υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου. Τα 3G συστήματα εισήγαγαν τότε το πρωτόκολλο GTP (GPRS Tunneling Protocol), το πλέον διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας στα δίκτυα κορμού των PS περιοχών του συστήματος. Σε επίπεδο χρήστη, η μεταφορά πακέτων γίνεται μέσω του GTP-U (GTP-User) πρωτοκόλλου, ξεκινώντας από την πλευρά του κόμβου RNC της UTRAN περιοχής και καταλήγοντας στους κόμβους GGSN του CN. Υποστηρίζει τη μεταφορά μεγάλου αριθμού διαφορετικών πακέτων (IPv4, IPv6, PPP), στα οποία προσθέτει επικεφαλίδες και τα δρομολογεί με χρήση IP διευθύνσεων. Σε επίπεδο ελέγχου, το GTP-C (GTP-Control) πρωτόκολλο επωμίζεται τον έλεγχο αυτών των δρομολογήσεων, καθώς και τις διαδικασίες εγκαθίδρυσης, τροποποίησης και διακοπής των διασυνδέσεων. Οι εφαρμογές του δεν επεκτείνονται στην περιοχή ασύρματης πρόσβασης αλλά περιορίζονται κυρίως μεταξύ των SGSN και GGSN κόμβων του κεντρικού δικτύου και αφορούν τον έλεγχο της μεταξύ τους σηματοδότησης. Η επικοινωνία της περιοχής UTRAN με την περιοχή CN (συγκεκριμένα με τους SGSN κόμβους) σε επίπεδο ελέγχου επιτυγχάνεται μέσω ενός ακόμα σημαντικού πρωτοκόλλου, του Radio Access Network Application Part – RANAP). Το RANAP εκτός από τις ευθύνες σηματοδότησης που διαθέτει, ενσωματώνει και λειτουργίες όπως η ανταλλαγή πληροφοριών χρήστη μεταξύ RNC και CN, ο έλεγχος διαδικασιών CC και MM στις περιοχές αυτές, η διαχείριση διαδικασιών γεωγραφικού εντοπισμού και ο έλεγχος ζητημάτων προστασίας (κωδικοποίηση, εσφαλμένη λειτουργία κ.α) [21].



Εικόνα 3.5 Στοίβα πρωτοκόλλων του UMTS δικτύου

3.3 Υπηρεσίες δικτύου UMTS

Η ανάγκη των χρηστών για μετάβαση από υπηρεσίες φωνής σε υπηρεσίες δεδομένων και πολυμέσων αποτέλεσε τον καταλύτη που επιτάχυνε την εδραίωση των 3G δικτύων στην αγορά. Η μετάβαση αυτή σηματοδότησε και τη σταδιακή μετακίνηση από τα συστήματα μεταγωγής κυκλώματος CS στα συστήματα μεταγωγής πακέτου PS. Τα συστήματα τρίτης γενιάς υποστηρίζουν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, διαθέτουν αναβαθμισμένη ποιότητα εξυπηρέτησης και καθιστούν εφικτή την ασύρματη παροχή υπηρεσιών που παλαιότερα απαιτούσαν καλωδιώσεις. Υπενθυμίζεται πως μια συσκευή διαθέτει ορισμένες ελάχιστες απαιτήσεις όσον αφορά στο ρυθμό μετάδοσης, προκειμένου να θεωρηθεί σύστημα τρίτης γενιάς:

Ρυθμός μετάδοσης CS	Ρυθμός μετάδοσης PS	Είδος και περιοχή κάλυψης
144 kbps	144 kbps (peak)	Βασική κάλυψη, ταχέως κινούμενα οχήματα, αγροτικές / προαστιακές περιοχές, εξωτερικοί χώροι
384 kbps	384 kbps (peak)	Εκτεταμένη κάλυψη, κινούμενα οχήματα, αστικές περιοχές, εξωτερικοί χώροι
2 Mbps	2 Mbps (peak)	Περιοχές Hot Spot, πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, ταχύτητες πεζών, εσωτερικοί χώροι

Πίνακας 3.2 Ρυθμοί μετάδοσης συσκευών UMTS

Από την οπτική του χρήστη, το UMTS σύστημα δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένα δίκτυο υπηρεσιών. Από αυτή τη σκοπιά, η τεχνολογία του συστήματος είναι απλά το μέσο το οποίο παρέχει τις υπηρεσίες στους χρήστες, εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη *ποιότητα υπηρεσιών* (*Quality of Service – QoS*) προκειμένου να διατηρούνται ικανοποιημένοι, κάτι το οποίο επιτυγχάνει με τη χρήση των φορέων (bearers). Ως φορέας θα μπορούσε να οριστεί μια υπηρεσία που παρέχει QoS μεταξύ δύο δεδομένων σημείων. Η καινοτομία του UMTS δικτύου έγκειται στην ύπαρξη πληθώρας φορέων με διαφορετικές απαιτήσεις σε QoS και μεταβλητά χαρακτηριστικά, που αποτελούν ταυτόχρονα στοιχείο υποστήριξης παλαιών εφαρμογών και βάση ανάπτυξης καινούριων. Το γεγονός αυτό παρέχει ευελιξία τόσο στο ίδιο το σύστημα το οποίο διαχειρίζεται βέλτιστα τους πόρους του, όσο και στο χρήστη, ο οποίος δύναται να επιλέξει βάσει των αναγκών του [22].

Οι παρεχόμενες υπηρεσίες διαφοροποιούνται σε επίπεδο περιεχομένου και σε επίπεδο χαρακτηριστικών που καθορίζουν την QoS, όπως η διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput), η καθυστέρηση (latency) και η δέσμευση πόρων. Το βασικό ενδιαφέρον του

χρήστη όμως έγκειται στη χρονική καθυστέρηση, η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της σύνδεσης για εκείνον. Το κριτήριο αυτό, αποτελεί και τη βάση γύρω από την οποία γίνεται ο διαχωρισμός σε κλάσεις υπηρεσιών, λαμβάνοντας υπόψη και παράγοντες όπως η συμμετρία διακίνησης και ο εγγυημένος ρυθμός μετάδοσης. Διακρίνονται λοιπόν οι εξής τέσσερις κλάσεις:

- *Κλάση Υπηρεσιών Ομιλίας (Conversational Class):* Οι υπηρεσίες ομιλίας χαρακτηρίζονται από πολύ μικρούς σχετικά σταθερούς χρόνους καθυστερήσεων, συμμετρική διακίνηση δεδομένων και εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης. Η πιο γνωστή εφαρμογή αυτής της κλάσης, είναι οι φωνητικές υπηρεσίες τηλεφωνικών κλήσεων αλλά περιλαμβάνει πολλές ακόμα εφαρμογές που αναπτύχθηκαν λόγω της ευρείας χρήσης διαδικτύου και πολυμέσων, όπως η μεταφορά φωνής μέσω IP ή η βιντεοκλήση.
- *Κλάση Υπηρεσιών Συνεχούς Ροής (Streaming Class):* Οι υπηρεσίες streaming χαρακτηρίζονται από μικρούς αλλά μεταβλητούς χρόνους καθυστερήσεων, ασύμμετρη διακίνηση δεδομένων και εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης. Οι εφαρμογές αυτής της κλάσης, συνηθέστερα περιλαμβάνουν τη μετάδοση και συνεχή ροή δεδομένων πολυμέσων, δίνοντας στο χρήστη πρόσβαση στα δεδομένα ήχου, εικόνας και βίντεο από τη συσκευή του.

Οι δύο πρώτες κλάσεις υπηρεσιών χρησιμοποιούν κυρίως διασυνδέσεις πραγματικού χρόνου (Real Time – RT), για το λόγο αυτό είναι απαιτητικές σε ζητήματα καθυστέρησης.

- *Κλάση Διαδραστικών Υπηρεσιών (Interactive Class):* Οι διαδραστικές υπηρεσίες χαρακτηρίζονται από μέσους χρόνους καθυστερήσεων, ασύμμετρη διακίνηση δεδομένων και μη εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης. Οι εφαρμογές που απαιτούν διάδραση, προϋποθέτουν από το χρήστη να αιτηθεί πρόσβαση σε δεδομένα από συσκευή απομακρυσμένου εξοπλισμού και περιλαμβάνουν υπηρεσίες περιήγησης στο διαδίκτυο ή παιχνίδια.
- *Κλάση Υπηρεσιών Παρασκηνίου (Background Class):* Οι υπηρεσίες παρασκηνίου χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλους χρόνους καθυστερήσεων, ασύμμετρη διακίνηση δεδομένων και μη εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης. Χαρακτηριστικό αυτής της κλάσης αποτελεί το γεγονός πως δεν υποχρεούται να παραδώσει δεδομένα εντός ενός αυστηρά ορισμένου χρονικού πλαισίου και παρουσιάζει καθυστερήσεις από δέκατα του δευτερολέπτου μέχρι και ολόκληρα λεπτά. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν υπηρεσίες όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, τα SMS, μετρητικές εφαρμογές κλπ.

Οι δύο αυτές κλάσεις υπηρεσιών δε χρησιμοποιούν RT διασυνδέσεις και δρομολογούν τα δεδομένα σε πακέτα. Οι χρόνοι καθυστέρησής τους εξαρτώνται από τους διαθέσιμους πόρους του συστήματος, για το λόγο αυτό χρησιμοποιούν τεχνικές buffering για τη βέλτιστη διαχείριση χωρητικότητας του δικτύου.

Οι υπηρεσίες που παρέχει το 3G δίκτυο αυξάνονται διαρκώς σε ποσότητα και ποιότητα και καθίσταται ολοένα και πιο εμφανές πως το διαδίκτυο και οι εφαρμογές του σταδιακά συγχωνεύονται με τις υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών. Ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά του QoS που παρέχουν, το σύνολο αυτών των υπηρεσιών μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με το περιεχόμενο τους και την εμπειρία που προσφέρουν στο χρήστη:

Κατηγορία	Εφαρμογές
Διασκέδαση	Διαδίκτυο, βίντεο, κείμενο, μηνύματα εικόνας και πολυμέσων
Εργασία	Σημειωματάριο, αυτόματος τηλεφωνητής, εφαρμογές τηλεδιάσκεψης, IP τηλεφωνία
Ενημέρωση	Ηλεκτρονικές εφημερίδες – περιοδικά, διαφήμιση
Αγορές	E-wallet, e-banking, αυτόματες συναλλαγές, εφαρμογές δημοπρασίας
Εκπαίδευση	Ηλεκτρονικές βιβλιοθήκες, μηχανές αναζήτησης, απομακρυσμένη παρακολούθηση μαθημάτων
Ψυχαγωγία	Εφαρμογές πολυμέσων, αθλητικά, χρηματιστήριο, παιχνίδια, μουσικές εφαρμογές, τυχερά παιχνίδια
Υγεία	Τηλεϊατρική, απομακρυσμένη διάγνωση και παρακολούθηση
Αυτοματισμός	Επικοινωνία μεταξύ συσκευών, τηλεματική, οικιακός αυτοματισμός
Πρόσθετα	Τηλεόραση, ραδιόφωνο, ασύρματη πρόσβαση σε Η/Υ, κάμερα, ρολόι, GPS, αναπαραγωγή MP3

Πίνακας 3.3 Κατηγορίες και τύποι υπηρεσιών 3G δικτύου

Είναι προφανές πως οι εφαρμογές των 3G υπηρεσιών είναι πρακτικά απεριόριστες και όσο αυξάνονται οι δυνατότητες των τεχνολογιών τηλεπικοινωνίας, τόσο πιο ευρεία χρήση θα αποκτούν στην καθημερινή ζωή. Η διαλειτουργικότητα που χαρακτηρίζει τα συστήματα UMTS και αποτελεί τη βάση σχεδιασμού και ανάπτυξής τους, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό που μπορεί και πρέπει να αξιοποιηθεί για τη δημιουργία ενός παγκόσμιου δικτύου επικοινωνίας. Επιπλέον, ριζοσπαστικές αλλαγές θα επέφερε η αξιοποίηση των συστημάτων αυτών σε τομείς που παραδοσιακά δεν ενσωμάτωναν ασύρματες τεχνολογίες και αυτοματισμούς, αλλά τα τελευταία χρόνια κινούνται προς αυτή την κατεύθυνση, όπως το Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο.

3.4 Εφαρμογές UMTS στο Ευφύες Ηλεκτρικό Δίκτυο

Μέχρι σήμερα οι τεχνολογίες κυψελωτών δικτύων βρίσκουν ευρείες εφαρμογές κυρίως στον τομέα της κινητής τηλεφωνίας και ως επί το πλείστον απευθύνονται στο μέσο καταναλωτή λιανικού εμπορίου ο οποίος τις αξιοποιεί για τις ανάγκες επικοινωνίας του. Οι συνθήκες όμως αλλάζουν, η τεχνολογία εξελίσσεται και ο τομέας των τηλεπικοινωνιών σταδιακά αλληλεπιδρά με διάφορους άλλους σημαντικούς τομείς.

Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιεί μια σταδιακή μετάβαση από τα συμβατικά στα ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα, μια μετάβαση που έχει επιδράσει μεταμορφωτικά στα δίκτυα διανομής, ενσωματώνοντας τεχνολογίες έξυπνων μετρητών και συστημάτων ελέγχου. Η αναβάθμιση αυτή στον εξοπλισμό, δημιούργησε την ανάγκη εφαρμογής ασύρματων τεχνολογιών στα ΕΗΔ ώστε να γεφυρωθεί το επικοινωνιακό χάσμα ανάμεσα στον ευφυή εξοπλισμό και τα κέντρα ελέγχου και πληροφοριών του συστήματος. Οι τεχνολογίες αυτές διαθέτουν διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά και εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς, ως εκ τούτου δεν υπάρχει κάποια ξεκάθαρα επικρατούσα τεχνολογία. Παρολαυτά, οι υπηρεσίες κυψελωτού δικτύου και ειδικότερα οι UMTS που αποτελούν την πιο εξελιγμένη τεχνολογία με ευρεία εφαρμογή, διαθέτουν χαρακτηριστικά που το ΕΗΔ θα μπορούσε να αξιοποιήσει για μια πληθώρα λειτουργιών του. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα που καθιστούν τα 3G δίκτυα κατάλληλα για εφαρμογή στα ΕΗΔ είναι τα εξής:

- Ευρεία κάλυψη: Πρόκειται για μία από τις πλέον ώριμες τεχνολογίες, με πάνω από 300 δίκτυα και εγκαταστάσεις σε πολλές χώρες παγκοσμίως, με διεθνώς πιστοποιημένα και ενοποιημένα πρότυπα να της προσδίδουν χαρακτηριστικά διαλειτουργικότητας.
- Υψηλή απόδοση: Οι τεχνολογίες 3G επιτυγχάνουν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες μετάδοσης (>2Mbps), με εξαιρετικά χαρακτηριστικά throughput και ελαχιστοποιημένο latency που τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.
- Αξιοπιστία: Η κυψελοειδής δομή τους αυξάνει τις δυνατότητες κάλυψης (ποσοστά >99%) και τη χωρητικότητα του δικτύου. Επίσης διαθέτουν ενσωματωμένα χαρακτηριστικά προστασίας και το γεγονός ότι εκπέμπουν σε αδειοδοτημένο και αυστηρά ορισμένο φάσμα προστατεύει από φαινόμενα παρεμβολών.
- Ευκολία χρήσης: Τα 3G συστήματα διαθέτουν ήδη ένα τεράστιο διασυνδεδεμένο δίκτυο και ως εκ τούτου η εγκατάσταση και η συντήρησή τους σε εφαρμογές ΕΗΔ είναι διαδικασία σχετικά απλή και με επιτρεπτό κόστος. Επιπλέον, η δομή τους διευκολύνει μελλοντικές ανάγκες επέκτασης που μπορεί να προκύψουν.

Το ΕΗΔ, όπως έχει περιγραφεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, ενσωματώνει μια πληθώρα έξυπνων τεχνολογιών. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ευφυών συστημάτων και υποσυστημάτων όπου θα ήταν δυνατό να βρουν εφαρμογή τα 3G δίκτυα, υπάρχει ένας ακόμη μεγαλύτερος αριθμός συστημάτων στα οποία η αποδοτική εφαρμογή 3G τεχνολογιών μελετάται και εξετάζεται και φυσικά υπάρχουν και περιοχές του ΕΗΔ που οι τεχνολογίες 3G ανταγωνίζονται διαφορετικές ασύρματες και μη, τεχνολογίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά, χωρίς επιτυχία [23].

Οι διανομείς ενέργειας έχουν εστιάσει όμως σε τρεις βασικές εφαρμογές του ΕΗΔ, στις οποίες φαίνεται πως οι 3G τεχνολογίες έχουν να συνεισφέρουν τα μέγιστα. Αυτές είναι:

- *Τα αυτόματα μετρητικά συστήματα ηλεκτρικής κατανάλωσης*

Έχει ήδη γίνει αναφορά στα έξυπνα συστήματα AMI, τις αρχές λειτουργίας τους και τη σταδιακή ενσωμάτωσή τους στα ΕΗΔ. Πρόκειται για μια τεχνολογία, η οποία ενδιαφέρεται για υψηλές ταχύτητες δεδομένων, για εφαρμογές που επιτρέπουν αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο (real time pricing), για προστασία προσωπικών δεδομένων καταναλωτή καθώς και για δυνατότητες επεκτασιμότητας. Τα 3G δίκτυα διαθέτουν χαρακτηριστικά και παρέχουν υπηρεσίες που καλύπτουν τις παραπάνω ανάγκες, καθιστώντας τα ιδανική επιλογή για αυτόν τον τομέα του ευφυούς δικτύου.

- *Η τηλεανίχνευση συσκευών ελέγχου και παρακολούθησης*

Τα συστήματα ελέγχου διαχειρίζονται μια σειρά από ευαίσθητα στοιχεία όπως διακόπτες, μετασχηματιστές και γραμμές μεταφοράς που λειτουργούν υπό υψηλές τάσεις. Η μετάβαση στα ΕΗΔ συνεπάγεται την εκθετική αύξηση του αριθμού των στοιχείων αυτών και τη διαχείρισή τους στα πλαίσια ενός πολυσύνθετου συστήματος. Η τεχνολογία αυτή απαιτεί διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων και ασύρματων πόρων, διαρκή παρακολούθηση και επικοινωνία για έγκαιρη αντιμετώπιση προβλημάτων καθώς και δυνατότητα επικοινωνιακής πρόσβασης σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Οι εφαρμογές δικτύων τρίτης γενιάς παρέχουν όλες αυτές τις δυνατότητες.

- *Η διαχείριση της διεσπαρμένης παραγωγής*

Οι ΑΠΕ αναμένεται να επιτελέσουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των ηλεκτρικών δικτύων του μέλλοντος και με την πάροδο του χρόνου να επιφορτιστούν με ακόμα μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής παραγωγής. Τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής ενσωματώνουν αυτόματους μετρητές, συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης και λόγω της φύσης τους, πολλές φορές βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές. Η χρήση ασύρματων τεχνολογιών φαντάζει ιδανική επιλογή για το χειρισμό αυτών των συστημάτων και η UMTS τεχνολογία διαθέτει χαρακτηριστικά που ικανοποιούν τις λειτουργικές τους απαιτήσεις παρέχοντας ταχύτητα, ευελιξία και αξιοπιστία.

Κεφάλαιο 4: Το λογισμικό OPNET

4.1 Περιγραφή χαρακτηριστικών

Η τεχνολογία λογισμικού OPNET (Optimized Network Engineering Tools) Modeler της Riverbed αποτελεί μια πλατφόρμα προσομοίωσης τοπολογιών δικτύων επικοινωνίας και παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον σχεδιασμού και ανάλυσής τους. Αποτελεί πανίσχυρο εργαλείο για μηχανικούς και ερευνητές που επιθυμούν να κατασκευάσουν και να εξετάσουν περιβάλλοντα δικτύων καθώς ενσωματώνει μια τεράστια εργαλειοθήκη για όλες τις φάσεις της προσομοιωτικής διαδικασίας, από το σχεδιασμό μέχρι τη συλλογή και ανάλυση αποτελεσμάτων [24]. Διαθέτει μια πληθώρα χαρακτηριστικών που το ξεχωρίζουν και το καθιστούν εξαιρετική επιλογή για μοντελοποίηση και μελέτη τηλεπικοινωνιακών δικτύων:

- Η μελέτη συμπεριφοράς και επίδοσης δικτύων τυπικά μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με ανάλυση και μαθηματική μοντελοποίηση, μέθοδος που είναι μεν γρήγορη αλλά πολλές φορές ανακριβής ή μη εφαρμόσιμη, είτε με μεθόδους προσομοίωσης, που μελετούν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συσκευών του μοντέλου. Συνήθως οι προσομοιώσεις είναι διακριτών γεγονότων (Discrete Event Simulation – DES) και απαιτούν τεράστια υπολογιστή ισχύ, με συνέπεια να είναι μεν ακριβείς αλλά χρονοβόρες. Η συνδυαστική μέθοδος που έχει αναπτυχθεί ώστε να αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα και να περιορίζει τα μειονεκτήματα των δύο μεθόδων, ονομάζεται υβριδική προσομοίωση. Η εφαρμογή OPNET Modeler είναι κατά κύριο λόγο DES προσομοιωτής, αλλά έχει εξελιχθεί ώστε να υποστηρίζει αναλυτική και υβριδική προσομοίωση, καθώς και παράλληλη προσομοίωση 32 και 64 bit.
- Περιλαμβάνει τεράστια ποικιλία από τεχνολογίες και πρωτόκολλα, καθώς και υποστηρικτικό περιβάλλον εφαρμογών που δρα βοηθητικά και επεξηγηματικά προς το χρήστη και του επιτρέπει να σχεδιάζει και να προσομοιώνει με ευκολία από εξαιρετικά απλά μέχρι πολυσύνθετα συστήματα.
- Ενσωματώνει μια εξαιρετικά φιλική στο χρήστη πλατφόρμα γραφικών (Graphic User Interface – GUI), υποστηριζόμενη από ένα αντικειμενοστραφές περιβάλλον λογισμικού το οποίο τηρεί το ιεραρχικό δομικό μοντέλο που διαθέτουν τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.
- Το προγραμματιστικό περιβάλλον της εφαρμογής βασίζεται στη γλώσσα C/C++ και επιδέχεται παρεμβάσεις. Αυτό σημαίνει πως κάποιος χρήστης με γνώσεις προγραμματισμού μπορεί να παρέμβει στον κώδικα, πραγματοποιώντας ρυθμίσεις και εξάγοντας πληροφορίες που τον ενδιαφέρουν. Η εφαρμογή φυσικά είναι φιλική και βοηθητική προς χρήστες που δε διαθέτουν γνώσεις προγραμματισμού, καθώς διαθέτει εφαρμογές αποσφαλμάτωσης (debugging).

- Διαθέτει εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα προσομοίωσης καθώς ενσωματώνει τεχνικές multithreading, με αποτέλεσμα να προσομοιώνει ώρες ή και μέρες πραγματικού χρόνου και εκατομμύρια συμβάντα που αφορούν τη λειτουργία του μοντελοποιημένου δικτύου, μέσα σε μερικά μόνο λεπτά.
- Διαθέτει επικοινωνιακή συμβατότητα πραγματικού χρόνου με άλλες εφαρμογές όπως προσομοιωτές και υπολογιστικά περιβάλλοντα (Matlab) ή συσκευές όπως routers και Η/Υ. Η διασύνδεση και η ανταλλαγή δεδομένων με αυτές τις πλατφόρμες επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων ενσωματωμένων μονάδων όπως η Esys σε περιβάλλοντα HLA (High Level Architecture).

4.2 Συντάκτες (Editors)

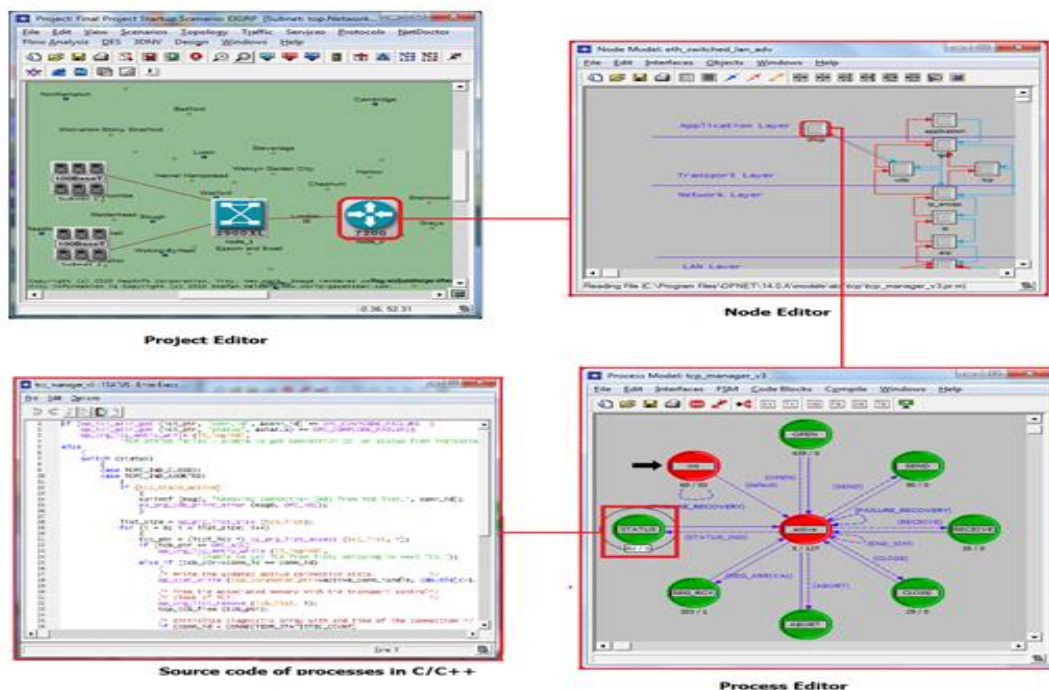
Η διαδικασία της ανάλυσης και προσομοίωσης μιας τοπολογίας δικτύου απαιτεί τον προσδιορισμό και τη σχεδίαση του μοντέλου που μελετάται. Το OPNET ενσωματώνει μια φιλική προς το χρήστη πλατφόρμα, η οποία παρέχει εύκολη πρόσβαση σε κατηγοριοποιημένες λίστες στοιχείων και προσχεδιασμένα μοντέλα, επιτρέποντας την μοντελοποίηση δικτύων σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι συντάκτες είναι προγράμματα επεξεργασίας που διευκολύνουν το χρήστη σε αυτή τη διαδικασία καθορισμού του μοντέλου, προσδίδοντας στο προσομοιούμενο δίκτυο τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Κάθε συντάκτης αφορά μια συγκεκριμένη λειτουργία του συστήματος, περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες και εκτελεί την παραμετροποίησή του, επιτυγχάνοντας έτσι μια αναπαράσταση που αντιστοιχεί με απόλυτη πιστότητα στο πραγματικό σύστημα.

Το λογισμικό OPNET Modeler χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό συντακτών. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι είναι οι εξής [25]:

- *Συντάκτης Σχεδίου (Project Editor)*: Παρέχει το περιβάλλον σχεδίασης του μοντελοποιημένου συστήματος καθώς και την εργαλειοθήκη με τα στοιχεία που το αποτελούν. Επιτρέπει τη δημιουργία, επεξεργασία και διαχείριση νέων ή ήδη υπάρχοντων μοντέλων και την παραμετροποίησή τους σε επίπεδο τοπολογίας και διακίνησης δεδομένων. Ανταλλάσσει δεδομένα με τους άλλους συντάκτες που του παρέχουν προσομοιωτική και αναλυτική ικανότητα.
- *Συντάκτης Κόμβου (Node Editor)*: Ο συντάκτης αυτός είναι το εργαλείο που επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργήσει ή να επεξεργαστεί την εσωτερική δομή μιας συσκευής ή ενός κόμβου. Οι κόμβοι είναι τα στοιχεία που αποτελούν την τοπολογία του δικτύου και μπορεί να αναπαριστούν έναν Η/Υ, ένα διακόπτη, ένα διακομιστή κλπ.
- *Συντάκτης Διεργασίας (Process Editor)*: Είναι ο συντονιστής του συνόλου των διεργασιών που εκτελούνται στο σύστημα. Η μοντελοποίηση σε αυτό το επίπεδο αφορά τη ρύθμιση λειτουργικών διαδικασιών και ορισμού των πρωτοκόλλων.

Μέσω του συντάκτη διεργασίας, ο χρήστης μπορεί να συμμετάσχει στην παραμετροποίηση του συστήματος παρεμβαίνοντας στον κώδικα του προγραμματιστικού περιβάλλοντος των κόμβων.

- **Συντάκτης Ζευξης (Link Editor):** Επιτρέπει τη δημιουργία και τον καθορισμό μοντέλων σύνδεσης, που αναπαριστούν τις φυσικές συνδέσεις μεταξύ κόμβων. Ο συντάκτης αυτός παραμετροποιεί πλήρως κάθε είδους διασύνδεση στο σύστημα και εξυπηρετεί στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της.
- **Συντάκτης Μορφής Πακέτου (Packet Format Editor):** Επιτρέπει τη μοντελοποίηση πακέτων σχηματοποιημένης ή μη μορφής. Στα σχηματοποιημένα πακέτα, κάθε τομέας προσδιορίζεται και μπορεί να γίνει προσβάσιμος μέσω του ονόματός του, ενώ στα μη σχηματοποιημένα απαιτείται η χρήση δεικτών.
- **Συντάκτης Πληροφοριών Ελέγχου Διεπαφών (Interface Control Information Editor - ICI Editor):** Αποτελεί μια εσωτερική δομή του OPNET η οποία μπορεί να μεταφέρει πληροφορίες και να διευκολύνει τις διακοπτόμενες διαδικασίες επικοινωνίας μεταξύ των λειτουργιών του συστήματος.
- **Συντάκτης Συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας (Probability Density Function Editor – PDF Editor):** Ο συντάκτης αυτός επιτρέπει στο χρήστη να κατασκευάσει και να επεξεργαστεί τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μιας ακολουθίας δεδομένων καθώς και να αναλύσει χρήσιμα στατιστικά στοιχεία της προσομοίωσης.
- **Συντάκτης Διερεύνησης (Probe Editor):** Μετά το πέρας της εκτέλεσης μιας προσομοίωσης, ο χρήστης διαθέτει πρόσβαση σε μια πληθώρα στατιστικών αποτελεσμάτων: καθολικά στατιστικά, στατιστικά κόμβων/συνδέσεων/μονοπατιών κ.α. Ο συντάκτης διερεύνησης επιτρέπει την επιλογή και προβολή συγκεκριμένων αποτελεσμάτων και την εστίαση σε ειδικές παραμέτρους.



Εικόνα 4.1 Η ιεραρχική δομή των συντακτών Σχεδίου, Κόμβου και Διεργασίας

Κατά την κατασκευή ενός μοντέλου, το βασικό προσδιορισμό υλοποιούν κυρίως, τηρώντας ιεραρχική οργάνωση, ο Συντάκτης Σχεδίου που παρέχει το περιβάλλον σχεδίασης, ο Συντάκτης Κόμβου που εντάσσει σε αυτό τους κόμβους του μοντέλου και ο Συντάκτης Διεργασίας που με τη σειρά του παραμετροποιεί τους κόμβους αυτούς. Οι υπόλοιποι συντάκτες ακολουθούν αυτή την ιεραρχική δομή και χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά για τον καθορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων και την εκτέλεση ειδικών διαδικασιών. Όλα τα μοντέλα που διαθέτουν οι συντάκτες αναπαρίστανται γραφικά στην πλατφόρμα λογισμικού, μέσω διαγραμμάτων εργασίας τα οποία αποτελούν την πλατφόρμα διάδρασης με το χρήστη. Στοχεύοντας στον εύκολο χειρισμό και την κατανόησή των λειτουργιών τους από το χρήστη, πλαισιώνονται από δομές αρχιεθέτησης, επεξηγηματικές αναφορές και εργαλειοθήκες αντικειμένων που σχετίζονται ειδικά με τη λειτουργία που εξυπηρετεί ο κάθε συντάκτης.

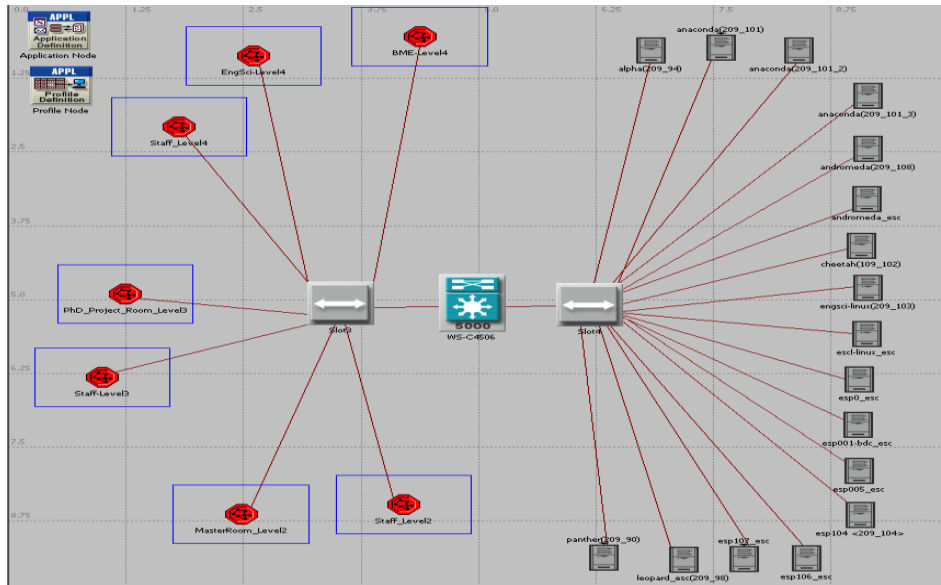
4.2.1 Συντάκτης Σχεδίου (Project Editor)

Ο συντάκτης σχεδίου είναι υπεύθυνος για την υλοποίηση της τοπολογίας ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Ενσωματώνει στοιχεία που ονομάζονται κόμβοι όπως υποδίκτυα (subnets), συσκευές (devices) ή ζεύξεις (links), τα οποία επικοινωνούν και αλληλεπιδρούν σχηματίζοντας το σύστημα του δικτύου. Η μοντελοποίηση σε επίπεδο κόμβων πραγματοποιείται στο περιβάλλον του συντάκτη κόμβου. Το μοντέλο του δικτύου δεν είναι περιοριστικό ως προς τη χρήση κόμβων, καθώς παρέχει πλήρη ελευθερία στο χρήστη σχετικά με το σχεδιασμό της τοπολογίας.

Σημαντικό χαρακτηριστικό του συντάκτη αποτελεί το γεγονός πως επιτρέπει τη γεωγραφική παραμετροποίηση του μοντέλου, προσομοιώνοντας με αυτό τον τρόπο τις επιδράσεις που έχει η απόσταση μεταξύ των κόμβων στην απόδοση του δικτύου. Η βιβλιοθήκη του project editor του OPNET διαθέτει αποθηκευμένους χάρτες παγκόσμιας κλίμακας, αναλυτικούς χάρτες μεγάλων χωρών και πόλεων ή οδικών δικτύων ιδανικούς για προσομιώσεις δικτύων WAN (Wide Area Networks). Υπάρχει επιπλέον και η δυνατότητα ορισμού από το χρήστη οριοθετημένων περιοχών μικρότερης κλίμακας, που προσομοιώνουν δίκτυα όπως ένα κτιριακό συγκρότημα ή μια επιχείρηση, επιπέδου LAN (Local Area Networks) ή ακόμα μικρότερου μεγέθους (πχ ένα γραφείο επιχείρησης) ιδανικά για δίκτυα επιπέδου HAN/BAN (Home/Business Area Networks).

Για λόγους εργονομίας και αποδοτικότερης διαχείρισης της πλατφόρμας εργασίας του χρήστη, ο συντάκτης σχεδίου επιτρέπει το διαχωρισμό του μοντέλου δικτύου σε επίπεδα υποδικτύων (subnets). Τα υποδίκτυα επιτρέπουν το διαμοιρασμό της τοπολογίας σε διαφορετικές επιφάνειες εργασίας και μπορεί να περιέχουν κόμβους ή άλλα υπόδίκτυα. Μια τέτοια προσέγγιση ενδείκνυται για την αναπαράσταση πανομοιότυπων επαναλαμβανόμενων δομών εντός του δικτύου (πχ συστοιχίες Η/Υ master-slaves). Ένας κόμβος που αποτελεί μέρος υποδικτύου εξακολουθεί να αλληλεπιδρά με το βασικό δίκτυο και μπορεί να διασυνδέεται με κόμβους υποδικτύων διαφορετικού επιπέδου. Η ιεραρχική αυτή δόμηση καταλήγει στο χαμηλότερο επίπεδο υποδικτύου, το οποίο κατ' ανάγκην θα

αποτελείται από κόμβους ή συνδέσεις που επικοινωνούν με τα υψηλότερα επίπεδα. Το OPNET διαθέτει τέσσερις διαφορετικούς τύπους υποδικτύων για να ανταποκρίνεται ανάλογα με τις ανάγκες του προσομοιωμένου συστήματος: ο πιο συνηθισμένος είναι το σταθερό υποδίκτυο (subnet), σε δίκτυα με ιδιότητες κινητικότητας χρησιμοποιείται το κινητό υποδίκτυο (mobile subnet), ενώ διαθέσιμα είναι και το δορυφορικό (satellite subnet) και το λογικό υποδίκτυο (logical subnet) που χρησιμοποιούνται σε πιο ιδιαίτερες περιπτώσεις ζεύξεων.



Εικόνα 4.2 Τοπολογία δικτύου στο συντάκτη σχεδίασης (διακρίνονται κόμβοι, ζεύξεις και υποδίκτυα)

Είναι δεδομένο πως σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ασύρματης τεχνολογίας, το ζήτημα της διαχείρισης της κινητικότητας χρήστη εντός δικτύου είναι βασικό. Για το λόγο αυτό, το OPNET μέσω του συντάκτη σχεδίου, προσφέρει δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε σταθερούς κόμβους (fixed/stationary nodes) και κόμβους με δυνατότητα κίνησης: απλούς κινητούς κόμβους (mobile nodes) ή δορυφορικούς κόμβους (satellite nodes) που αφορούν δορυφορικές ζεύξεις. Οι σταθεροί κόμβοι προφανώς διατηρούν τη θέση που τους ορίστηκε εξ αρχής. Οι κινούμενοι κόμβοι ρυθμίζονται κατάλληλα, διαθέτουν μια αρχική θέση και μια προκαθορισμένη τροχιά και εκτελούν χρονικά ορισμένες κινήσεις κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Με τη χρήση κινούμενων κόμβων, το μοντέλο καταφέρνει να αναπαραστήσει με εξαιρετική πιστότητα τη συμπεριφορά δικτύων που ενσωματώνουν ασύρματες ζεύξεις σε συνθήκες κίνησης [25].

Η τελευταία σημαντική παράμετρος που ορίζεται σε αυτό το στάδιο είναι η εγκαθίδρυση επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Η δημιουργία ζεύξεων μεταξύ των στοιχείων του συστήματος είναι απαραίτητη για τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης δικτυακής οντότητας που μπορεί να μελετηθεί. Η κατηγοριοποίηση των ζεύξεων μπορεί να γίνει αφενός από την κατεύθυνση της μετάδοσης σε μονόδρομη (simplex) και αμφίδρομη (duplex) σύνδεση και αφετέρου από τη μορφή της, σε σύνδεση σημείου-προς-σημείο (point-to-point link) μεταξύ δύο σταθερών κόμβων, σε σύνδεση διαύλου (bus link) που αφορά παράλληλη σύνδεση πολλών κόμβων που διαμοιράζονται ένα δίαυλο δεδομένων και σε ασύρματη σύνδεση (radio link) που χρησιμοποιούν υποχρεωτικά οι κινούμενοι

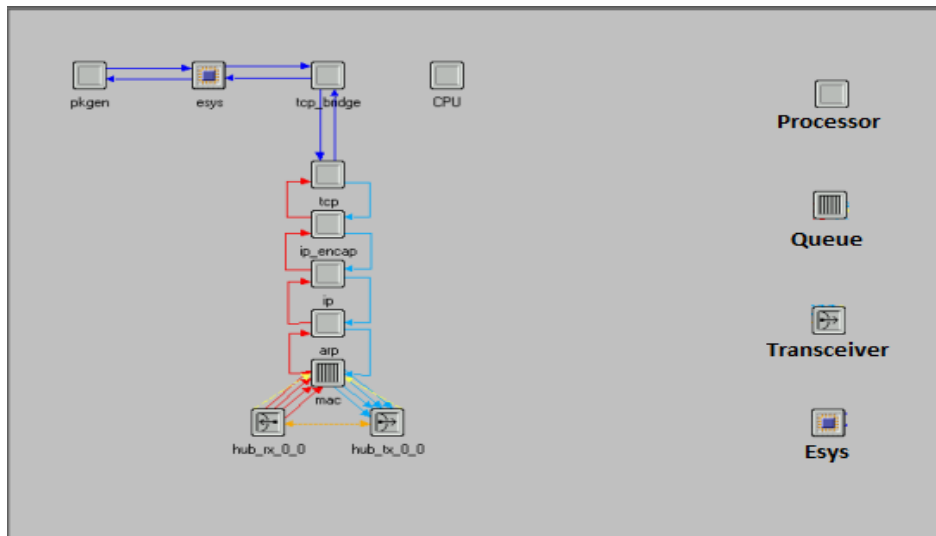
κόμβοι και προαιρετικά οι σταθεροί και προϋποθέτει την ύπαρξη καναλιού ζευγαριού πομπού-δέκτη. Άξιο αναφοράς είναι πως ενώ οι άλλες δύο κατηγορίες ζεύξεων απαιτούν το σχεδιασμό τους από το χρήστη, οι ασύρματες συνδέσεις πραγματοποιούνται αυτόνομα αν υπάρχουν οι κατάλληλοι κόμβοι. Την επιλογή κατάλληλης ζεύξης διευκολύνει η ύπαρξη βιβλιοθήκης στην εφαρμογή, με λεπτομερείς περιγραφές των συνδέσεων και ανάλυση χαρακτηριστικών όπως η ταχύτητα μετάδοσης, τα υλικά κατασκευής, τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα κ.α.

4.2.2 Συντάκτης Κόμβου (Node Editor)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η υλοποίηση της τοπολογίας στο συντάκτη σχεδίου προσδιορίζεται βασιζόμενη σε στοιχεία που συνθέτουν δομικά το δίκτυο και ονομάζονται κόμβοι. Τα στοιχεία αυτά ορίζονται στο συντάκτη κόμβου και η συμπεριφορά τους ανταποκρίνεται σε πραγματικό τεχνικό δικτυακό εξοπλισμό (δρομολογητές, τερματικά δεδομένων, διακόπτες, εξυπηρετητές, σταθμοί εργασίας κλπ). Στο περιβάλλον αυτό, παρέχεται στο χρήστη πρόσβαση στην εσωτερική δομή των κόμβων και αναπαρίσταται η ροή δεδομένων και η στρωματοποίηση πρωτοκόλλων εντός μιας τηλεπικοινωνιακής συσκευής.

Ένα μοντέλο κόμβου αποτελείται από ένα σύνολο δομικών μονάδων (modules), τα οποία προσδιορίζουν μια διαφορετική λειτουργία του κόμβου και επικοινωνούν μεταξύ τους καθορίζοντας τη συνολική λειτουργική συμπεριφορά του. Ανάμεσα στις εφαρμογές τους είναι η δρομολόγηση πακέτων, η εγκαθίδρυση ζεύξεων, η επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων. Ο συντάκτης κόμβου επιτρέπει τη δημιουργία και επεξεργασία modules ανάλογα με τις ανάγκες τους μοντέλου κόμβου. Τα πιο συνηθισμένα είδη modules είναι: οι επεξεργαστές (processors), οι ουρές αναμονής (queues), οι πομποδέκτες (transceivers), οι γεννήτριες μηνυμάτων (generators), οι κεραιές (antennas) και οι μονάδες εξωτερικού συστήματος (Esys – External system module). Οι επεξεργαστές και οι ουρές αποτελούν τα θεμελιώδη στοιχεία γενικού σκοπού σε ένα μοντέλο κόμβου, μοντελοποιώντας λογικές διαδικασίες και είναι πλήρως προγραμματιζόμενα, με τη μοντελοποίησή τους σε αυτό το επίπεδο να γίνεται στο συντάκτη διεργασίας. Η κύρια διαφορά τους έγκειται στη δυνατότητα των queue modules να ενσωματώνουν εφαρμογές αποθήκευσης (buffering) και διαχείρισης πακέτων δεδομένων.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό της εσωτερικής δομής του μοντέλου κόμβου αφορά τις διασυνδέσεις μεταξύ των modules. Οι σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των δομικών στοιχείων ενός κόμβου μπορούν να αναφέρονται σε: ροή πακέτου (packet stream), η οποία περιλαμβάνει διαδικασίες μετάδοσης πακέτων εντός του κόμβου, ροή στατιστικών δεδομένων (statistic stream), η οποία αφορά την αποστολή σημάτων ελέγχου και στατιστικών πληροφοριών λειτουργικών καταστάσεων μεταξύ των modules ή συσχέτιση λογικής λειτουργίας (logical function), η οποία δεν αφορά μετάδοση δεδομένων αλλά χρησιμοποιεί λογικές διαδικασίες για να προσδιορίσει λειτουργικές συμπεριφορές ή δεσμούς μεταξύ στοιχείων (πχ συμβατότητα επικοινωνιακού ζεύγους πομπού-δέκτη).



Εικόνα 4.3 Συντάκτης κόμβου - Εσωτερική δομή μοντέλου κόμβου

4.2.3 Συντάκτης Διεργασίας (Process Editor)

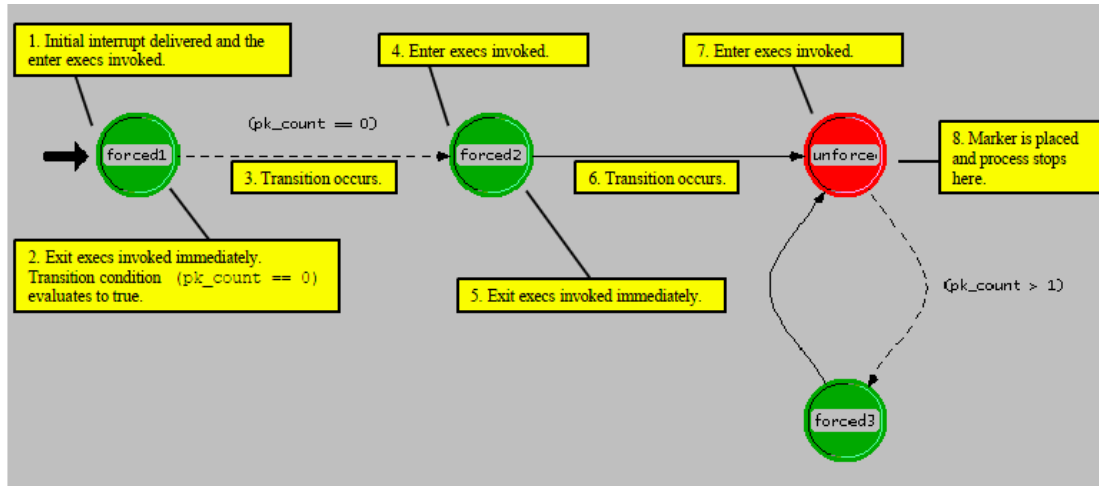
Ο συντάκτης διεργασίας αποτελεί το τρίτο ιεραρχικό επίπεδο, το οποίο αφορά την παραμετροποίηση των κόμβων, όπως είναι ο προγραμματισμός επεξεργαστών που αναφέρθηκε παραπάνω. Ως διεργασία, στο πλαίσιο των υπολογιστικών συστημάτων, μπορεί να θεωρηθεί μια σειρά λογικών διαδικασιών που αφορούν δεδομένα καθώς και οι συνθήκες που προκαλούν αυτές τις διαδικασίες. Άξιες αναφοράς είναι οι εξής αντιστοιχίες που αφορούν το συντάκτη διεργασίας σε σχέση με τους υψηλότερα ιεραρχικά συντάκτες: αφενός, οι διεργασίες εκφράζονται μέσω μοντέλων διεργασιών, με τρόπο αντίστοιχο που οι κόμβοι βασίζονται σε μοντέλα κόμβων και αφετέρου, η σχεδίαση κόμβων βασίζεται στα μοντέλα διεργασιών με τρόπο αντίστοιχο που η σχεδίαση τοπολογίας βασίζεται στα μοντέλα κόμβων. Τα μοντέλα διεργασιών του OPNET, αντιστοιχούν σε πραγματικές διεργασίες δικτυακών συστημάτων όπως οι αλγόριθμοι και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, οι μηχανισμοί συλλογής στατιστικών δεδομένων, οι διαχειριστές διαμοιραζόμενων πόρων ή τα λειτουργικά συστήματα. Ο συντάκτης είναι μια πλατφόρμα που παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία προσδιορισμού των μοντέλων τόσο σε επίπεδο γραφικών όσο και σε επίπεδο κειμένου. Ο χρήστης διαθέτει τη δυνατότητα παραμετροποίησης μέσω κώδικα και από αυτή τη σκοπιά, οι διεργασίες μπορούν να θεωρηθούν αυτόνομα προγράμματα ή υποπρογράμματα-συναρτήσεις που καλούνται για χρήση από το κεντρικό πρόγραμμα.

Η περιγραφή ενός μοντέλου διεργασιών πραγματοποιείται στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Proto-C, μιας γλώσσα προγραμματισμού που βασίζεται στη γλώσσα C και ενσωματώνει διαγράμματα μετάβασης καταστάσεων, προσωρινές μεταβλητές και τη βιβλιοθήκη διαδικασιών πυρήνα (Kernel Procedures – KP) του OPNET. Τα μοντέλα

διεργασιών αναλύονται ευκολότερα μέσω της κατάτμησης των προς εκτέλεση διαδικασιών σε καταστάσεις (states). Η εκτέλεση μιας διεργασίας πάντα εκκινεί από την αρχική κατάσταση (initial state) και διακλαδώνεται σε ένα «δέντρο» καταστάσεων, όπου μια διεργασία (γονέας-parent) οδηγεί στην επόμενη (παιδί-child). Το πρόγραμμα δε θέτει κάποιο όριο στον επιτρεπτό αριθμό καταστάσεων που περιέχει μια διεργασία, η εκτεταμένη χρήση τους όμως δεν αποτελεί συνήθη πρακτική καθώς υπάρχουν πρακτικά ζητήματα που δρουν περιοριστικά και αφορούν την αύξηση της πολυπλοκότητας και κατά συνέπεια του χρόνου προσομοίωσης. Κατά την εκτέλεση μιας διεργασίας, για να προχωρήσει η διαδικασία από μια κατάσταση στην επόμενη, απαιτείται ένας έλεγχος που προσδιορίζεται από τις διαδικασίες μετάβασης (transitions) και συνήθως απαιτεί την επαλήθευση μιας λογικής συνθήκης. Κάθε κατάσταση περιέχει κάποια εκτελέσιμα στοιχεία (executive blocks), εκ των οποίων ορισμένα καλούνται (invoked) κατά την είσοδο της διεργασίας στην κατάσταση (εκτελέσιμα εισόδου – enter executives) και άλλα κατά την έξοδο (εκτελέσιμα εξόδου – exit executives). Για να γίνει η μετάβαση από μια κατάσταση στην επόμενη πρέπει να εκτελεστούν τα εκτελέσιμα εξόδου και να πραγματοποιηθεί ο λογικός έλεγχος που θα επιτρέψει τη μετάβαση ανάλογα με τη συνθήκη που έχει τεθεί. Πολλές φορές η διαδικασία της μετάβασης δεν είναι απόλυτα γραμμική καθώς οι διεργασίες είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να ανταποκρίνονται σε διακοπές (interrupts). Οι διακοπές είναι γεγονότα που απαιτούν από μια διεργασία να παρεκκλίνει από την πορεία της και να ακολουθήσει μια διαδικασία (άφιξη μηνυμάτων, μηδενισμός μετρητών, απελευθέρωση πόρων). Οι καταστάσεις χωρίζονται σε επιβεβλημένες (forced) και μη επιβεβλημένες (unforced) ανάλογα με το αν επιτρέπουν παύσεις και μεσολάβηση διακοπών κατά την εκτέλεση της διεργασίας. Οι επιβεβλημένες καταστάσεις, οι οποίες στα διαγράμματα παριστάνονται γραφικά ως πράσινοι κύκλοι, καλούν τα εκτελέσιμα εισόδου και εξόδου και προχωρούν στον έλεγχο της λογικής συνθήκης και τη μετάβαση, χωρίς να επιτρέψουν διακοπή. Οι μη επιβεβλημένες καταστάσεις (κόκκινοι κύκλοι) καλούν τα εκτελέσιμα εισόδου και με τη χρήση δεικτών «παγώνουν» προσωρινά, μέχρις ότου ξανακληθούν και καλέσουν τα εκτελέσιμα εξόδου και τις διαδικασίες μετάβασης. Μια διαδικασία διακοπής περατώνει με την ολοκλήρωση της πρώτης διεργασίας που κάλεσε.

Η μοντελοποίηση μιας διεργασίας στο συντάκτη βασίζεται στη χρήση διαγραμμάτων μετάβασης καταστάσεων (State Transition Diagrams – STDs), τα οποία ακολουθούν το μαθηματικό μοντέλο ανάλυσης της θεωρίας αυτομάτων σχετικά με τις μηχανές πεπερασμένης κατάστασης (Finite State Machines - FSM) και καθορίζουν το σύνολο καταστάσεων και μεταβάσεων που ακολουθεί η διεργασία. Κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης, σχηματίζεται μια λίστα γεγονότων (event list), η οποία ομαδοποιεί τις προς εκτέλεση διεργασίες και έχει τα εξής χαρακτηριστικά: i) είναι δυναμική, δηλαδή υπάρχει η δυνατότητα προσθαφαίρεσης γεγονότων και ii) επιτρέπει την εκτέλεση μόνο μιας διεργασίας ανά πάσα στιγμή. Οι προσομοιώσεις στο OPNET διατηρούν μια ενιαία καθολική λίστα γεγονότων, τα οποία περιέχουν τα σχετικά με τις διαδικασίες τους δεδομένα, συγχρονίζονται σε ένα κοινό ρολόι και προγραμματίζονται με χρονική σειρά. Η ολοκλήρωση ενός γεγονότος της λίστας είναι απαραίτητη για την εξέλιξη της διαδικασίας προσομοίωσης, καθώς ο χρόνος προσομοίωσης δεν προχωρά κατά την κλήση διεργασιών ή κατά τη μετάβαση μεταξύ καταστάσεων, παρά μόνο με την περάτωση γεγονότων. Για το λόγο αυτό, κατά τη σχεδίαση του μοντέλου διεργασίας ο χρήστης πρέπει να αποφεύγει καταστάσεις

ατελειώτου βρόχου (endless loop) μεταξύ επιβεβλημένων (πράσινων) καταστάσεων ώστε το μοντέλο να καταλήγει σε μη επιβεβλημένη (κόκκινη) κατάσταση και να εξασφαλίζεται η συνέχεια της προσομοίωσης.



Εικόνα 4.4 Παράδειγμα μοντέλου διεργασίας

Όταν ένα γεγονός προκαλεί διακοπή (interrupt) τοποθετείται στην κορυφή της λίστας και πλέον τη διαχείρισή του αναλαμβάνει η πλατφόρμα προσομοίωσης πυρήνα (Simulation Kernel – SK). Η SK παραδίδει το γεγονός στο προοριζόμενο module, το οποίο αποκτά πρόσβαση στα δεδομένα του γεγονότος και με τη σειρά της παραδίδει τα καθήκοντα διαχείρισης στη διεργασία εντός του module. Η διαδικασία της διακοπής ολοκληρώνεται με την SK να επανακτά τον έλεγχο και να διαγράφει το γεγονός από τη λίστα. Η SK διαχειρίζεται τη λίστα γεγονότων χρησιμοποιώντας αποδοτικούς αλγορίθμους ταξινόμησης. Ακόμα και όταν δύο γεγονότα φαινομενικά πραγματοποιούνται ταυτόχρονα κατά την προσομοίωση, στην πραγματικότητα η SK τα εκτελεί διαδοχικά αποφασίζοντας τη σειρά εκτέλεσης, εκτελώντας πρώτο το γεγονός που εισήλθε πρώτο στη λίστα, εκτός κι αν σε κάποιο γεγονός έχει οριστεί δείκτης προτεραιότητας. Η ολοκλήρωση των διεργασιών της λίστας γεγονότων είναι η συνηθέστερη συνθήκη τερματισμού μιας προσομοίωσης αλλά όχι η μοναδική. Η προσομοίωση μπορεί να διακοπεί επίσης λόγω χρονικών περιορισμών που έχουν τεθεί, λόγω κλήσης της τερματικής KP `op_sim_end()` από κάποια διεργασία ή λόγω κάποιου σοβαρού μη αναστρέψιμου σφάλματος (fatal error).

4.3 Οι κόμβοι *Application* και *Profile Config*

Το OPNET διαθέτει τη δυνατότητα εισαγωγής μοντέλων εφαρμογών που ανταποκρίνονται σε πραγματικές εφαρμογές δικτύων και υπολογιστικών συστημάτων, επιτρέποντας τη μελέτη της συμπεριφοράς τους σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Η προσομοίωση της χρήσης μιας εφαρμογής στο περιβάλλον του OPNET, απαιτεί μια διάκριση ανάμεσα σε *μοντέλα εφαρμογών*, τα οποία προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά της ροής δεδομένων που παράγει η εφαρμογή και σε *προφίλ χρήστη*, τα οποία περιγράφουν τη χρήση της εφαρμογής αυτής. Ο προσδιορισμός ενός μοντέλου εφαρμογών συνήθως περιλαμβάνει πληροφορίες όπως ο χρόνος διαμεσολάβησης μεταξύ των αφίξεων πακέτων ή το μέγεθος των δεδομένων ενώ το προφίλ χρήστη προσδιορίζει ποιες εφαρμογές θα χρησιμοποιηθούν, το χρόνο εκκίνησης και τη διάρκειά τους, καθώς και τον τρόπο εκτέλεσής τους. Στο συγκεκριμένο περιβάλλον λογισμικού λοιπόν, η χρήση εφαρμογών απαιτεί τη χρήση αυστηρά ορισμένων προφίλ χρηστών και τον ακριβή προσδιορισμό των κόμβων που θα υποστηρίξουν αυτές τις λειτουργίες. Ένας κόμβος που υποστηρίζει προφίλ χρήστη, χαρακτηρίζεται ως πηγή (source) ή πελάτης (client) ενώ ένας κόμβος που παρέχει υπηρεσίες εφαρμογών ορίζεται ως προορισμός (destination) ή εξυπηρετητής (server).

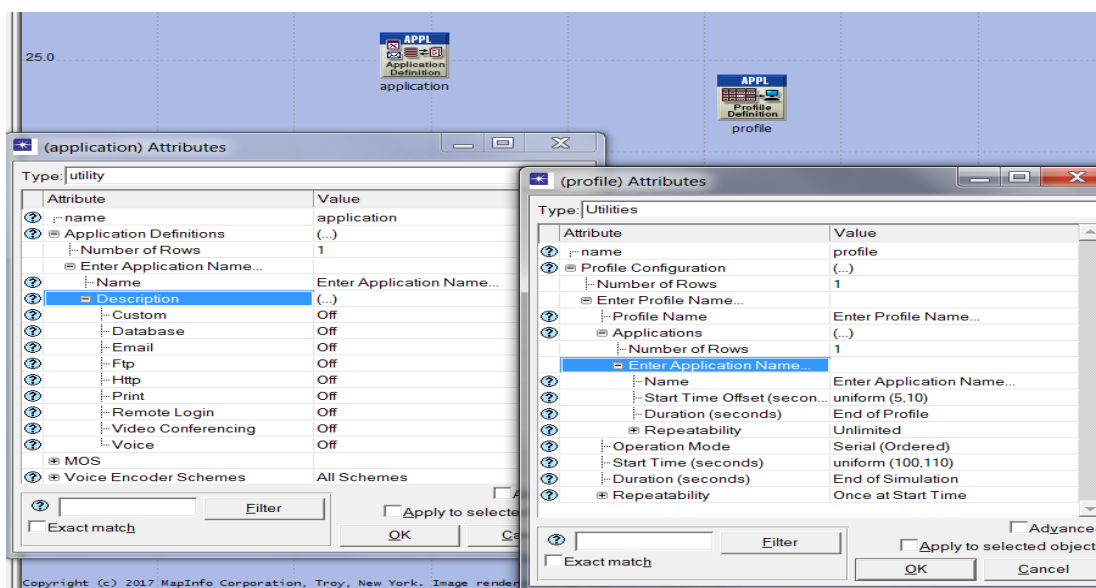
Στη βιβλιοθήκη του συντάκτη σχεδίου, ο χρήστης μπορεί να βρει τους κόμβους *Application Config* και *Profile Config*. Οι κόμβοι αυτοί είναι επιφορτωμένοι με την ευθύνη διαμόρφωσης και παραμετροποίησης των εφαρμογών που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση. Η επιλογή των εφαρμογών που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση γίνεται μέσω του κόμβου *Application Config*, ο οποίος υποστηρίζει μια ευρεία γκάμα εφαρμογών από τις οποίες μπορεί ο χρήστης να επιλέξει ανάλογα με τις ανάγκες προσομοίωσης [25]:

- *Database*: Διαδικασίες εγγραφής ή ανάγνωσης από βάσεις δεδομένων, συναλλαγή πακέτων και αιτήσεις.
- *E-mail*: Αποστολή και λήψη μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.
- *FTP (File Transfer Protocol)*: Αποστολή και λήψη αρχείων.
- *HTTP (HyperText Transfer Protocol)*: Διαδικασίες διαδικτυακής αναζήτησης, φυλλομετρητές.
- *Print*: Υπηρεσίες εκτύπωσης κειμένου, ασπρόμαυρων ή έγχρωμων εικόνων.
- *Remote Login*: Διαδικασίες απομακρυσμένης σύνδεσης μεταξύ εξυπηρετητή και τερματικού.
- *Video Conferencing*: Υπηρεσίες πολυμέσων βίντεο.
- *Voice*: Φωνητικές υπηρεσίες, δυνατότητα διαφορετικών κωδικοποιήσεων.

Οι παραπάνω εφαρμογές διαθέτουν δυνατότητα παραμετροποίησης σύμφωνα με τις επιθυμίες του χρήστη αλλά δίνουν και την επιλογή προεπιλεγμένων ρυθμίσεων. Για παράδειγμα, οι εφαρμογές *database*, *e-mail*, *FTP* και *Remote Login* διαθέτουν προεπιλογές φορτίου δεδομένων και οι εφαρμογές φωνής και βίντεο διαθέτουν επιλογές χαμηλής και υψηλής ανάλυσης.

Μόλις ο χρήστης επιλέξει μία ή περισσότερες εφαρμογές που θέλει να ενσωματώσει στο δίκτυο, πρέπει να ορίσει τους κόμβους που θα υποστηρίζουν υπηρεσίες των εφαρμογών αυτών καθώς και τα προφίλ χρηστών που θα χρησιμοποιούν τις συγκεκριμένες υπηρεσίες. Ο προσδιορισμός των προφίλ χρηστών γίνεται με τη βοήθεια του κόμβου Profile Config. Ο κόμβος αυτός επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει τον αριθμό των διαφορετικών προφίλ που θα περιλαμβάνει η προσομοίωσή του, καθένα από τα οποία υποστηρίζει έναν επιλεγμένο αριθμό εφαρμογών και επιτρέπει την παραμετροποίηση της συμπεριφοράς τους. Καθότι ένα προφίλ χρήστη μπορεί να ενσωματώνει περισσότερες από μία εφαρμογές, ένας κόμβος που υποστηρίζει πολλαπλές εφαρμογές ίσως χρειαστεί να απευθυνθεί σε διαφορετικούς εξυπηρετητές. Εκτός από τις ρυθμίσεις που αφορούν τις εφαρμογές και τη χρήση τους, στον κόμβο Profile Config ρυθμίζεται και η συμπεριφορά των ίδιων των προφίλ χρηστών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μέσω των εξής χαρακτηριστικών [25]:

- *Operation Mode*: Ελέγχει τον τρόπο εκτέλεσης (διαδοχική ή παράλληλη) πολλαπλών εφαρμογών που περιλαμβάνει το προφίλ. Προφανώς η ύπαρξη μίας μοναδικής εφαρμογής δεν απαιτεί κάποια τέτοια ρύθμιση.
- *Start Time*: Προσδιορίζει πότε εκκινεί το προφίλ χρήστη σε σχέση με την εκκίνηση της διαδικασίας προσομοίωσης. Η ρύθμιση γίνεται σε δευτερόλεπτα.
- *Duration*: Προσδιορίζει τη διάρκεια εκτέλεσης του προφίλ (σε δευτερόλεπτα).
- *Repeatability*: Περιγράφει τις διαδικασίες επανεκτέλεσης του προφίλ σε περίπτωση που αυτό ολοκληρωθεί πριν το πέρας της προσομοίωσης.



Εικόνα 4.5 Το μενού ρυθμίσεων των κόμβων Application και Profile Config

Το επόμενο βήμα το οποίο είναι και απαραίτητο για να χρησιμοποιηθεί εν τέλει μία εφαρμογή στην προσομοίωση, είναι ο ορισμός ενός προφίλ χρήστη που υποστηρίζει τη συγκεκριμένη εφαρμογή σε κόμβους – πελάτες. Ο χρήστης μπορεί έπειτα να επιλέξει σε ποιους κόμβους – εξυπηρετητές θα απευθυνθούν οι κόμβοι αυτοί, ρυθμίζοντας τις προτιμήσεις προορισμού (destination preferences).

Κεφάλαιο 5: Περιγραφή μελέτης – Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων

5.1 Σκοπός μελέτης

Η παρούσα διπλωματική εργασία σκοπό έχει να μελετήσει τη χρήση τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές που ενσωματώνει ένα ΕΗΔ. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής τηλεπικοινωνιακών δικτύων τρίτης γενιάς (3G) σε έξυπνα μετρητικά συστήματα, στα πλαίσια του απομακρυσμένου ελέγχου ενός ΣΗΕ.

Η μελέτη αφορά το ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο και προσπαθεί να απαντήσει στο εξής ερώτημα: μπορεί ένας κεντρικός σταθμός ελέγχου, ο οποίος βρίσκεται στην Αθήνα και επικοινωνεί απομακρυσμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης, να διαχειριστεί άμεσα και αξιόπιστα δεδομένα έξυπνων μετρητικών συστημάτων κάνοντας χρήση τηλεπικοινωνιακών δικτύων; Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, τα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα στοχεύουν στην ενσωμάτωση ευφυών συστημάτων στο άμεσο μέλλον. Το ελληνικό δίκτυο δεν αποτελεί εξαίρεση, ιδιαιτέρως αν αναλογιστεί κανείς τις δυνατότητες της χώρας για παραγωγή από ΑΠΕ. Ένα από τα βήματα που γίνονται ήδη προς αυτή την κατεύθυνση υπό την επίβλεψη του ΔΕΔΔΗΕ, είναι η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών, αρχικά σε μια συγκεκριμένη μερίδα καταναλωτών και σταδιακά σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια. Η Κρήτη αποτελεί μια εξαιρετική επιλογή για την εγκατάσταση ευφυών μετρητικών συστημάτων καθώς ήδη διαθέτει ένα πολύ οργανωμένο διασυνδεδεμένο δίκτυο διανομής και εγκαταστάσεις διεσπαρμένης παραγωγής. Η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου του ηλεκτρικού δικτύου του νησιού από την Αθήνα, όπου και εδρεύουν οι κύριες εγκαταστάσεις, αποτελεί πρόκληση για τους διαχειριστές του δικτύου και θα παρείχε τεράστια ευελιξία στο σύστημα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κομμάτι της εργασίας, οι ασύρματες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες και ειδικότερα οι υπηρεσίες κυψελωτών δικτύων αποτελούν μία από τις επικρατέστερες επιλογές για εφαρμογές των ΕΗΔ σε επίπεδο NAN και WAN, όπως είναι η διαχείριση των μετρητικών συστημάτων και των συστημάτων ελέγχου που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη. Ως εκ τούτου, το πρωτόκολλο επικοινωνίας που επιλέχθηκε για το σκοπό αυτό είναι το UMTS, καθώς αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία ανάμεσα στις υπηρεσίες κυψελωτών δικτύων, διαθέτοντας την πιο ευρεία εφαρμογή, τους πιο υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και μια σειρά από πλεονεκτήματα ακόμη.

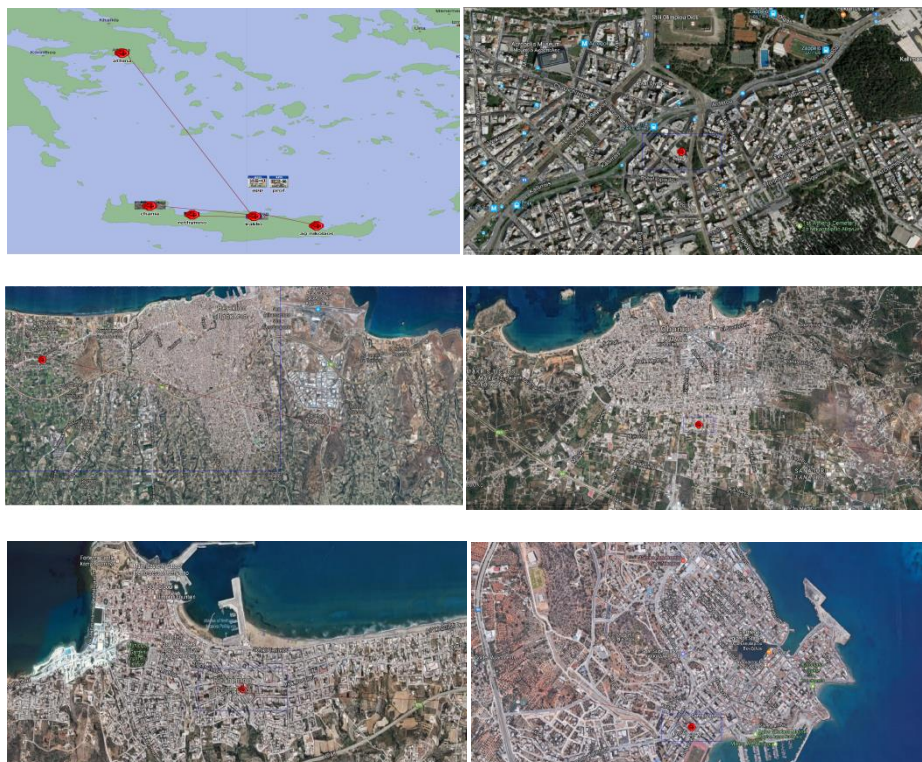
5.2 Περιγραφή σεναρίων προσομοίωσης

Η πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του σεναρίου προσομοίωσης είναι το λογισμικό τηλεπικοινωνιακού σκοπού OPNET Modeler της Riverbed. Το περιβάλλον προσομοίωσης που ενσωματώνει, παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία στον ενδιαφερόμενο μηχανικό/χρήστη ώστε να σχεδιάσει ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών και να το παραμετροποιήσει κατάλληλα, ώστε να ανταποκρίνεται στα χαρακτηριστικά του αντίστοιχου πραγματικού δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, είναι σε θέση να λάβει επαρκώς ακριβή δεδομένα σχετικά με τη συμπεριφορά του συστήματος, χωρίς να απαιτείται η εγκατάσταση ή η χρήση εξοπλισμού.

Η παρούσα μελέτη αφορά το ελληνικό δίκτυο και ως εκ τούτου η σχεδίαση έχει βασιστεί στους ενσωματωμένους παγκόσμιους χάρτες του OPNET καθώς και εξωτερικούς χάρτες, εστιάζοντας στην Ελλάδα και ειδικότερα στις περιοχές της Αθήνας και της Κρήτης. Η τοπολογία αφορά τις εγκαταστάσεις των κτηρίων του ΔΕΔΔΗΕ στην Αθήνα (Περραιβού 20 & Καλλιρόης 5), στο Ηράκλειο (Ελ. Βενιζέλου 14, Τσαλικάκι Γαζίου), στο Ρέθυμνο (Κ. Παπαδάκη 17), στα Χανιά (Λίμνη Τσοντού – Μουρνιές) και στον Άγιο Νικόλαο (Λατούς 5). Οι κεντρικές εγκαταστάσεις του ΔΕΔΔΗΕ στην Αθήνα και στις τέσσερις μεγάλες πόλεις της Κρήτης επιλέχθηκαν ως η επικρατέστερη επιλογή σε περίπτωση μελλοντικής εγκατάστασης ευφών συστημάτων καθώς ήδη διαθέτουν επεκτάσιμες υποδομές και συστήματα ελέγχου αξιοποιήσιμα από το ΕΗΔ.

Η υλοποίηση της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε με σκοπό να εξετάσει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης και διαχείρισης του δικτύου της Κρήτης από την Αθήνα, ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνει από τις μετρήσεις έξυπνων συστημάτων. Η τεχνολογία που επιλέχθηκε για τη συλλογή των μετρητικών δεδομένων είναι το ασύρματο τηλεπικοινωνιακό πρωτόκολλο κυψελωτού δικτύου UMTS. Η τοπολογία σχεδιάστηκε με σκοπό να ικανοποιήσει το ακόλουθο υποθετικό σενάριο: στις κτιριακές εγκαταστάσεις του ΔΕΔΔΗΕ καθεμίας από τις τέσσερις πόλεις της Κρήτης, εγκαθίσταται ένα δίκτυο UMTS το οποίο συγκεντρώνει τα δεδομένα των εγκατεστημένων έξυπνων μετρητών που διαθέτει η πόλη και τα αποστέλλει ενσύρματα σε βάσεις δεδομένων στο κεντρικό σύστημα του Ηρακλείου. Το κέντρο ελέγχου του Ηρακλείου με τη σειρά του επικοινωνεί ενσύρματα με το δίκτυο της Αθήνας, όπου οι ειδικές υποδομές ελέγχου και παρακολούθησης πραγματοποιούν τις απαραίτητες διαδικασίες ελέγχου. Εκτελέστηκαν τρία σενάρια προσομοίωσης, τα οποία διαφοροποιούνταν ως προς τον αριθμό των μετρητών σε κάθε πόλη ή τον όγκο μετρητικών δεδομένων, με σκοπό να αναλυθεί η απόδοση της UMTS τεχνολογίας συναρτήσει των μεγεθών αυτών. Προκειμένου να διευκολυνθεί ο χειρισμός της τοπολογίας και να γίνει πιο πρακτική διαχείριση του δικτύου, χρησιμοποιήθηκαν υποδίκτυα (subnets), τα οποία αναπαριστούν τις κτιριακές εγκαταστάσεις του ΔΕΔΔΗΕ σε κάθε πόλη. Τα υποδίκτυα των Χανίων, του Ρεθύμνου και του Αγ. Νικολάου διασυνδέονται με εκείνο του Ηρακλείου και εκείνο με τη σειρά του επικοινωνεί με το υποδίκτυο της Αθήνας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1 λίγο παρακάτω.

Η μελέτη εστιάζει αποκλειστικά και μόνο στα χαρακτηριστικά επικοινωνίας των εν λόγω διασυνδέσεων προκειμένου να αποφανθεί για την αποτελεσματική ή μη πρακτική εφαρμογή ενός τέτοιου εγχειρήματος. Για το λόγο αυτό δεν εξετάζει καθόλου τα συστήματα που προηγούνται ή έπονται της συγκεκριμένης τοπολογίας και ως εκ τούτου θεωρεί τα δεδομένα που προκύπτουν από τους έξυπνους μετρητές, γνωστά ως προς το μέγεθος και τη μορφή τους. Τα δεδομένα αυτά παραμετροποιήθηκαν στον κόμβο Application Config. Η εφαρμογή συναλλαγής με βάσεις δεδομένων (database) επιλέχτηκε ως η καταλληλότερη σε αντιστοιχία με τη διαδικασία μετάδοσης μετρητικών δεδομένων που προσομοιώνεται στη μελέτη ενώ το μέγεθος που επιλέχτηκε για τα δεδομένα κάθε μετρητή διαφοροποιείται σε κάθε σενάριο. Κοινό και για τα τρία σενάρια ορίστηκε το ποσοστό αιτήσεων ερωτημάτων ως προς τις αιτήσεις εγγραφών στο 50% των συνολικών συναλλαγών λόγω της αμφίδρομης μετάδοσης πληροφοριών, καθώς και ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο συναλλαγές δεδομένων, ο οποίος ρυθμίστηκε ώστε να ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέση τιμή τα 12 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 5.1 i) Πάνω αριστερά: Χάρτης Ελλάδας ii) Πάνω δεξιά: Χάρτης Αθήνας iii) Κέντρο αριστερά: Χάρτης Ηρακλείου iv) Κέντρο δεξιά: Χάρτης Χανίων v) Κάτω αριστερά: Χάρτης Ρεθύμνου vi) Κάτω δεξιά: Χάρτης Αγ. Νικολάου (τα υποδίκτυα αντιστοιχούν στις θέσεις των κτηρίων του ΔΕΔΔΗΕ)

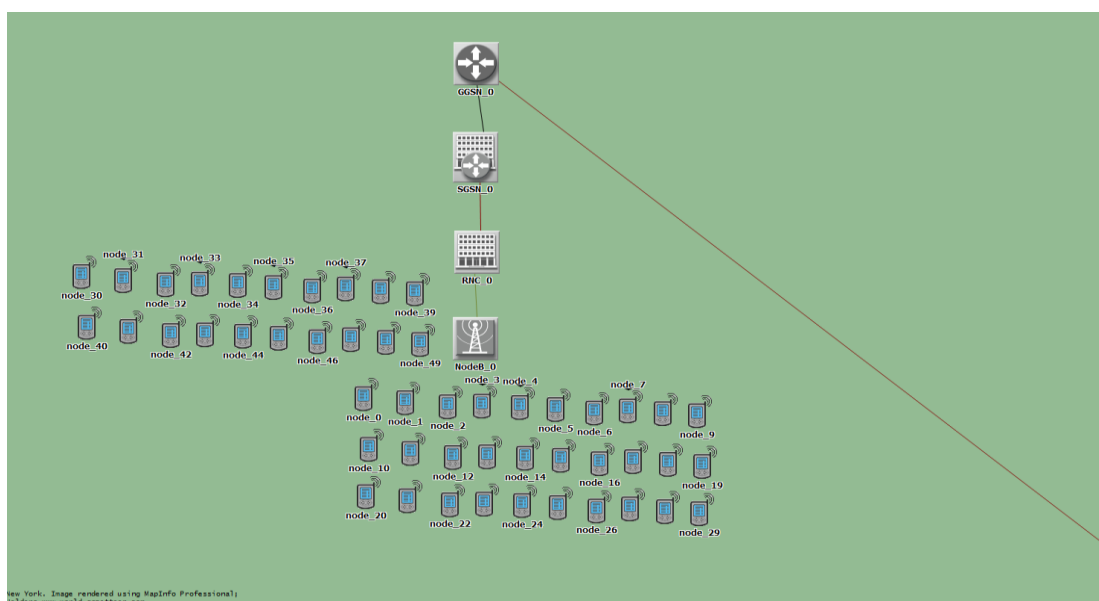
Στον κόμβο Profile Config, ορίστηκε το προφίλ χρήστη το οποίο υποστηρίζουν οι τερματικές συσκευές, δηλαδή οι έξυπνοι μετρητές. Το προφίλ αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή database που ορίστηκε στον Application Config και ρυθμίστηκε έτσι ώστε να εκκινεί 20 έως 110 δευτερόλεπτα μετά την εκκίνηση της προσομοίωσης και να διαρκεί μέχρι το τέλος της. Κάθε μετρητής λοιπόν διαφοροποιείται από τους υπόλοιπους μόνο ως προς το χρονικό σημείο στο οποίο ξεκινά να στέλνει δεδομένα.

5.2.1 Σενάριο πρώτο: 50 μετρητές σε κάθε πόλη / 50 bytes ανά μετρητή

Για τις ανάγκες αυτού του σεναρίου, πραγματοποιήθηκε η κατάλληλη ρύθμιση στον κόμβο Application Config ώστε κάθε μετρητής να μεταδίδει δεδομένα μεγέθους 50 bytes, τιμή η οποία έχει προκύψει πειραματικά στο εργαστήριο. Για τη σχεδίαση του επιθυμητού UMTS δικτύου χρησιμοποιήθηκε η κατάλληλη βιβλιοθήκη του OPNET και ακολουθήθηκε η αρχιτεκτονική δομή των εν λόγω δικτύων, όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σε κάθε πόλη της Κρήτης, εντός των υποδικτύων (subnets), υλοποιήθηκε ένα δίκτυο που υποστηρίζει τη συγκεκριμένη τεχνολογία και περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- 1 κόμβο GGSN
- 1 κόμβο SGSN
- 1 κόμβο RNC
- 1 σταθμό βάσης Node-B
- 50 κόμβους εξοπλισμού χρήστη (workstations)

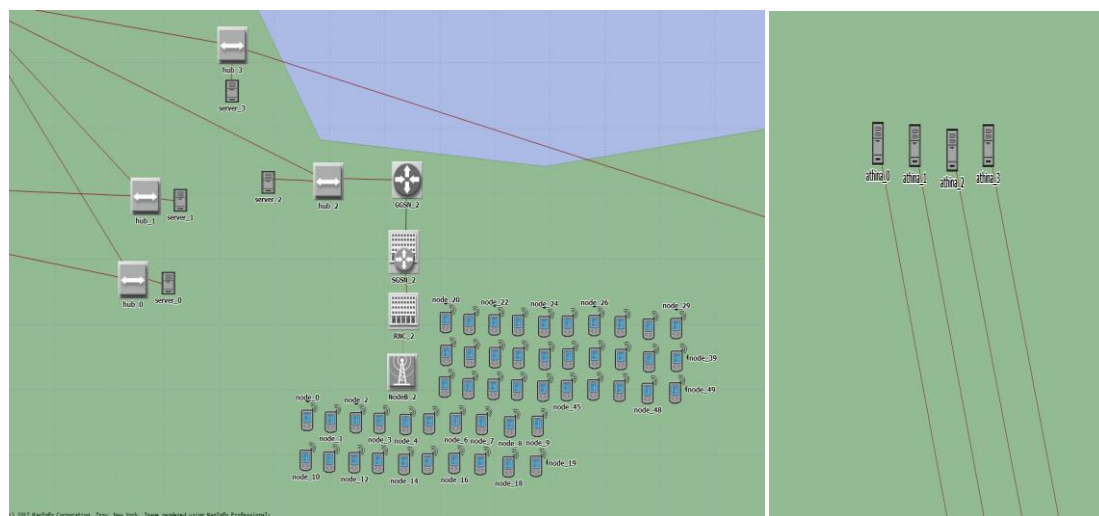
Η επιλογή των μοντέλων κόμβων πραγματοποιήθηκε από τη βιβλιοθήκη UMTS_advanced που ενσωματώνει ο Modeler. Για την επιλογή των κόμβων GGSN, SGSN και RNC μοναδικό κριτήριο ήταν οι διασυνδέσεις που επιτρέπουν καθώς είναι και το μόνο χαρακτηριστικό που τους διαφοροποιεί. Για τους κόμβους σταθμών βάσης, επιλέχτηκε το μοντέλο του σταθμού βάσης 6 τομέων (6sector Node-B), του οποίου η αρχή λειτουργίας περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η επιλογή έγινε με κριτήριο τη χρήση κατευθυντικών κεραιών που θεωρείται κατάλληλη σε ένα αστικό περιβάλλον όπως αυτό των πόλεων της Κρήτης. Η επιλογή των κόμβων χρήστη έγινε με σκοπό την αναπαράσταση των έξυπνων μετρητών και πραγματοποιήθηκε κατάλληλη γραφική οπτικοποίηση ώστε να προσομοιάζουν μετρητικές συσκευές. Το μοντέλο κόμβου που επιλέχτηκε ήταν ο σταθμός εργασίας (workstation) χωρίς δυνατότητα μετακίνησης, δεδομένου ότι οι μετρητές είναι σταθερά εγκατεστημένοι.



Εικόνα 5.2 Τοπολογία δικτύου UMTS (50 χρήστες)

Σε κάθε πόλη πραγματοποιήθηκε πανομοιότυπος σχεδιασμός του δικτύου UMTS (εικόνα 5.2). Οι κόμβοι χρηστών υποστηρίζουν το προφίλ χρήστη που ορίστηκε στον κόμβο Profile Config. Στους κόμβους GGSN, SGSN και RNC ανατέθηκε μια συγκεκριμένη ταυτότητα (ID) για να μπορεί να γίνει προσδιορισμός τους από άλλους κόμβους. Κάθε SGSN αναφέρεται στον αντίστοιχο GGSN της πόλης του, κάθε Node-B αναφέρεται στον αντίστοιχο RNC και κάθε κόμβος χρήστη εξυπηρετείται από τον αντίστοιχο SGSN. Στους κόμβους SGSN ρυθμίστηκε επίσης κατάλληλα ο χρονομετρητής 3350 που αφορά τη συνδιαλλαγή πακέτων ώστε να εξυπηρετούνται οι χρήστες.

Η πόλη του Ηρακλείου, εκτός από την τοπολογία UMTS δικτύου που περιγράφεται παραπάνω, περιλαμβάνει και τις βάσεις δεδομένων που συγκεντρώνουν τα δεδομένα από όλες τις πόλεις της Κρήτης και τα αποστέλλουν στην Αθήνα. Η αναπαράσταση αυτού του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση 4 εξυπηρετητών (servers) και διαμετακομιστών (hubs) τεχνολογίας Ethernet, έναν για κάθε πόλη. Κάθε server ρυθμίστηκε ώστε να υποστηρίζει την εφαρμογή database, όπως αυτή ορίστηκε στον κόμβο Application Config. Επιπλέον, οι κόμβοι εξοπλισμού χρήστη σε κάθε πόλη, παραμετροποιήθηκαν κατάλληλα ώστε να διαθέτουν ως προτιμώμενο προορισμό (destination preference) αποστολής δεδομένων τον αντίστοιχο server κάθε πόλης. Τέλος, υλοποιήθηκε η αναπαράσταση του κεντρικού συστήματος ελέγχου της Αθήνας, το οποίο συγκεντρώνει τα δεδομένα μέσω του Ηρακλείου. Για το σκοπό αυτό, 4 servers οι οποίοι επίσης υποστηρίζουν την εφαρμογή database, τοποθετήθηκαν στην πόλη της Αθήνας.



Εικόνα 5.3 Τοπολογία δικτύου i) Ηρακλείου (αριστερά) ii) Αθήνας (δεξιά)

Για τις διασυνδέσεις μεταξύ των στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μοντέλα ζεύξεων:

- Γραμμές 100BaseT (υποστηρίζουν συνδέσεις Ethernet ταχύτητας 100 Mbps)
- Γραμμές PPP_DS3 (υποστηρίζουν IP συνδέσεις ταχύτητας 44.736 (\approx 45) Mbps)
- Γραμμές ATM_SONET_OC3 (υποστηρίζουν ATM συνδέσεις ταχύτητας 148.6 Mbps)

Συγκεκριμένα, οι κόμβοι RNC και Node-B του UTRAN διασυνδέονται μέσω ATM_SONET_OC3, οι κόμβοι RNC και SGSN διασυνδέονται μέσω 100BaseT και οι κόμβοι SGSN και GGSN του CN διασυνδέονται με γραμμές PPP_DS3. Οι κόμβοι χρηστών επικοινωνούν ασύρματα με τους σταθμούς βάσης, όπως ορίζει η αρχή λειτουργίας του UMTS δικτύου. Όσον αφορά την επικοινωνία με τις βάσεις δεδομένων, δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί ασύρματα λόγω απόστασης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται συνδέσεις Ethernet μέσω γραμμών 100BaseT. Η διεπικοινωνία όλων των στοιχείων επιτυγχάνεται μέσω των διαμετακομιστών (hubs) και απαιτεί τη διασύνδεση του κόμβου GGSN κάθε πόλης με το αντίστοιχο hub, το οποίο με τη σειρά του επικοινωνεί με τον αντίστοιχο server σε Ηράκλειο και Αθήνα.

5.2.2 Σενάριο δεύτερο: 50 μετρητές σε κάθε πόλη / 50 kB ανά μετρητή

Το σενάριο αυτό υλοποιήθηκε με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου σε αυξημένες ανάγκες μεταφοράς δεδομένων. Η τοπολογία έμεινε απaráλλακτη σε σχέση με το πρώτο σενάριο και η μόνη αλλαγή στις παραμέτρους του δικτύου πραγματοποιήθηκε στον κόμβο Application Config όπου η τιμή που αφορούσε τα δεδομένα κάθε μετρητή αυξήθηκε από τα 50 bytes στα 50 kB. Στο πραγματικό δίκτυο, πακέτα μετάδοσης τέτοιου μεγέθους μπορεί να προκύψουν είτε ενσωματώνοντας πρόσθετες εφαρμογές στους έξυπνους μετρητές, είτε λαμβάνοντας μετρήσεις πολύ συχνότερα και για περισσότερα ηλεκτρικά και όχι μόνο μεγέθη. Παρουσιάζει ως εκ τούτου ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη της απόκρισης ενός δικτύου απομακρυσμένα ελεγχόμενου, στις αισθητά αυξημένες αυτές απαιτήσεις.

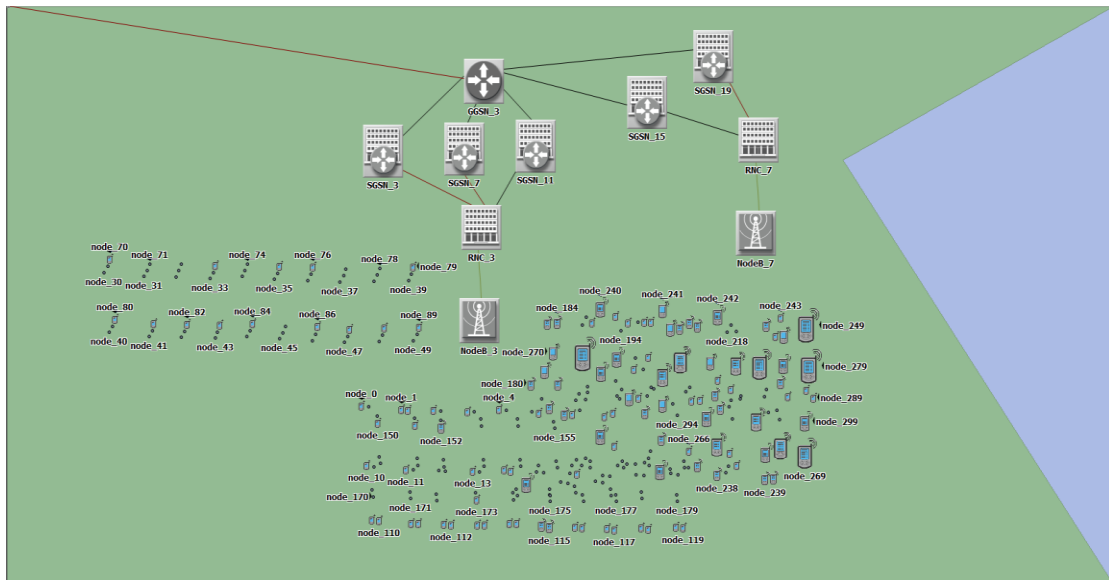
5.2.3 Σενάριο τρίτο: 300 μετρητές σε κάθε πόλη / 50 bytes ανά μετρητή

Για τις ανάγκες του τρίτου σεναρίου, τα δεδομένα σε κάθε μετρητή ορίστηκαν εκ νέου στα 50 bytes μέσω του κόμβου Application Config αλλά αυτή τη φορά το UMTS δίκτυο κάθε πόλης εξυπηρετεί 300 χρήστες. Αξίζει να σημειωθεί πως η αρχική σχεδίαση πραγματοποιήθηκε για 500 κόμβους ανά πόλη αλλά κατέστη αδύνατο να συλλεχθούν αποτελέσματα λόγω αδυναμίας του υπολογιστικού συστήματος στο οποίο εκτελέστηκε η προσομοίωση να καλύψει τις ανάγκες σε μνήμη. Το σενάριο αυτό στοχεύει στη μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου όταν καλείται να εξυπηρετήσει μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Στο πραγματικό δίκτυο, το συγκεκριμένο σενάριο θα μπορούσε να εξετάζει την απόκριση ενός έξυπνου μετρητικού συστήματος εγκατεστημένο σε πελάτες Μέσης Τάσης.

Οι τύποι των κόμβων και των μεταξύ τους ζεύξεων παρέμειναν ίδιοι αλλά χρειάστηκε να διαμορφωθεί κατάλληλα η τοπολογία του δικτύου προκειμένου να επιτευχθεί η ενσωμάτωση των νέων κόμβων χρηστών. Συγκεκριμένα, το δίκτυο κάθε πόλης περιλαμβάνει:

- 1 κόμβο GGSN
- 5 κόμβους SGSN
- 2 κόμβους RNC
- 2 σταθμούς βάσης Node-B
- 300 κόμβους εξοπλισμού χρήστη (workstations)

Η αύξηση του αριθμού των τερματικών κόμβων χρήστη συνεπάγεται την αδυναμία εξυπηρέτησης από έναν μόνο κόμβο SGSN. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν 5 κόμβοι SGSN σε παράλληλη σύνδεση στους οποίους ισομοιράστηκε η εξυπηρέτηση των κόμβων-μετρητών. Λόγω περιορισμού στο όριο επιτρεπτών διασυνδέσεων του κόμβου RNC, χρειάστηκε η προσθήκη ενός ακόμα κόμβου RNC στον οποίο ανατέθηκε νέα ID και ενός σταθμού βάσης που αναφέρεται σε αυτόν. Καινούρια ID ανατέθηκε επίσης και στους 4 νέους κόμβους SGSN που προστέθηκαν. Όλοι οι SGSN αναφέρονται στον κόμβο GGSN της πόλης τους ενώ οι κόμβοι χρήστη ομαδοποιήθηκαν ανά 60 ώστε να αναφέρονται σε κάθε έναν από τους 5 διαφορετικούς SGSN.



Εικόνα 5.4 Τοπολογία δικτύου UMTS (300 χρήστες)

Τα δίκτυα διαμετακομιστών και εξυπηρετητών του Ηρακλείου και της Αθήνας δεν υπέστησαν κάποια αλλαγή ως προς την τοπολογία και την παραμετροποίησή τους. Δεν υπήρξε καμία αλλαγή ούτε σε σχέση με τις διασυνδέσεις μεταξύ των κόμβων. Οι κόμβοι SGSN που προστέθηκαν, διασυνδέονται με τους GGSN κόμβους με γραμμές PPP_DS3 ενώ η επιλογή των μοντέλων ζεύξης με τους κόμβους RNC πραγματοποιήθηκε με βάση τις επιτρεπτές διασυνδέσεις που ορίζει το μοντέλο κόμβου RNC στη βιβλιοθήκη του OPNET. Τρεις κόμβοι SGSN συνδέονται με τον πρώτο κόμβο RNC και δύο κόμβοι SGSN συνδέονται με το δεύτερο κόμβο RNC σε κάθε πόλη, ενώ τρεις από τις μεταξύ τους ζεύξεις πραγματοποιούνται μέσω 100BaseT και δύο μέσω PPP_DS3.

5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Η υλοποίηση των παραπάνω δικτύων και η εκτέλεση προσομοιώσεων για κάθε σενάριο που περιγράφηκε, πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη συλλογή αποτελεσμάτων σχετικά με διάφορες ενδιαφέρουσες παραμέτρους του δικτύου. Προκειμένου να καταστεί εφικτή η πρόσβαση σε αυτές τις πληροφορίες, απαιτείται πριν την προσομοίωση να οριστούν τα στατιστικά που ενδιαφέρουν το χρήστη. Η πλατφόρμα του Modeler παρέχει τη δυνατότητα επιλογής παρουσίασης στατιστικών καθολικών μεταβλητών (Global Statistics), μεταβλητών κόμβων (Node Statistics) και μεταβλητών ζεύξεων (Link Statistics). Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, οι προς εξέταση και ανάλυση γραφικές παραστάσεις αφορούν τα παρακάτω στατιστικά:

Global Statistics:

- *DB Entry Response Time (sec)*: αφορά το χρόνο που παρήλθε μεταξύ της αποστολής ενός αιτήματος εγγραφής από μία εφαρμογή στη βάση δεδομένων (Database Entry Application) προς τον εξυπηρετητή και της λήψης του πακέτου απόκρισης. Περιλαμβάνει όλα τα πακέτα απόκρισης που έχουν σταλεί από τον εξυπηρετητή στην αντίστοιχη εφαρμογή.
- *DB Entry Traffic Received (bytes/sec)*: περιλαμβάνει το μέσο αριθμό bytes που προωθούνται ανά δευτερόλεπτο από το επίπεδο μεταφοράς (transport layer) του δικτύου σε όλες τις εφαρμογές εγγραφής σε βάση δεδομένων.
- *DB Entry Traffic Sent (bytes/sec)*: περιλαμβάνει το μέσο αριθμό bytes που υποβάλλονται ανά δευτερόλεπτο από όλες τις εφαρμογές εγγραφής σε βάση δεδομένων στο επίπεδο μεταφοράς του δικτύου.
- *DB Query Response Time (sec)*: αφορά το χρόνο που παρήλθε μεταξύ της αποστολής ενός αιτήματος ερωτήματος από μία εφαρμογή στη βάση δεδομένων (Database Query Application) προς τον εξυπηρετητή και της λήψης του πακέτου απόκρισης. Περιλαμβάνει όλα τα πακέτα απόκρισης που έχουν σταλεί από τον εξυπηρετητή στην αντίστοιχη εφαρμογή.
- *DB Query Traffic Received (bytes/sec)*: περιλαμβάνει το μέσο αριθμό bytes που προωθούνται ανά δευτερόλεπτο από το επίπεδο μεταφοράς (transport layer) του δικτύου σε όλες τις εφαρμογές ερωτήματος σε βάση δεδομένων.
- *DB Query Traffic Sent (bytes/sec)*: περιλαμβάνει το μέσο αριθμό bytes που υποβάλλονται ανά δευτερόλεπτο από όλες τις εφαρμογές ερωτήματος σε βάση δεδομένων στο επίπεδο μεταφοράς του δικτύου.
- *UMTS GMM (per QOS) End-to-End Delay (sec)*: αφορά την από άκρη σε άκρη καθυστέρηση των IP πακέτων από τους κόμβους αποστολής μέχρι τους τερματικούς κόμβους προορισμού UE. Συλλέγεται για κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσιών ξεχωριστά.

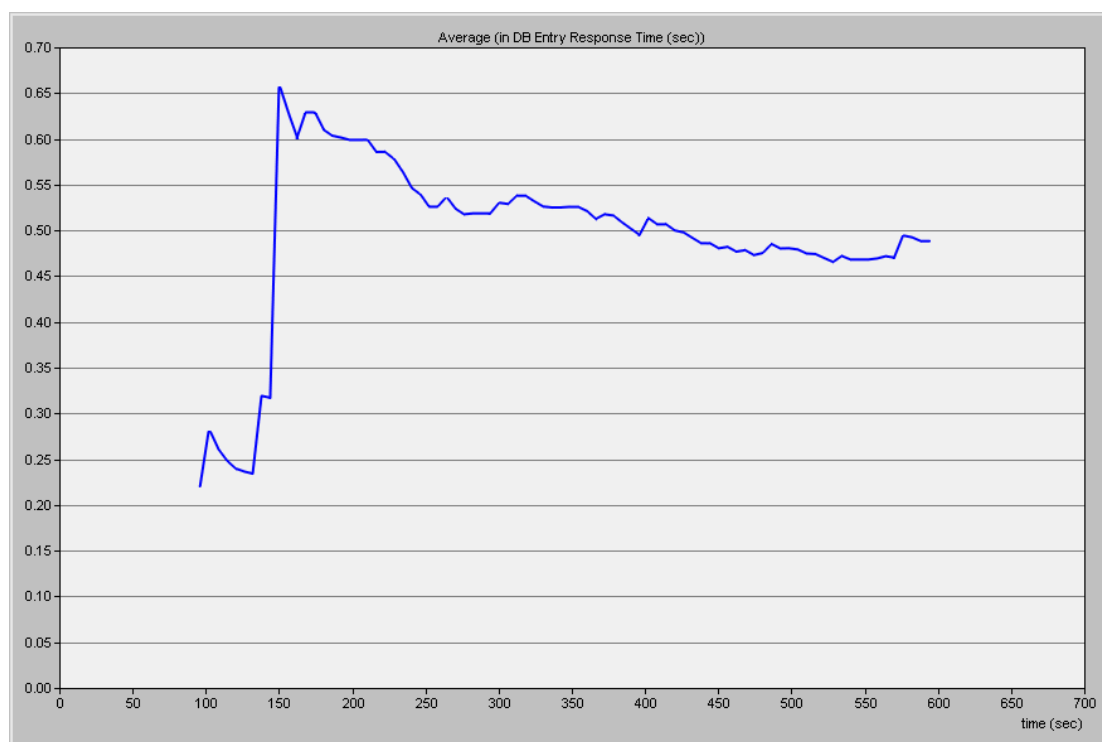
Node Statistics:

- *UMTS UE Total Received Throughput (bits/sec)*: περιγράφει τη συνολική κίνηση δεδομένων σε bits από το δίκτυο πρόσβασης UTRAN σε κάθε τερματικό κόμβο εξοπλισμού χρήστη κάθε δευτερόλεπτο.
- *UMTS UE Total Transmit Load (bits/sec)*: περιγράφει τη συνολική κίνηση δεδομένων σε bits του φορτίου που μεταδίδει κάθε τερματικός κόμβος προς το δίκτυο πρόσβασης κάθε δευτερόλεπτο.

Αφού ορίστηκαν και οι μεταβλητές που πρόκειται να εξεταστούν, η μόνη διαδικασία που εκκρεμεί αφορά τη ρύθμιση των παραμέτρων προσομοίωσης. Επιλέχθηκε η προσομοίωση διακριτών γεγονότων (Discrete Event Simulation – DES) και ορίστηκε χρονικό διάστημα 10 λεπτών, ως δείγμα φόρτου λειτουργίας του συστήματος για ένα τυχαίο δεκάλεπτο μέσα στη μέρα.

5.3.1 Αποτελέσματα πρώτου σεναρίου

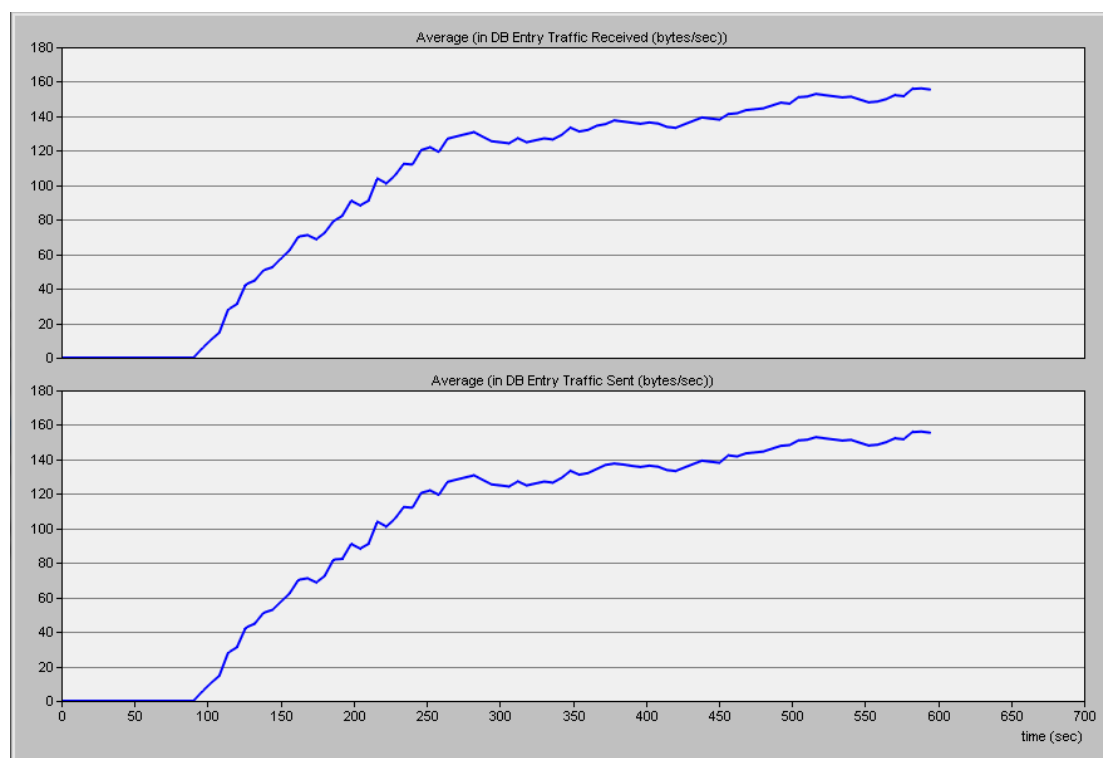
Για το δίκτυο του πρώτου σεναρίου που περιλαμβάνει 50 χρήστες-έξυπνους μετρητές ανά πόλη και 50 bytes δεδομένων για κάθε μετρητή προέκυψαν οι ακόλουθες γραφικές:



Εικόνα 5.5 Average Database Entry Response Time (50 χρήστες, 50 bytes)

Το γράφημα της εικόνας 5.5 παρουσιάζει το μέσο χρόνο που μεσολαβεί ανάμεσα στην αποστολή αιτήματος εγγραφής μιας εφαρμογής στη βάση δεδομένων ενός συνδρομητή και στη λήψη του πακέτου απόκρισης από τον εξυπηρετητή. Όπως είναι φανερό, η μέση τιμή ακολουθεί ορισμένες αυξομειώσεις και εμφανίζει μια απότομη άυξη προτού τελικά σταθεροποιηθεί κοντά στο μισό δευτερόλεπτο. Η άυξη αυτή πιθανότατα οφείλεται στη συσσώρευση αιτημάτων χρηστών καθώς εμφανίζεται αμέσως μετά το χρονικό σημείο που σηματοδοτεί την ένταξη όλων των χρηστών στο δίκτυο (110 sec). Η απόκριση αυτή είναι αρκετά ικανοποιητική καθώς επιτρέπει την ενημέρωση των απομακρυσμένων συστημάτων ελέγχου σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

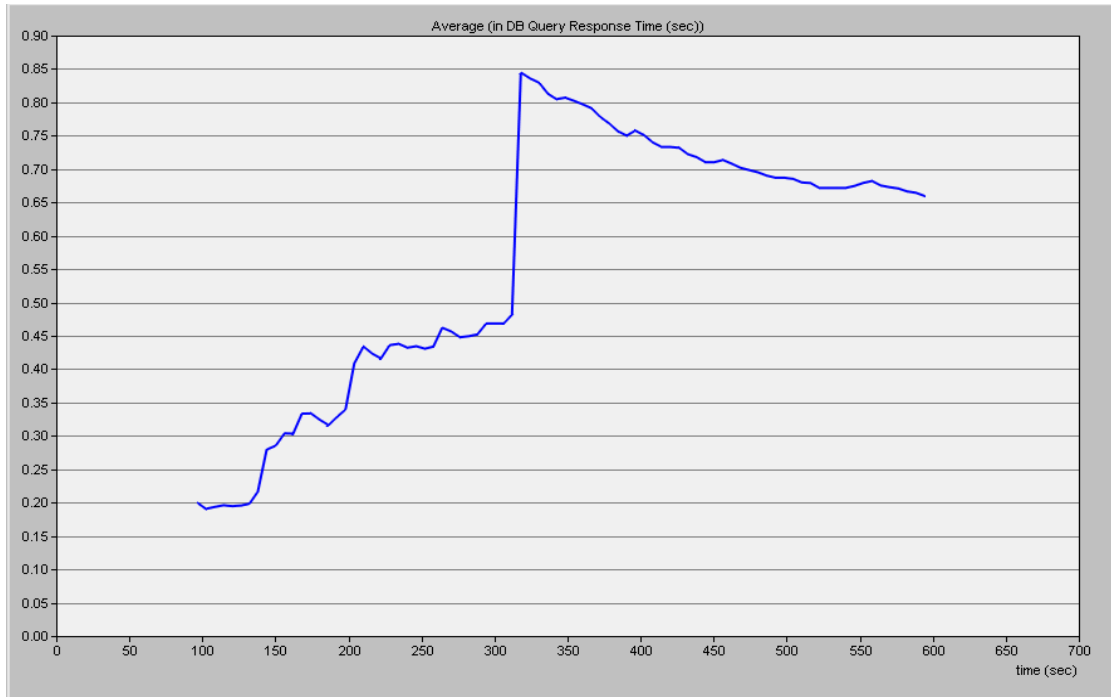
Στη συνέχεια ακολουθούν τα γραφήματα που παρουσιάζουν την ικανότητα αποστολής και λήψης δεδομένων όλων των εφαρμογών εγγραφής ή εισόδου:



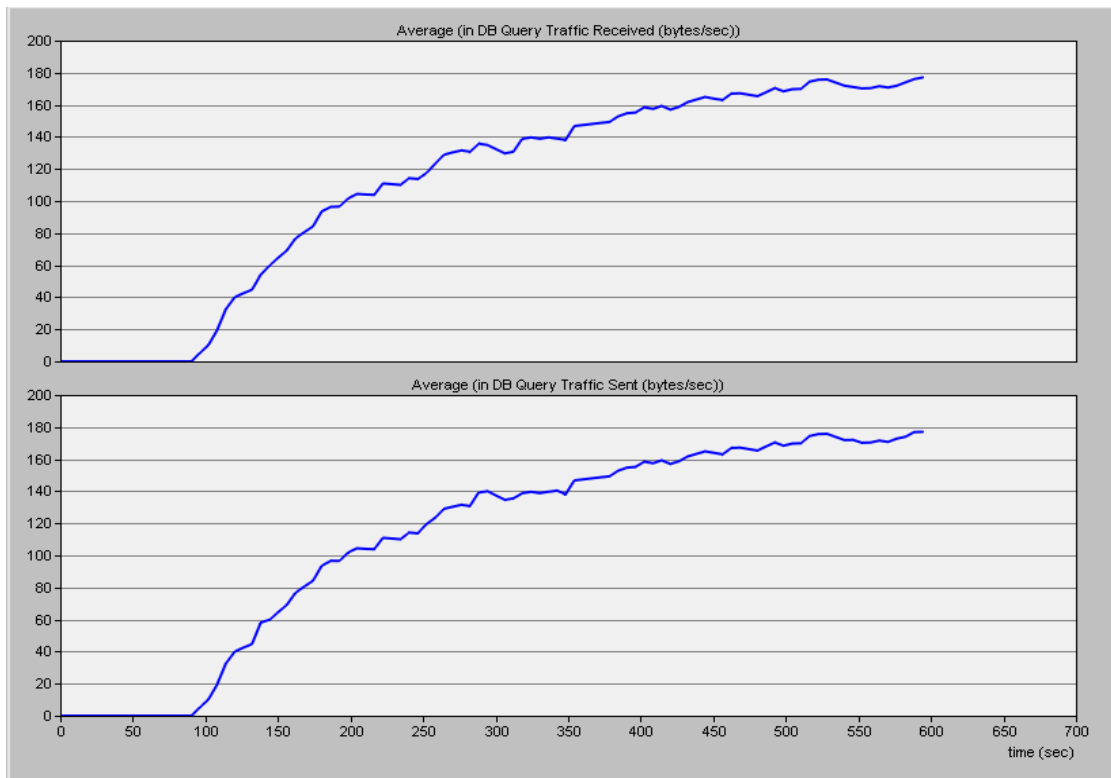
Εικόνα 5.6 i) Average Database Entry Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Entry Traffic Sent (κάτω)
(50 χρήστες, 50 bytes)

Παρατηρείται πως οι δύο γραφικές της εικόνας 5.6 είναι σχεδόν πανομοιότυπες. Ο μέσος αριθμός των μεταδιδόμενων bytes ανά δευτερόλεπτο ακολουθεί αύξουσα πορεία, γεγονός αναμενόμενο λόγω της σταδιακής συσσώρευσης δεδομένων στο δίκτυο και φτάνει τη μέγιστη τιμή των 160 bytes/sec. Γνωρίζοντας την αναλογία μεταξύ byte και bit, είναι εύκολο υπολογίσιμο πως η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ταχύτητα 1280 bits/sec, δηλαδή περίπου 1.25 kbps.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη που αφορούν την εξυπηρέτηση αιτήσεων ερωτημάτων των εφαρμογών στις βάσεις δεδομένων των συνδρομητών:



Εικόνα 5.7 Average Database Query Response Time (50 χρήστες, 50 bytes)

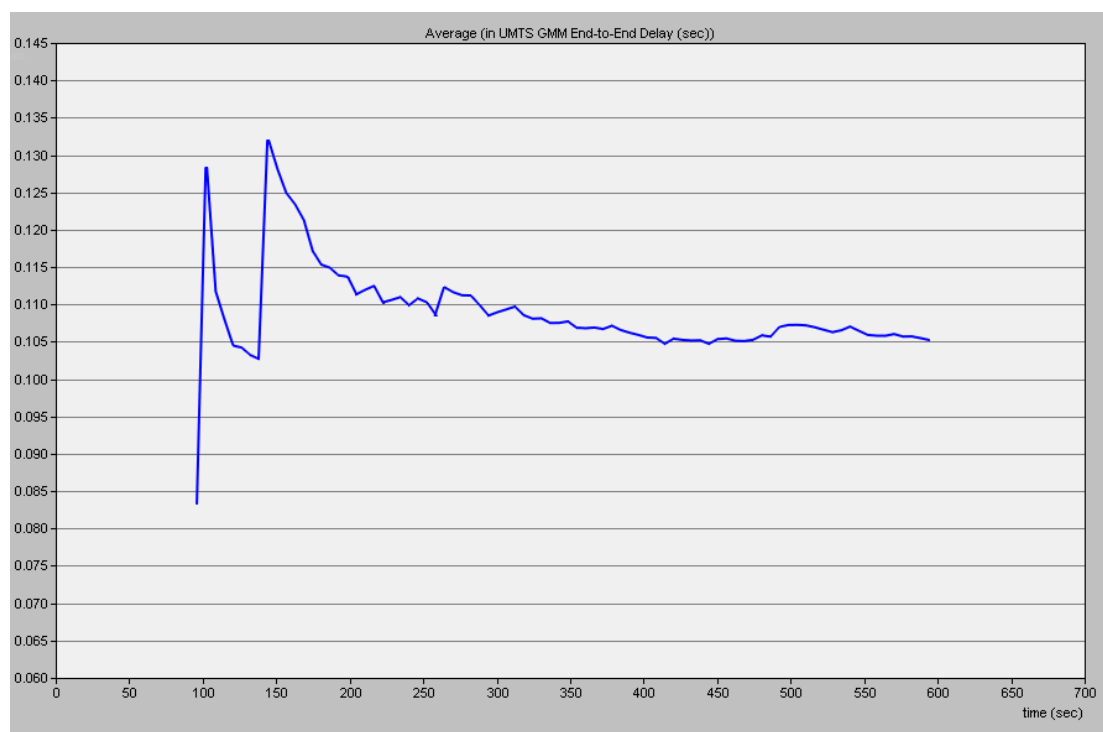


Εικόνα 5.8 i) Average Database Query Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Query Traffic Sent (κάτω) (50 χρήστες, 50 bytes)

Όπως και στο γράφημα της εικόνας 5.5, έτσι και το γράφημα της εικόνας 5.7 το οποίο παρουσιάζει το μέσο χρόνο που μεσολαβεί ανάμεσα στην αποστολή αιτήματος ερωτήματος μιας εφαρμογής στη βάση δεδομένων ενός συνδρομητή και στη λήψη του πακέτου απόκρισης από τον εξυπηρετητή ακολουθεί αυξομειώσεις, χαρακτηρίζεται από μια απότομη άυξηση (η οποία επέρχεται όμως αργότερα) και σταθεροποιείται σε μια αρκετά ικανοποιητική τιμή κοντά στα 0.65 sec.

Αντίστοιχα, η συμπεριφορά των γραφικών της εικόνας 5.8 ομοιάζει με εκείνων της εικόνας 5.6. Ακολουθεί άυξουσα πορεία με μέγιστη μέση τιμή τα 180 bytes/sec (1440 bits/sec ή 1.4 kbps).

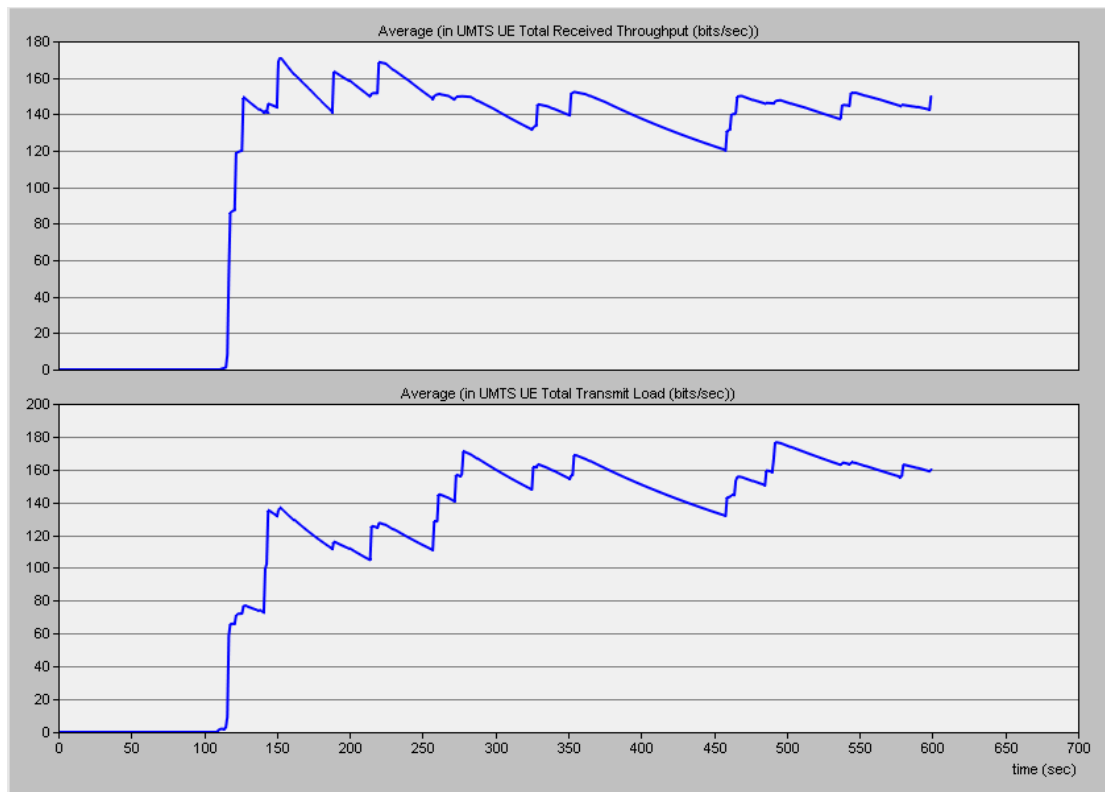
Το επόμενο γράφημα παρουσιάζει το μέσο χρόνο της από άκρη σε άκρη καθυστέρησης στη μετάδοση δεδομένων από τις βάσεις δεδομένων στους τερματικούς κόμβους χρηστών:



Εικόνα 5.9 Average End-to-End Delay (50 χρήστες, 50 bytes)

Όπως είναι φανερό, το γράφημα της εικόνας 5.9 αρχικά παρουσιάζει μια αιχμή (peak), πιθανότατα λόγω της ταυτόχρονης συσσώρευσης αιτημάτων συνδρομητών, αλλά στη συνέχεια σταθεροποιείται κοντά στην ικανοποιητική τιμή των 105 ms.

Τέλος, ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η επισκόπηση των γραφημάτων που μελετούν τη συμπεριφορά τυχαίων κόμβων χρηστών-έξυπνων μετρητών δεδομένου ότι το UMTS είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο και δεν είναι δεδομένη η αποτελεσματική εξυπηρέτηση όλων των συνδρομητών του.

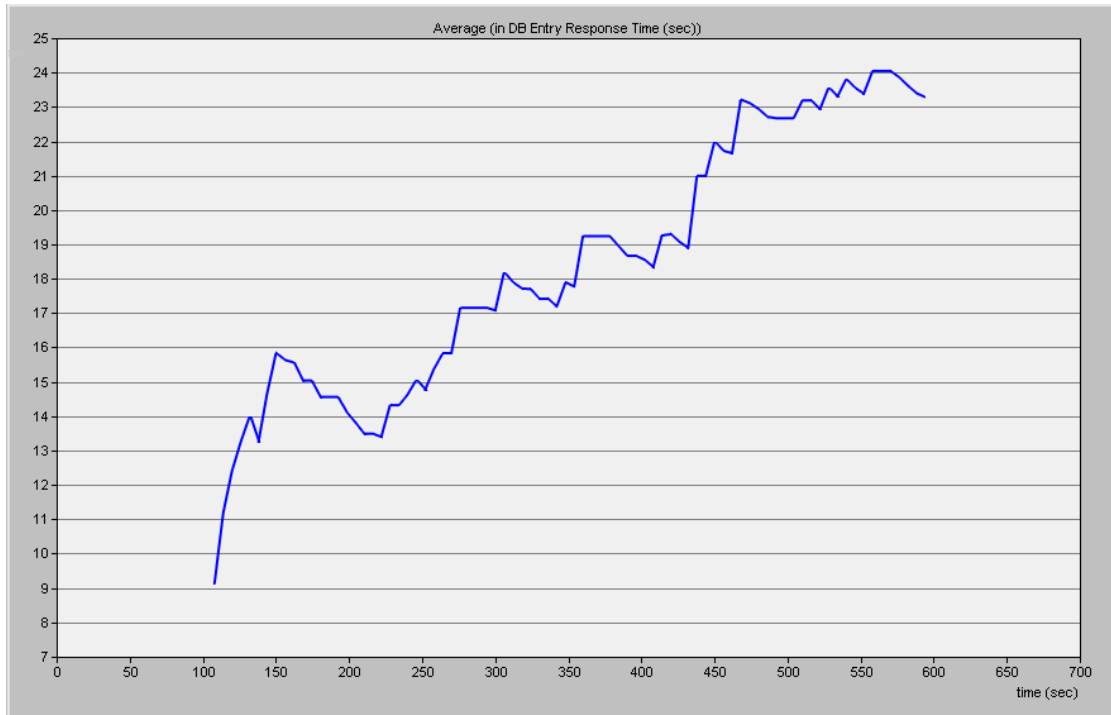


Εικόνα 5.10 i) Average UE Received Throughput (πάνω) ii) Average UE Transmit Load (κάτω)
(50 χρήστες, 50 bytes)

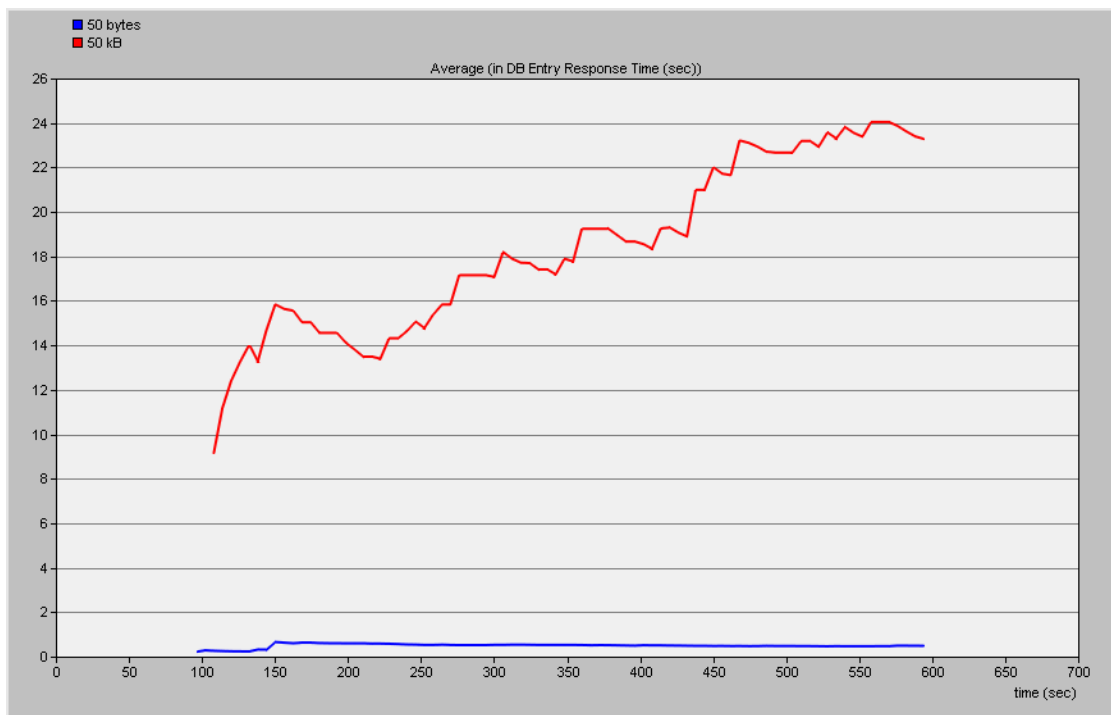
Οι γραφικές της εικόνας 5.10 παρουσιάζουν τον όγκο δεδομένων σε bits ανά δευτερόλεπτο που έλαβε και απέστειλε ένας τυχαίος τερματικός κόμβος UE του δικτύου. Όπως φαίνεται στο γράφημα, η μέση τιμή της ταχύτητας μετάδοσης κυμαίνεται λίγο κάτω από τα 0.2 kbps. Ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι το γεγονός πως η συμπεριφορά του συγκεκριμένου κόμβου δεν είναι ενδεικτική για τη συμπεριφορά του συνόλου των κόμβων. Συγκεκριμένα, γραφικές που προέκυψαν από άλλους κόμβους στην ίδια προσομοίωση, είχαν διαφορετική επίδοση ενώ πολλοί είχαν σχεδόν μηδενική ή μηδενική απόκριση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη δυαδική λογική εξυπηρέτησης του UMTS δικτύου, το οποίο είτε επιτρέπει πλήρως λειτουργικές ζεύξεις σε ορισμένους κόμβους είτε αδυνατεί να εξυπηρετήσει εξολοκλήρου άλλους. Η μηδενική απόκριση μεγάλου αριθμού των κόμβων χρηστών αποτελεί και την κύρια αιτία της ανεπαρκούς επίδοσης του δικτύου στην εξυπηρέτηση των αιτημάτων όπως παρατηρήθηκε σε προηγούμενες γραφικές.

5.3.2 Αποτελέσματα δεύτερου σεναρίου

Το δίκτυο του δεύτερου σεναρίου περιλαμβάνει 50 χρήστες-έξυπνους μετρητές ανά πόλη και 50 kB δεδομένων για κάθε μετρητή. Για το δίκτυο αυτό, προέκυψαν οι ακόλουθες γραφικές:



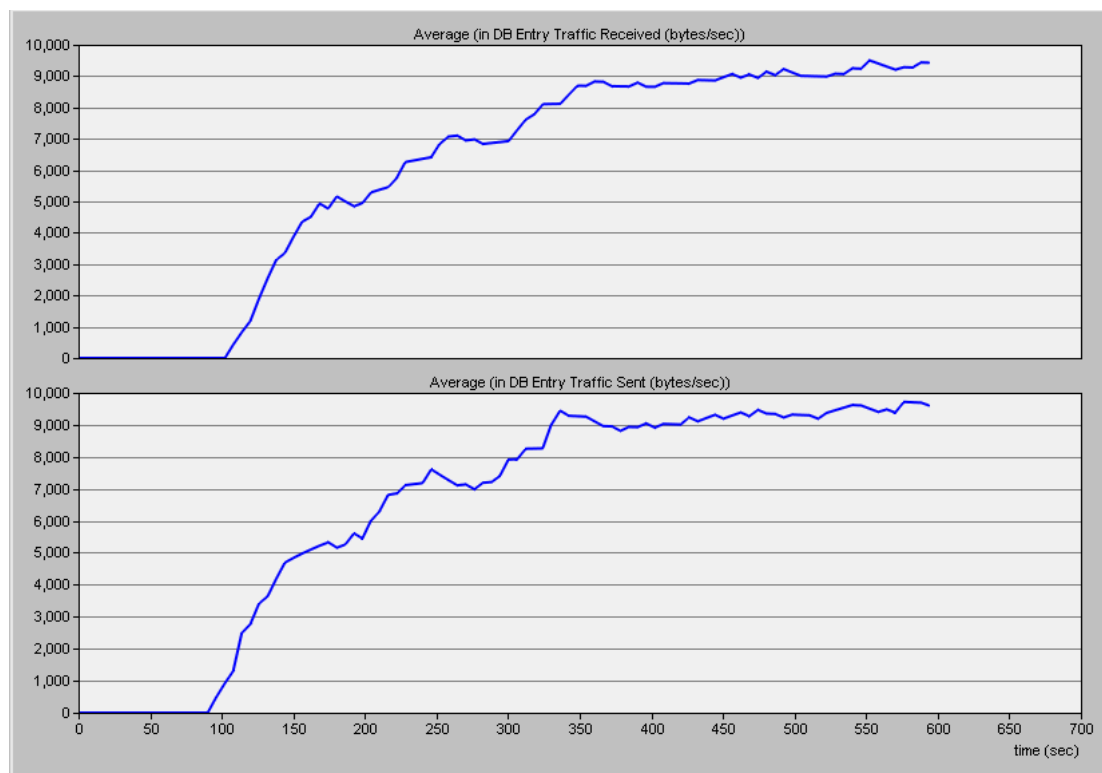
Εικόνα 5.11 Average Database Entry Response Time (50 χρήστες, 50 kB)



Εικόνα 5.12 Σύγκριση Average Database Entry Response Time (50 χρήστες, 50 bytes – 50 χρήστες, 50 kB)

Όπως φαίνεται στο γράφημα της εικόνας 5.11, η μέση χρονική απόκριση στα αιτήματα εγγραφής των εφαρμογών στις βάσεις δεδομένων διαρκώς αυξάνεται, φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 24 δευτερολέπτων. Προφανώς η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο μεγάλο όγκο δεδομένων τα οποία όσο περνάει η ώρα συσσωρεύονται και το σύστημα αδύναται να εξυπηρετήσει άμεσα. Αν η προσομοίωση διαρκούσε παραπάνω, η απόκριση θα αυξανόταν περαιτέρω. Μια τέτοια επίδοση σαφώς δεν μπορεί να εξυπηρετήσει υπηρεσίες ανταλλαγής δεδομένων που απαιτούν επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο αλλά είναι αποδεκτή δεδομένης φυσικά και της απόστασης που εξυπηρετεί το δίκτυο. Η άυξηση σε σχέση με τη χρονική απόκριση του δικτύου του πρώτου σεναρίου είναι πολύ μεγάλη και αναμενόμενη καθώς το σύστημα καλείται να διαχειριστεί δεδομένα πολύ μεγαλύτερου μεγέθους. Η τεράστια διαφορά στη χρονική απόκριση των αιτημάτων εγγραφής μεταξύ των δύο σεναρίων για ίδιο αριθμό χρηστών αλλά διαφορετικό όγκο δεδομένων διαφαίνεται ξεκάθαρα στο συγκριτικό γράφημα της εικόνας 5.12.

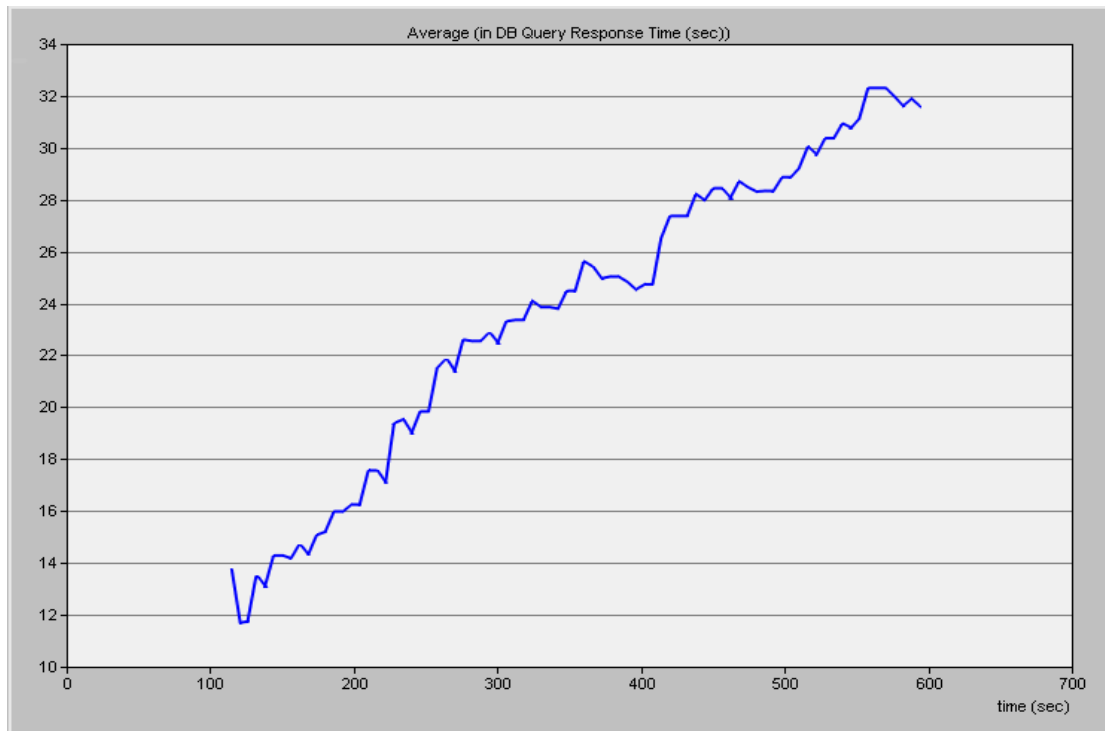
Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα γραφήματα που αφορούν την αποστολή και λήψη δεδομένων των εφαρμογών εγγραφής ή εισόδου:



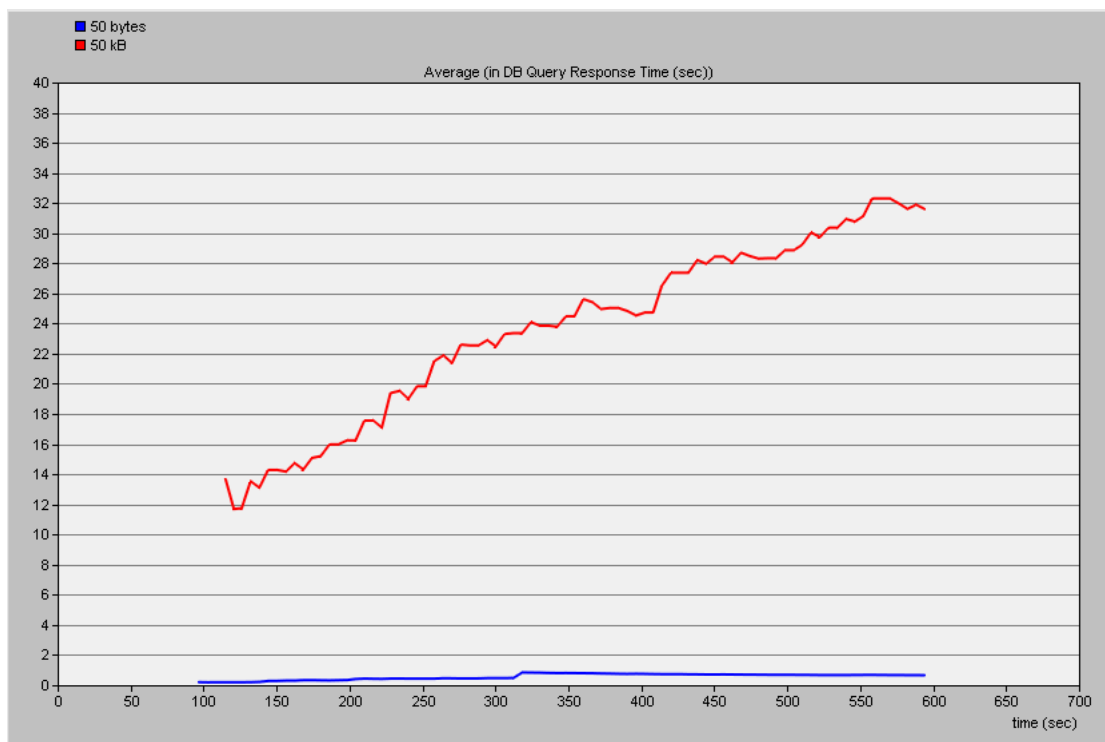
Εικόνα 5.13 i) Average Database Entry Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Entry Traffic Sent (κάτω)
(50 χρήστες, 50 kB)

Στο σενάριο αυτό, οι αιτήσεις εγγραφών εξυπηρετούνται με ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 9.500 bytes ανά δευτερόλεπτο (76.000 bits/sec ή 74.2 kbps), όπως φαίνεται στην εικόνα 5.13.

Αντίστοιχα, για τις εφαρμογές που υποβάλλουν αιτήματα ή ερωτήματα στις βάσεις δεδομένων, τα γραφήματα είναι τα εξής:

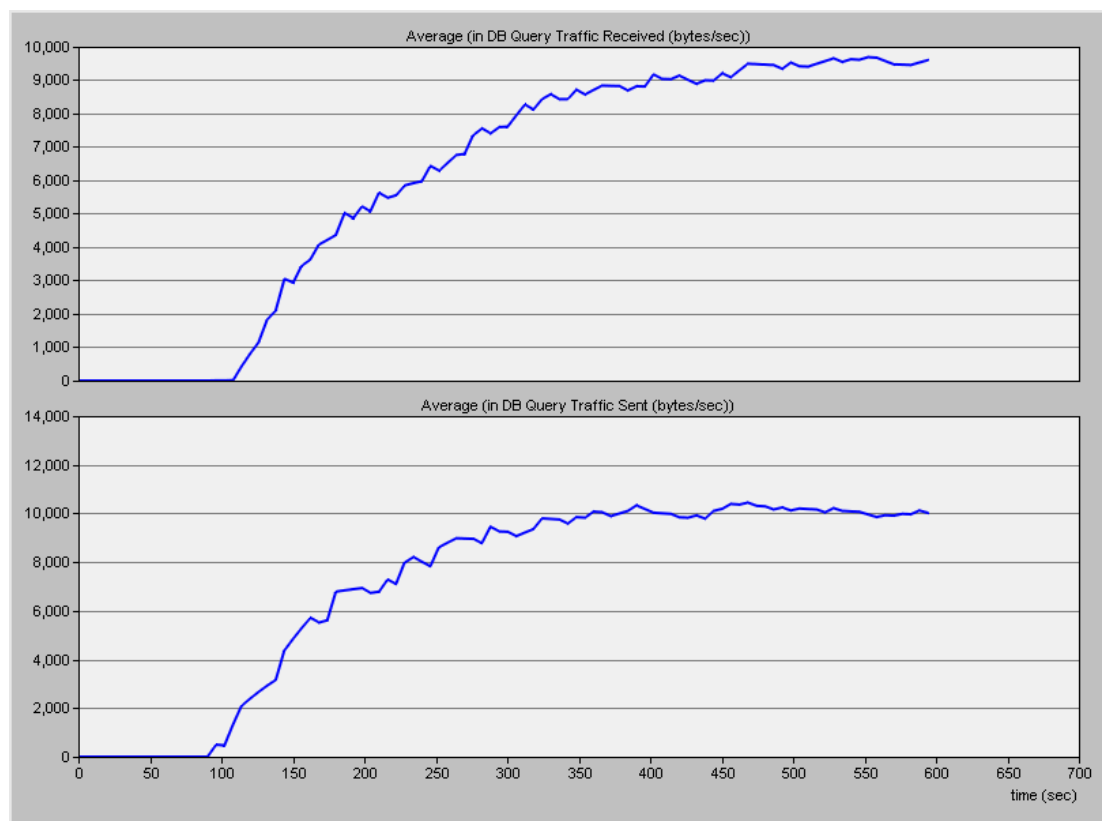


Εικόνα 5.14 Average Database Query Response Time (50 χρήστες, 50 kB)



Εικόνα 5.15 Σύγκριση Average Database Query Response Time (50 χρήστες, 50 bytes – 50 χρήστες, 50 kB)

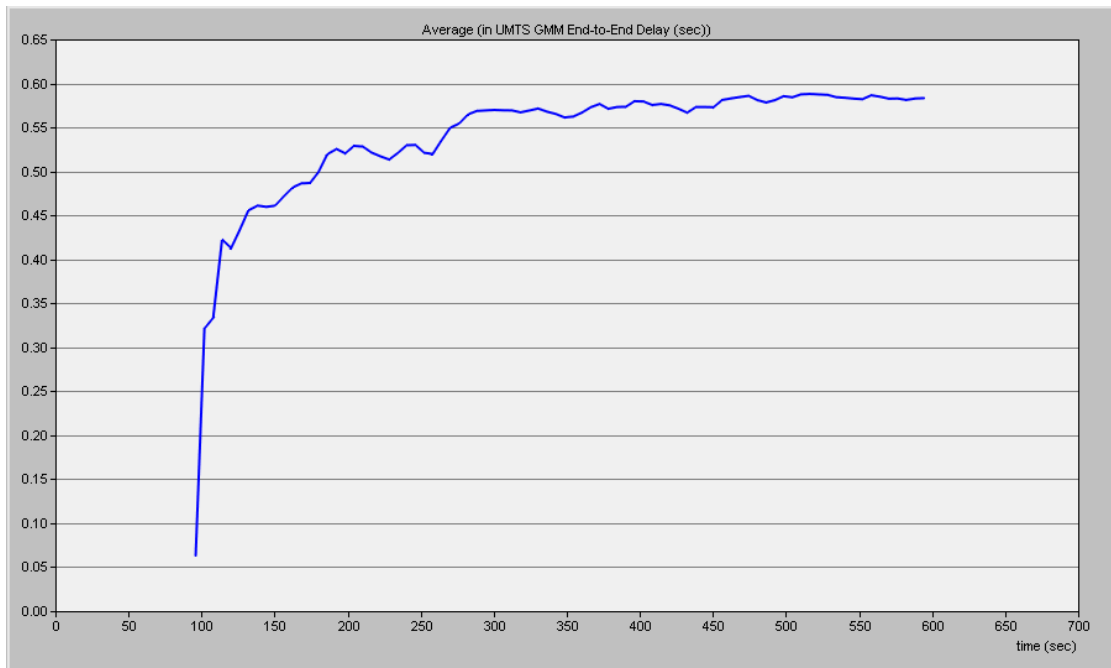
Ομοίως με τη γραφική που αφορούσε τις εφαρμογές εγγραφής, έτσι και η μέση χρονική απόκριση στα αιτήματα ερωτήματος διαρκώς αυξάνεται, αλλά φτάνει ακόμα μεγαλύτερες τιμές, με μέγιστη τα 32 δευτερόλεπτα, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.14. Η αυξημένη απόκριση στις αιτήσεις ερωτήματος σε σχέση με τις αιτήσεις εισόδου είναι αναμενόμενη και σχετίζεται με τη λειτουργία του πρωτοκόλλου UMTS. Η μεγάλη διαφορά στη χρονική απόκριση σε σχέση με το πρώτο σενάριο απεικονίζεται στην εικόνα 5.15.



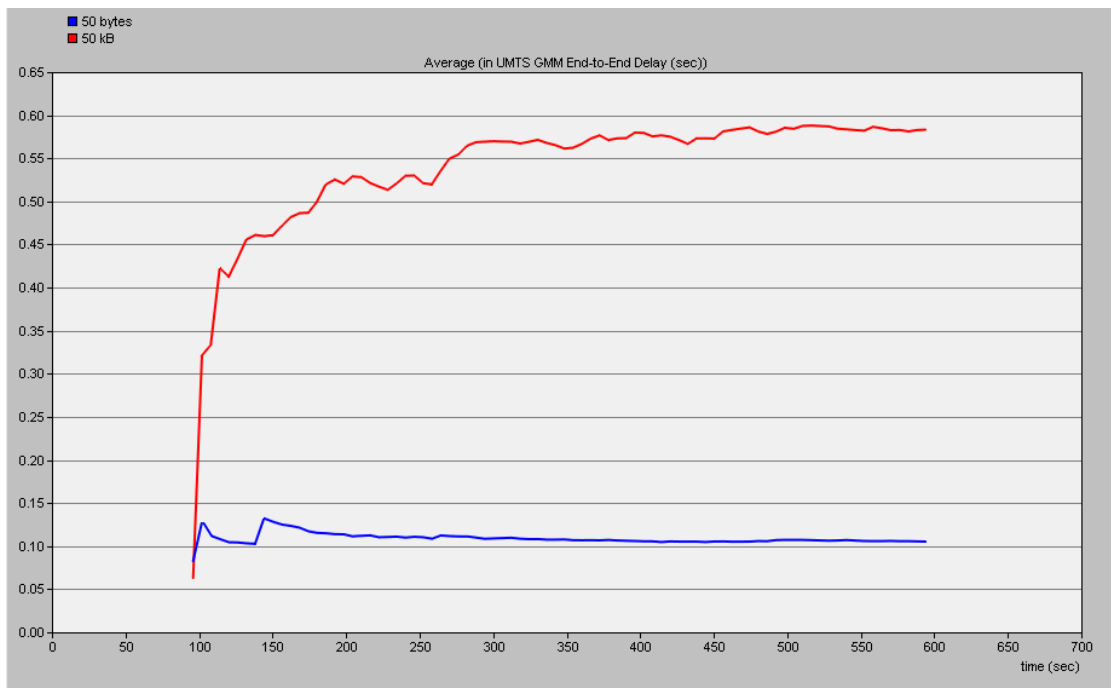
Εικόνα 5.16 i) Average Database Query Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Query Traffic Sent (κάτω)
(50 χρήστες, 50 kB)

Όσον αφορά τους ρυθμούς μετάδοσης με τους οποίους εξυπηρετούνται οι αιτήσεις ερωτημάτων, αυτοί διαφαίνονται ξεκάθαρα στην εικόνα 5.16. Αυτή τη φορά οι γραφικές αποστολής και λήψης δεδομένων διαφοροποιούνται ελαφρώς, με τη μέση ταχύτητα αποστολής να αγγίζει τα 10.000 bytes/sec (80.000 bits/sec ή 78.1 kbps) και τη μέση ταχύτητα λήψης τα 9.500 bytes/sec (76.000 bits/sec ή 74.2 kbps).

Στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος της από άκρη σε άκρη καθυστέρησης στη μετάδοση δεδομένων από τις βάσεις δεδομένων στους τερματικούς κόμβους και πραγματοποιείται μία σύγκριση με την καθυστέρηση που εμφανίστηκε στο πρώτο σενάριο:



Εικόνα 5.17 Average End-to-End Delay (50 χρήστες, 50 kB)

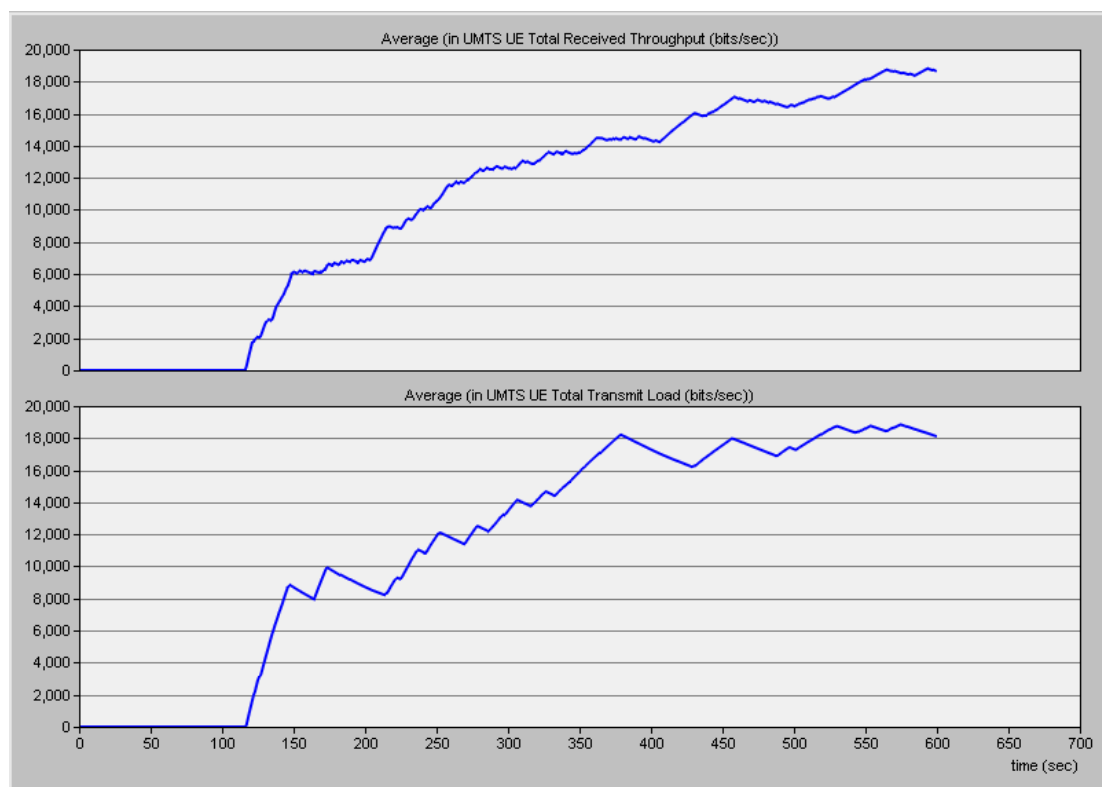


Εικόνα 5.18 Σύγκριση Average End-to-End Delay (50 χρήστες, 50 bytes – 50 χρήστες, 50 kB)

Όπως είναι φανερό, η γραφική της εικόνας 5.17 που αφορά την από άκρη σε άκρη καθυστέρηση διαρκώς αυξάνεται και σχετικά σταθεροποιείται σε μια μέση τιμή κοντά στα 0.58 sec σε αντίθεση με τη γραφική του πρώτου σεναρίου που σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης παρέμεινε σταθερή σε μια αρκετά μικρότερη τιμή. Το συγκριτικό

γράφημα της εικόνας 5.18 καθιστά ακόμα πιο εμφανή τη διαφορά στη συμπεριφορά των δύο δικτύων. Μια διαφορά της τάξης του μισού δευτερολέπτου είναι αρκετά μεγάλη όταν σχετίζεται με την καθυστέρηση (delay) του δικτύου. Εν προκειμένω, είναι αναμενόμενη λόγω της επιβάρυνσης του δικτύου με δεδομένα πολύ μεγαλύτερου μεγέθους. Επιπλέον, το UMTS είναι ένα πρωτόκολλο αρκετά απαιτητικό ως προς τις διαδικασίες ταυτοποίησης (authentication) και την παροχή έγκρισης για τη σύνδεση χρηστών, σε πολλαπλά επίπεδα και στάδια επεξεργασίας, επιβαρύνοντας τις χρονικές αποκρίσεις.

Τέλος, οι γραφικές που απεικονίζουν την επίδοση αποστολής και λήψης δεδομένων ενός τυχαίου κόμβου για το συγκεκριμένο σενάριο παρουσιάζονται παρακάτω:

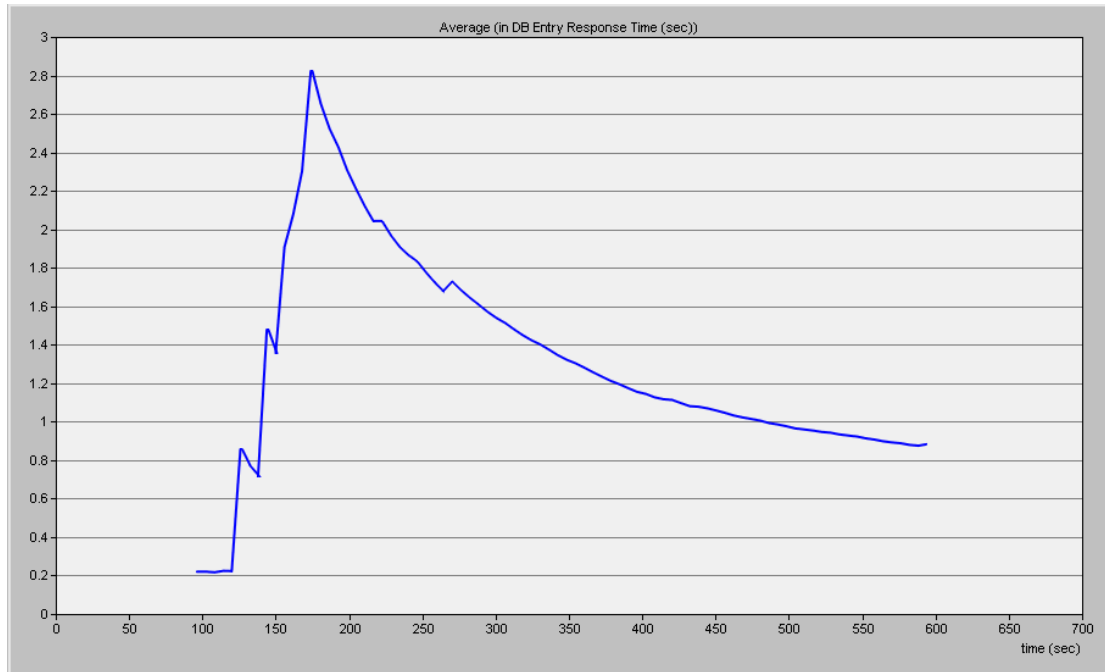


Εικόνα 5.19 i) Average UE Received Throughput (πάνω) ii) Average UE Transmit Load (κάτω)
(50 χρήστες, 50 kB)

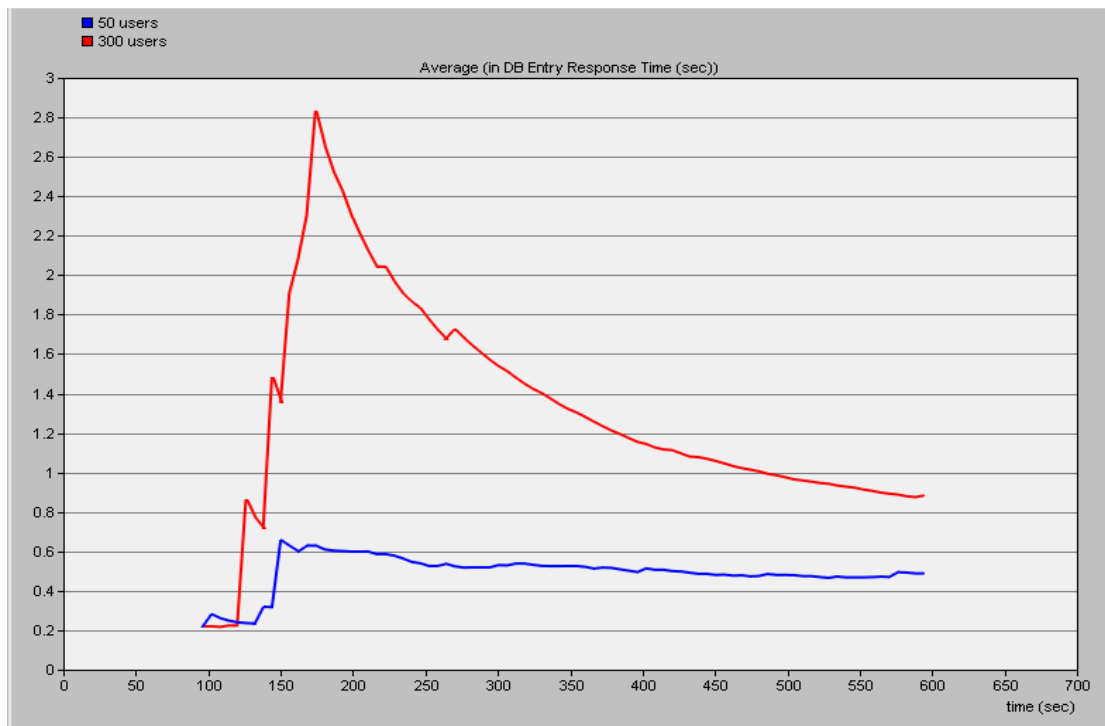
Το γράφημα της εικόνας 5.19 παρουσιάζει τους ρυθμούς μετάδοσης διακίνησης δεδομένων από και προς το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης για έναν τυχαίο κόμβο του δικτύου. Η μέση ταχύτητα μετάδοσης είναι τα 18.000 bits/sec (17.6 kbps). Αξίζει να σημειωθεί πως η γραφική του μεταδιδόμενου φορτίου παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης λίγο πάνω από την αντίστοιχη γραφική του λαμβανόμενου throughput, γεγονός λογικό δεδομένου ότι το φορτίο περιλαμβάνει εκτός των δεδομένων και στοιχεία των πακέτων απαραίτητα για την επικοινωνία. Όπως και στο πρώτο σενάριο, το συγκεκριμένο γράφημα δεν είναι αντιπροσωπευτικό για όλους τους τερματικούς κόμβους του δικτύου καθώς για ορισμένους άλλους κόμβους προέκυψαν γραφικές διαφορετικής ή μηδενικής απόκρισης.

5.3.3 Αποτελέσματα τρίτου σεναρίου

Για το δίκτυο του τρίτου και τελευταίου σεναρίου το μέγεθος των δεδομένων κάθε μετρητή ορίστηκε εκ νέου στα 50 bytes αλλά ο αριθμός των κόμβων UE σε κάθε πόλη αυξήθηκε στους 300. Για το δίκτυο αυτό, προέκυψαν οι ακόλουθες γραφικές:

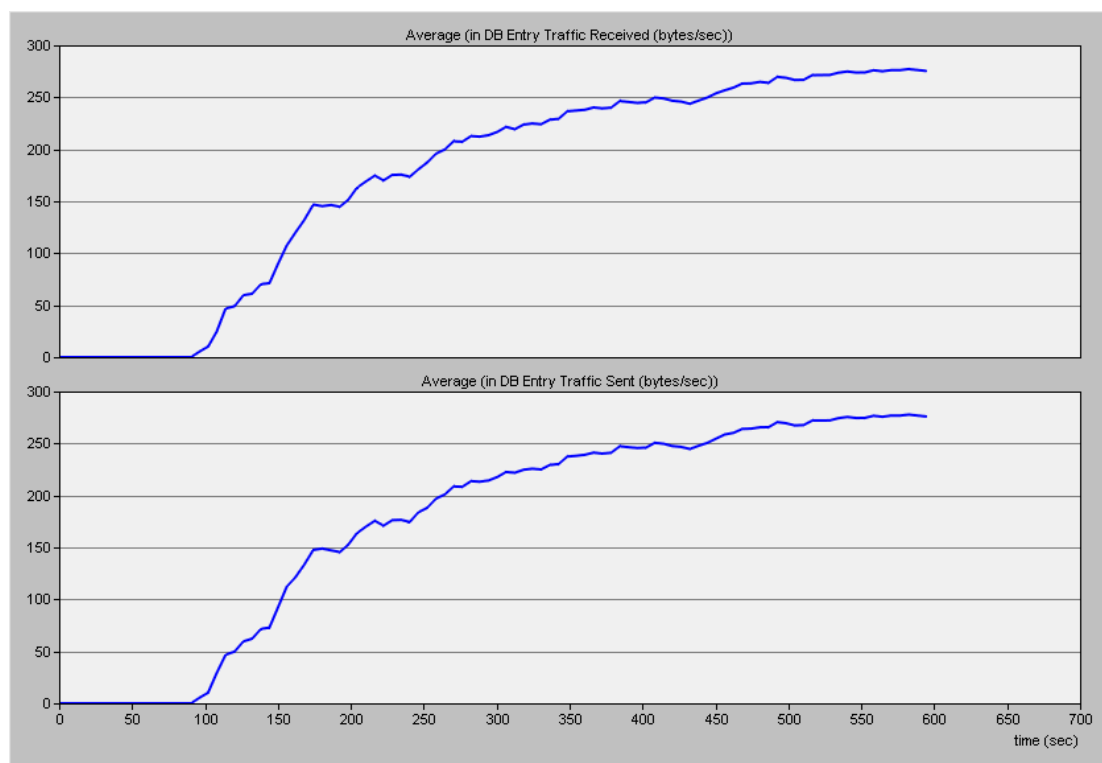


Εικόνα 5.20 Average Database Entry Response Time (300 χρήστες, 50 bytes)



Εικόνα 5.21 Σύγκριση Average Database Entry Response Time (50 χρήστες, 50 bytes - 300 χρήστες, 50 bytes)

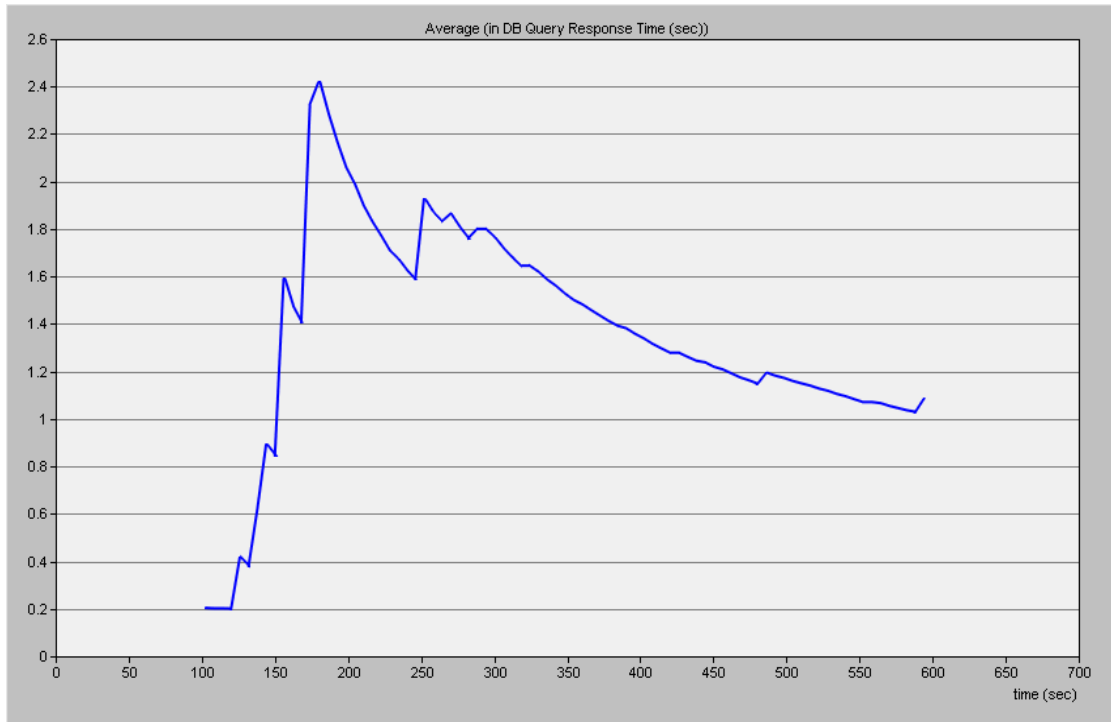
Στο γράφημα της εικόνας 5.20 παρουσιάζεται η μέση χρονική απόκριση του δικτύου στις αιτήσεις εγγραφής/εισόδου των εφαρμογών στις βάσεις δεδομένων. Η γραφική παρουσιάζει μια αιχμή στην αρχή της προσομοίωσης, η οποία φτάνει τα 2.8 sec και τείνει να ελλατωθεί και σταδιακά να σταθεροποιηθεί σε μια τιμή κοντά στα 0.9 sec. Ενδιαφέρουσα είναι η σύγκριση με την αντίστοιχη γραφική του πρώτου σεναρίου στην εικόνα 5.21. Η αιχμή και στις δύο γραφικές παρουσιάζεται στο ίδιο χρονικό σημείο, το οποίο σηματοδοτεί την ταυτόχρονη ένταξη συνδρομητών και είναι λογικό στη γραφική του τρίτου σεναρίου να είναι αισθητά μεγαλύτερη λόγω του αισθητά μεγαλύτερου αριθμού χρηστών.



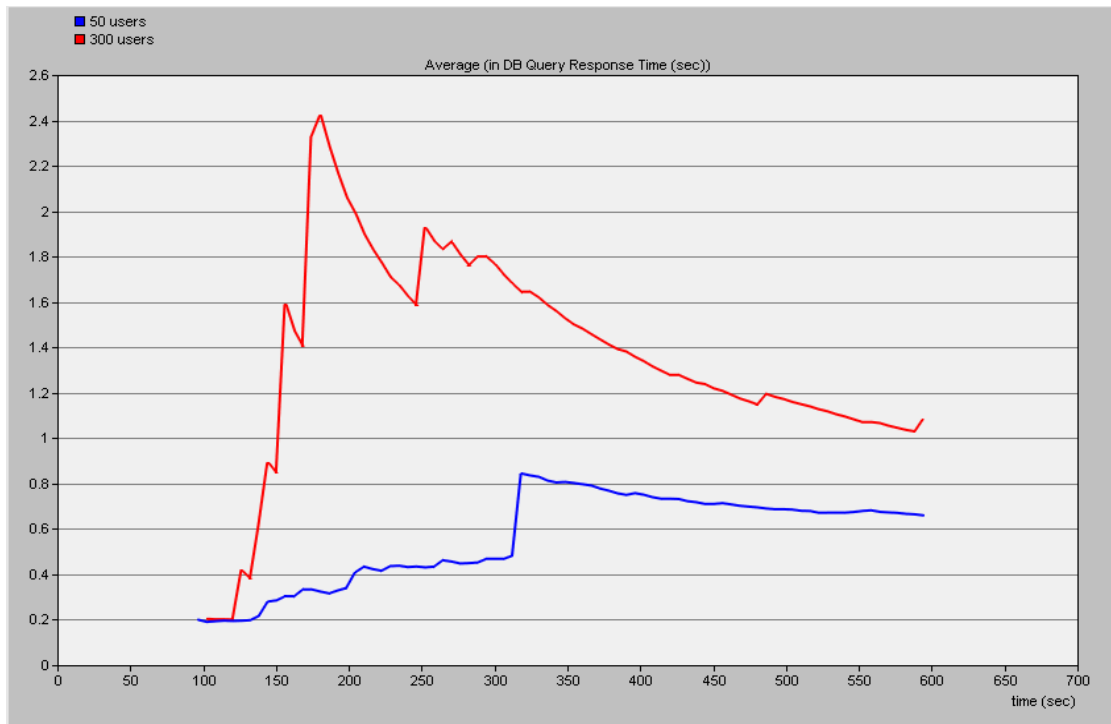
Εικόνα 5.22 i) Average Database Entry Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Entry Traffic Sent (κάτω)
(300 χρήστες, 50 bytes)

Στην εικόνα 5.22 παρουσιάζεται ο μέσος αριθμός των μεταδιδόμενων bytes κάθε δευτερόλεπτο που αφορά την εξυπηρέτηση εφαρμογών που αιτούνται εγγραφή/είσοδο στις βάσεις δεδομένων. Οι μέσοι ρυθμοί μετάδοσης τόσο για την αποστολή όσο και για τη λήψη δεδομένων φτάνουν τα 280 bytes/sec (2240 bits/sec ή 2.19 kbps).

Τα αντίστοιχα γραφήματα για την εξυπηρέτηση εφαρμογών που αιτούνται κάποιο ερώτημα προς τις βάσεις δεδομένων παρατίθενται παρακάτω:

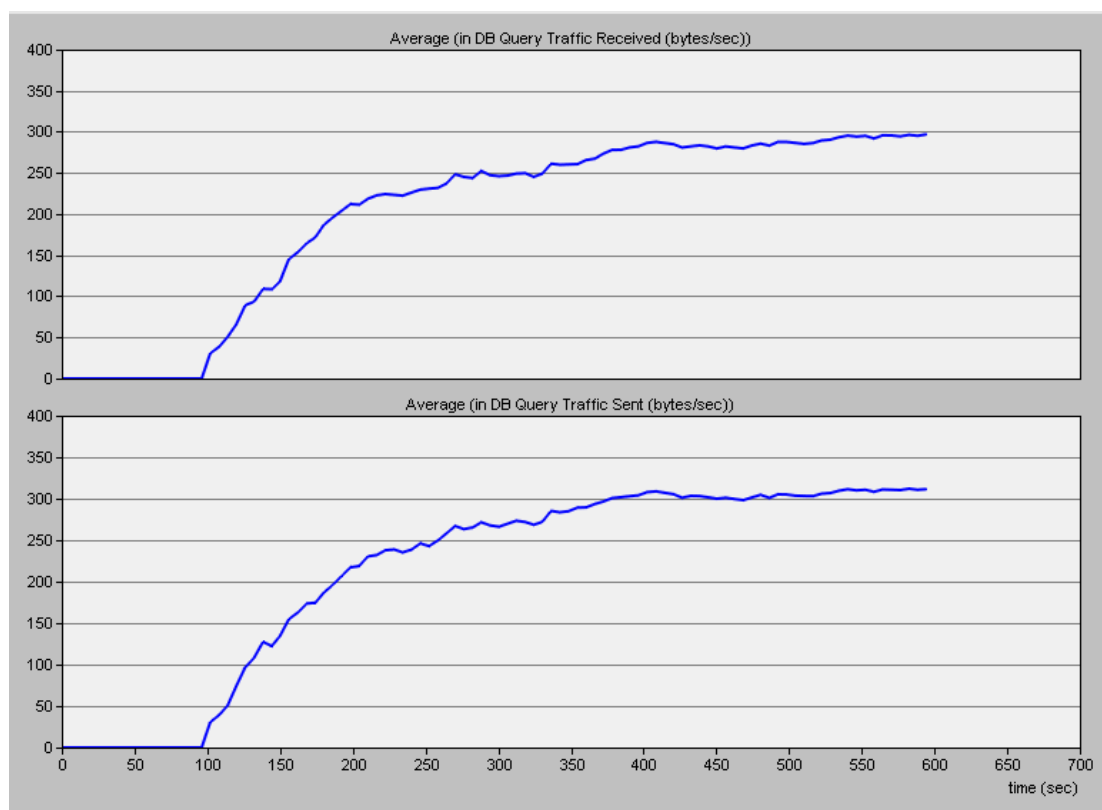


Εικόνα 5.23 Average Database Query Response Time (300 χρήστες, 50 bytes)



Εικόνα 5.24 Σύγκριση Average Database Query Response Time (50 χρήστες, 50 bytes - 300 χρήστες, 50 bytes)

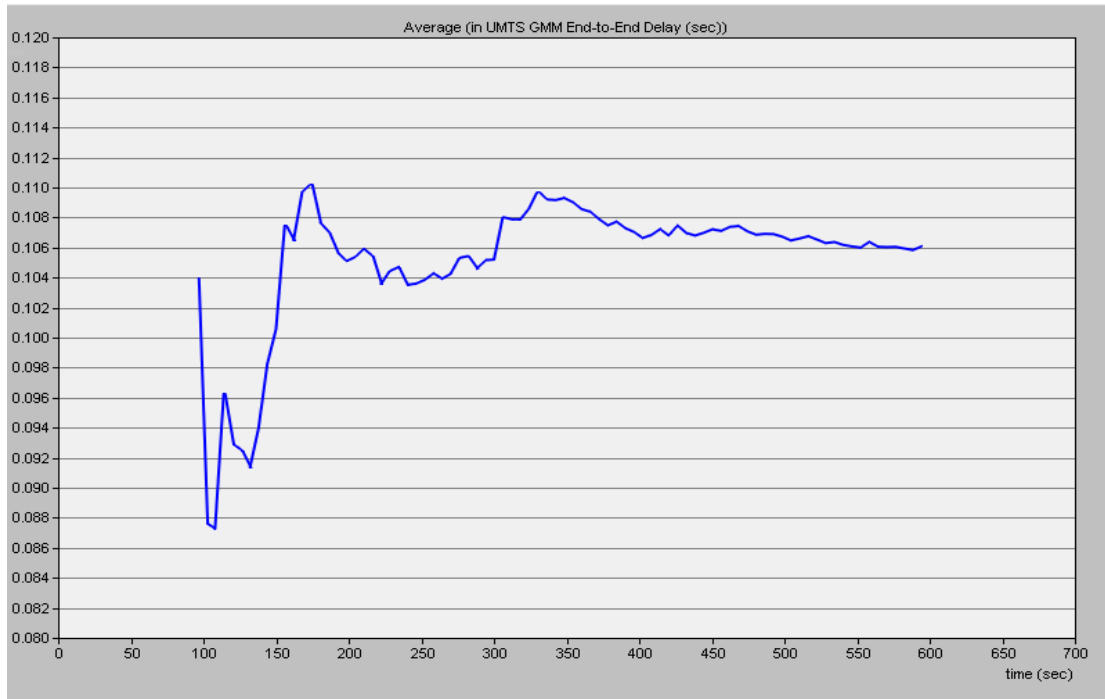
Η γραφική της εικόνας 5.23 απεικονίζει τη χρονική απόκριση στις αιτήσεις ερωτημάτων προς τις βάσεις δεδομένων και παρουσιάζει ομοιότητες στη συμπεριφορά με τη γραφική της εικόνας 5.20 με τη διαφορά πως εν τέλει σταθεροποιείται στην ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή των 1.1 sec. Στην εικόνα 5.24 απεικονίζεται η σύγκριση με την αντίστοιχη απόκριση του πρώτου σεναρίου, η οποία εμφανίζει την αιχμή της αργότερα και είναι λίγο μικρότερη, όπως είναι αναμενόμενο.



Εικόνα 5.25 i) Average Database Query Traffic Received (πάνω) ii) Average Database Query Traffic Sent (κάτω)
(300 χρήστες, 50 bytes)

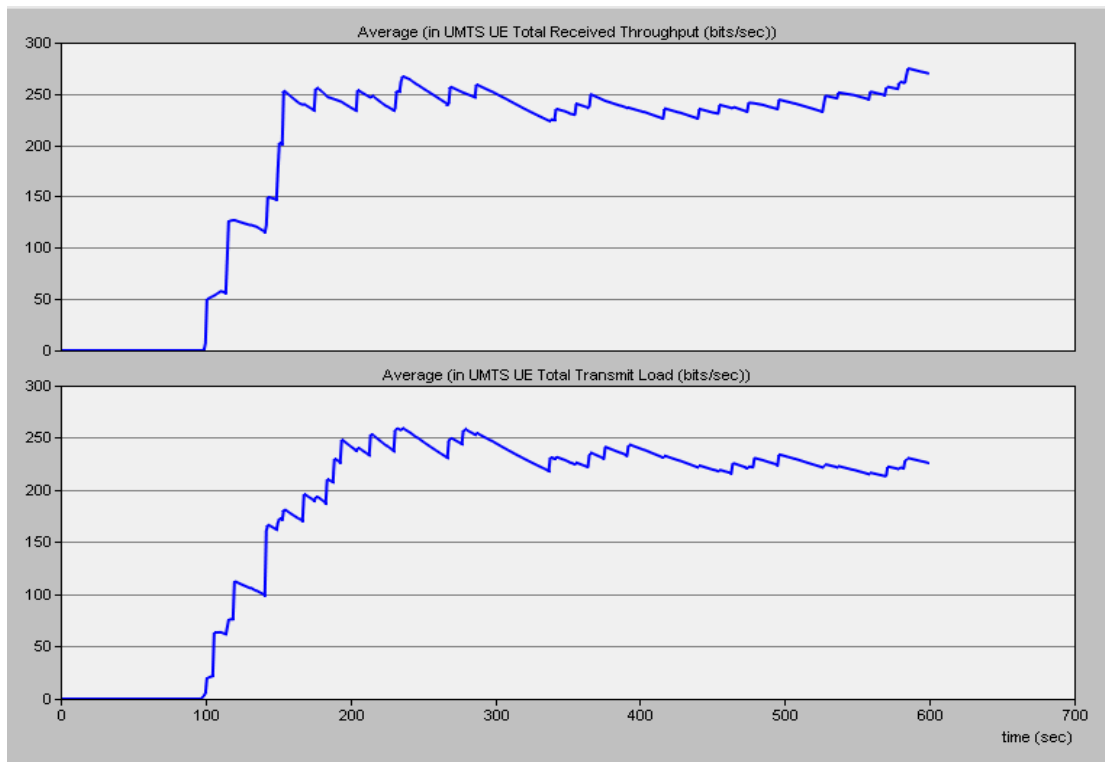
Στα γραφήματα της εικόνας 5.25 παρουσιάζεται η διακίνηση δεδομένων που αφορούν την εξυπηρέτηση εφαρμογών που αιτούνται κάποιο ερώτημα προς τις βάσεις δεδομένων. Όπως είναι φανερό, για το τρίτο σενάριο η μέση ταχύτητα αποστολής αγγίζει τα 320 bytes/sec (2560 bits/sec ή 2.5 kbps) και η μέση ταχύτητα λήψης τα 300 bytes/sec (2400 bits/sec ή 2.34 kbps).

Η επόμενη παράμετρος που εξετάζεται, είναι η καθυστέρηση του συστήματος στη μετάδοση δεδομένων από τη μία άκρη (βάσεις δεδομένων) στην άλλη (τερματικοί σταθμοί χρήστη).



Εικόνα 5.26 Average End-to-End Delay (300 χρήστες, 50 bytes)

Τέλος, οι παράμετροι throughput και load για έναν τυχαίο κόμβο του δικτύου παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 5.27 i) Average UE Received Throughput (πάνω) ii) Average UE Transmit Load (κάτω)
(300 χρήστες, 50 bytes)

Όπως φαίνεται στο γράφημα της εικόνας 5.26, το δίκτυο του τρίτου σεναρίου παρουσιάζει μια ικανοποιητική από άκρη σε άκρη καθυστέρηση που σταθεροποιείται κοντά στη μέση τιμή των 105 ms. Η τιμή αυτή είναι πολύ κοντινή στην αντίστοιχη του πρώτου σεναρίου, υποδεικνύοντας πως η συγκεκριμένη παράμετρος του UMTS δικτύου, για ίδιο μέγεθος μετρητικών δεδομένων, δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τη μεγάλη αύξηση των χρηστών.

Όσον αφορά τα γραφήματα της εικόνας 5.28, απεικονίζεται ο μέσος αριθμός bits που λαμβάνει και μεταδίδει ανά δευτερόλεπτο ένας τυχαίος κόμβος. Όπως και στα προηγούμενα δύο σενάρια έτσι και στο τρίτο, οι κόμβοι χρήστη ακολουθούν τυχαία κατανομή και ως εκ τούτου παρουσιάζουν διαφορετικές συμπεριφορές ως προς τη διακίνηση δεδομένων. Η μέση ταχύτητα αποστολής και λήψης δεδομένων για το συγκεκριμένο κόμβο δεν ξεπερνά τα 250 bits/sec (0.24 kbps).

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις

Η ολοκλήρωση της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιτρέπει την εξαγωγή ορισμένων χρήσιμων συμπερασμάτων που αφορούν γενικότερα το πρωτόκολλο UMTS και ειδικότερα την εφαρμογή του στο δίκτυο που υλοποιήθηκε, με στόχο την ανάδειξη της βέλτιστης επιλογής για εφαρμογές απομακρυσμένου ελέγχου και μετάδοσης δεδομένων έξυπνων μετρητών στα πλαίσια του ΕΗΔ. Παρακάτω πραγματοποιείται λοιπόν ένας σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοιωτική διαδικασία μαζί με ορισμένες προτάσεις που αποσκοπούν στη βελτίωσή τους και μπορούν να αποτελέσουν το αντικείμενο μίας μελλοντικής ερευνητικής μελέτης.

6.1 Συμπεράσματα μελέτης

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα τρία σενάρια προσομοίωσης επιτρέπουν την εξαγωγή ορισμένων χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την απόκριση του δικτύου σε αλλαγές όπως η προσθήκη εξυπηρετούμενων χρηστών ή η αύξηση του μεγέθους των μετρητικών δεδομένων. Ιδιαίτερα ενθαρρυντικό είναι το γεγονός πως η από άκρη σε άκρη καθυστέρηση, που αποτελεί μια εξαιρετικά σημαντική παράμετρο του συστήματος, παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα και στα τρία σενάρια. Ειδικότερα τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα δύο σενάρια των 50 bytes ανά μετρητή, υποδεικνύουν πως η χρονική καθυστέρηση του UMTS δικτύου παραμένει ουσιαστικά ανεξάρτητη από τον αριθμό των συνδρομητών. Επιπλέον φάνηκε πως το δίκτυο είναι σε θέση να εξυπηρετήσει αρκετά μεγαλύτερα μεγέθη δεδομένων, χωρίς να παρουσιάζει μη αποδεκτές χρονικές καθυστερήσεις. Ένα ζήτημα που δημιουργεί προβληματισμό, είναι η αδυναμία εξυπηρέτησης του συνόλου των χρηστών – έξυπνων μετρητών. Αυτό μπορεί να οφείλεται μερικώς σε ανεπάρκεια της τοπολογίας αλλά σχετίζεται και με τη δομή λειτουργίας του λογισμικού προσομοίωσης, το οποίο χρησιμοποιεί κατανομές τυχαιότητας και δυσκολεύει την εξαγωγή ακριβέστερων συμπερασμάτων.

Ένα ακόμη πολύ σημαντικό ζήτημα που σχετίζεται με την παρούσα εργασία, δεδομένου ότι πρόκειται για θεωρητική μελέτη βασιζόμενη σε προσομοιώσεις, αφορά στις δυνατότητες εφαρμογής και υλοποίησης πραγματικών δικτύων από τεχνικοοικονομική σκοπιά. Όσον αφορά την ενσύρματη διασύνδεση των UMTS δικτύων με τις βάσεις δεδομένων, είναι μια επιλογή που βασίζεται στην αξιοπιστία και την ταχύτητα των ενσύρματων τεχνολογιών και φυσικά στην αδυναμία του ασύρματου UMTS δικτύου να εξυπηρετήσει σε τέτοιες αποστάσεις. Στα σενάρια που υλοποιήθηκαν, για τις ανάγκες της μελέτης έπρεπε να γίνουν ορισμένες παραδοχές, δεδομένων των περιορισμών που

επιβάλλει η πλατφόρμα λογισμικού του OPNET. Ως εκ τούτου, επιλέχθηκε η διαδεδομένη Ethernet τεχνολογία, αναπαριστώντας μια υπόγεια ζεύξη μεταξύ των πόλεων της Κρήτης καθώς και μεταξύ Αθήνας-Ηρακλείου. Η πρακτική εφαρμογή μιας τέτοιας διασύνδεσης σε αποστάσεις όπως αυτές, μπορεί να αποδειχτεί ασύμφορη από υλικοτεχνικής απόψεως καθώς προϋποθέτει την προσθήκη φυσικών πόρων. Ως εκ τούτου, κατά την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης οφείλεται να συμπεριληφθεί υπόψη η τυχούσα ύπαρξη εγκατεστημένων δικτυακών υποδομών στο ελληνικό σύστημα, προτού προκύψει μια τελική επιλογή.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Τα ευφυή δίκτυα αναμένεται να εδραιωθούν ως τα ηλεκτρικά δίκτυα του μέλλοντος και ως εκ τούτου αποτελούν έναν τομέα σχετικά ανεξερεύνητο, με ανεξάντλητες προοπτικές και δυνατότητες, που χρήζει εκτενούς μελέτης. Σε αυτή την κατεύθυνση, η παρούσα διπλωματική εργασία και τα αποτελέσματα που παρουσίασε μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για περαιτέρω έρευνα.

Συγκεκριμένα, ένα πιθανό θέμα μελέτης αποτελεί η επέκταση του παρόντος δικτύου ώστε να εξυπηρετείται ένας πολύ μεγαλύτερος αριθμός έξυπνων μετρητών, με στόχο να εξεταστεί η απόκριση του συστήματος σε περίπτωση ευρύτερης εφαρμογής του, όπως για παράδειγμα σε ένα μεγάλο κομμάτι καταναλωτών Χαμηλής Τάσης. Ταυτόχρονα, μπορεί να αναζητηθεί η βέλτιστη λύση για τη συλλογή και τη μετάδοση των μετρητικών δεδομένων, μέσω αξιοποίησης ασύρματων ή ενσύρματων τεχνολογιών ή συνδυασμού των δύο. Σημαντικό είναι να μην εξεταστούν μόνο τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου αλλά και η τεχνοοικονομική βιωσιμότητα του εγχειρήματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των ασύρματων τεχνολογιών, οι οποίες δε διαθέτουν αυξημένες απαιτήσεις σε υλικοτεχνικές υποδομές και παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία στο σύστημα. Συγκεκριμένα για το ελληνικό δίκτυο, μια ενδιαφέρουσα μελέτη που μπορεί να διεξαχθεί ως επέκταση της παρούσας εργασίας, είναι η χρήση δορυφορικών τηλεπικοινωνιών σε εφαρμογές απομακρυσμένου ελέγχου.

Τέλος, ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα μελέτης αφορά τη χρήση τεχνολογιών τέταρτης γενιάς (4G) σε ευφυή μετρητικά συστήματα. Το πρωτόκολλο LTE αποτελεί την πλέον σύγχρονη τεχνολογία κυψελωτών δικτύων και θεωρείται ένας εκ των βασικών διεκδικητών για τη θέση της επικρατέστερης και αποδοτικότερης τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας. Η σύγκριση του με το 3G/UMTS σε τεχνικά χαρακτηριστικά αλλά και αποδοτικότητα μπορεί να αποτελέσει το αντικείμενο μιας μελλοντικής μελέτης.

Βιβλιογραφία

- [1] Σ.Η.Ε.Ν.Η, [Ηλεκτρονικό]. Available : <https://www.shenh.gr/shenh/elektrismos/129-elektriki-energia.html> (πρόσβαση May 15, 2017).
- [2] Βουρνάς Κ., Κονταξής Γ. *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [3] ΔΕΗ, Ιστορική Ανασκόπηση, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dei.gr> (πρόσβαση May 17, 2017).
- [4] ΔΕΗ, Τομείς Δραστηριότητας, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dei.gr> (πρόσβαση May 17, 2017).
- [5] ΑΔΜΗΕ, Σύστημα μεταφοράς, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr> (πρόσβαση May 17, 2017).
- [6] ΔΕΔΔΗΕ, Το δίκτυο ηλεκτρισμού, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dei.gr> (πρόσβαση May 17, 2017).
- [7] Xi Fang, Satyajayant Misra, Guoliang Xue, Dejun Yang. *Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey*. IEEE, 2011.
- [8] U.S. Department of Energy. «*Understanding the Benefits of the Smart Grid.*» June 2010.
- [9] Yazhou Jiang, Chen-Ching Liu, Yin Xu. *Smart Distribution Systems*. MDPI, 2016.
- [10] David J. Dolezilek. *Power System Automation*. Schweitzer Laboratories, USA
- [11] EEI-AEIC-UTC. *Smart Meters and Smart Meter Systems: A Metering Industry Perspective*. EEI, March 2011.
- [12] ΔΕΔΔΗΕ, Υπηρεσίες/Καταμέτρηση, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dei.gr> (πρόσβαση July 6, 2017).
- [13] “*Εγχειρίδιο Τηλεμέτρησης Μετρητών και Μετρήσεων Μ.Τ.*”, ΔΕΔΔΗΕ, Αθήνα, 2011.
- [14] Αντώνιος Καρακούσης, «*Μετάβαση στο Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο και Ανάπτυξη του Ευφυούς Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας*». Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2015
- [15] V. Cagri Gungor, Dilan Sahin, Taskin Kocak, Salih Ergut, Concettina Buccella, Carlo Cecati, Gerhard P. Hancke. *A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, February 2013.
- [16] Palak P. Parikh, Mitalkumar. G. Kanabar, Tarlochan S. Sidhu. *Opportunities and Challenges of Wireless Communication Technologies for Smart Grid Applications*. Ontario, Canada: Department of Electrical and Computer Engineering, University of Western Ontario.

- [17] John D McDonald. *Smart Grid Applications, Standards Development and Recent Deployments*. IEEE.
- [18] Vehbi C. Gungor, Dilan Sahin, Taskin Kocak, Salih Ergut, Concettina Buccella, Carlo Cecati, Gerhard P. Hancke. «Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards.»
- [19] Jyotsna Agrawal, Rakesh Patel, Dr. P. Mor, Dr. P. Dubey, Dr. J. M. Keller. «Evolution of Mobile Communication Network: from 1G to 4G.» *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, October 2015.
- [20] Raj Jain. "*Cellular Wireless Networks*". *Washington University*
- [21] Guoyou He. "*Overview of UMTS*." Helsinki, 2003.
- [22] Heikki Kaaranen, Ari Ahtiainen, Lauri Laitinen, Siamäk Naghian, Valtteri Niemi. *UMTS Networks: Architecture, Mobility and Services*. John Wiley & Sons, 2001.
- [23] Adrian Clark, Christopher J. Pavlovski. *Wireless Networks for the Smart Energy Grid: Application Aware Networks*. Hong Kong: IMECS, 2010.
- [24] Δημήτριος Καραγκούνης, "Σύγκριση Τεχνολογιών Μετάδοσης Δεδομένων για Σύνδεση Ηλεκτρικών Οχημάτων με το Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας". *Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2016*
- [25] Zheng Lu, Hongji Yang. *Unlocking the Power of OPNET Modeler*. Cambridge University Press, 2012.