



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Σύγκριση Τεχνολογιών Μετάδοσης Δεδομένων για Σύνδεση Ηλεκτρικών Οχημάτων με το Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καραγκούνης Γ. Δημήτριος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Σύγκριση Τεχνολογιών Μετάδοσης Δεδομένων για Σύνδεση Ηλεκτρικών Οχημάτων με το Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Καραγκούνης Γ. Δημήτριος**

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ...<sup>η</sup> Ιουλίου 2016

.....  
Ν. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Π. Γεωργιλάκης  
Επ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ν. Ουζούνογλου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....  
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Γ. ΚΑΡΑΓΚΟΥΝΗΣ

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

Copyright © Δημήτριος Γ. Καραγκούνης, 2016

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.

*Αφιερωμένη,*

Στην οικογένειά μου και τους φίλους μου

## Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση, προσομοίωση και σύγκριση τεσσάρων τεχνολογιών, ενσύρματου και ασύρματου τύπου, οι οποίες προτείνονται ως λύσεις για τη μετάδοση δεδομένων σε εφαρμογές σύνδεσης ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τεχνολογίες που αναλύονται και συγκρίνονται είναι οι ATM και MPLS, που είναι ενσύρματου τύπου, και οι WiMAX και UMTS, που αποτελούν τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης δεδομένων.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, που απαρτίζεται από τα κεφάλαια 1 έως 5, δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με την τεχνολογία V2G, αλλά και τα βασικά στοιχεία για καθένα από τα τέσσερα πρωτόκολλα επικοινωνίας που εξετάζονται στην μελέτη που διενεργείται σε αυτή την εργασία. Συγκεκριμένα, στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύονται οι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων, οι τύποι μπαταριών και τα πρότυπα που ορίζουν τον τρόπο διασύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Εν συνεχεία, στα κεφάλαια 2 έως 5, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα στοιχεία που αφορούν τα πρωτόκολλα ATM, MPLS, WiMAX και UMTS αντίστοιχα, ενώ παράλληλα γίνεται αναλυτική περιγραφή της αρχής λειτουργίας και των δομικών μονάδων που απαρτίζουν το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο για κάθε ένα από τα παραπάνω πρωτόκολλα.

Αφού ολοκληρωθεί η θεωρητική ανάλυση του πρώτου μέρους, ακολουθεί το δεύτερο μέρος, που αποτελείται από τα κεφάλαια 6 και 7. Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του λογισμικού Riverbed Modeler, το οποίο χρησιμοποιείται για τους σκοπούς της μελέτης της εργασίας, ενώ στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι τρεις δυνατοί τρόποι σύνδεσης των προγραμμάτων Riverbed Modeler και Matlab, που καθιστούν δυνατή την παράλληλη προσομοίωση μεταξύ των δύο λογισμικών πακέτων. Ακολουθώντας, στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο, αναλύονται τα δύο σκέλη της μελέτης που πραγματοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά, περιγράφεται η διαδικασία σχεδίασης και προσομοίωσης των τοπολογιών που αφορούν τα τέσσερα πρωτόκολλα επικοινωνίας, με τη βοήθεια του Modeler, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το πρώτο μελετώμενο σκέλος, ενώ γίνεται αντίστοιχη περιγραφή και στο δεύτερο σκέλος της εργασίας, τα αποτελέσματα του οποίου, προκύπτουν από την παράλληλη προσομοίωση των λογισμικών Riverbed Modeler και Matlab.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος της εργασίας και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 8, αναφέρονται κάποια γενικά συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν βάσει των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και προτείνονται τοπολογίες για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της μελέτης, ενώ το κεφάλαιο κλείνει με επεκτάσεις που μπορούν να απασχολήσουν μελλοντικές μελέτες.

## **Λέξεις Κλειδιά**

Ηλεκτρικά οχήματα, δίκτυο ηλεκτρική ενέργειας, OPNET, RIVERBED MODELER, MATLAB, παράλληλη προσομοίωση, πρωτόκολλα, MPLS, UMTS, WiMAX, ATM, MEX Interface.

## **Abstract**

The scope of this thesis is to present, simulate and compare four kinds of wired and wireless protocols, which are suggested for data transmission between electric cars connected to the electricity network. The four technologies, analyzed and compared, are ATM and MPLS, which are both wired type and WiMAX and UMTS, both wireless data transmission technologies.

The first part of the study, consisted of chapters 1 to 5, explains theoretically the V2G technology, as well as the key elements for each of the four communication protocols examined in the study carried out in this diploma thesis. Particularly, in chapter 1 are analyzed the types of electric vehicles, the battery types and standards which define the interconnection of electric vehicles to the power grid. Then, the major elements concerning ATM, MPLS, WiMAX and UMTS protocols, are presented at units 2 to 5 respectively. There is, also, a detailed description of the principle operation and the structural units constituting the telecommunications network for each of the above protocols.

The second part of this thesis consists of chapters 6 and 7. More specific in chapter 6, Riverbed Modeler software is presented and three possible ways of connecting Riverbed Modeler with Matlab, a coupling which enables co-simulation. The 7th chapter, deals with the description of the design and simulation process topologies involving four communication protocols using Riverbed Modeler, while also presents the simulation results of the first leg of the study. A corresponding description is made in the second part of the study, where the co-simulation of Riverbed Modeler and Matlab took place in order to gather energy data while the simulation is carried out.

Finally, in chapter 8 general conclusions are referred, emerged by the results of the previous unit. Furthermore, topologies for the study's results are proposed, whereas recommendations which can be addressed by future studies are made.



## **Keywords**

V2G, OPNET, RIVERBED MODELER, MATLAB, co-simulation, MPLS, UMTS, WiMAX, ATM, MEX Interface.

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 και αποτελεί το επιστέγασμα των προπτυχιακών σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Νικόλαος Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμώς τον Δρ. Γεώργιο Κιόκε μέλος ΕΕΔΙΠ της Σχολής Ικάρων και συνεργάτη ερευνητή του εργαστηρίου ΣΗΕ και την κ. Εριέττα Ζουντουρίδου Υ. Διδάκτορα ΕΜΠ για τις κατευθυντήριες συμβουλές και την καθοδήγηση που μου παρείχαν καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια τους καθ' όλη την περίοδο εκπόνησης αυτής της διπλωματικής.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για τη στήριξη και τη βοήθεια σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Η τεχνολογία Vehicle to Grid - V2G.....	- 1 -
1.1 Εισαγωγή .....	- 1 -
1.2 Ιστορικά Στοιχεία .....	- 3 -
1.3 Τεχνολογία Ηλεκτρικών Οχημάτων (EV).....	- 5 -
1.3.1 Είδη Ηλεκτρικών Οχημάτων (EV).....	- 6 -
1.3.2 Κατηγορίες Συσσωρευτών .....	- 12 -
1.4 Υποδομές Φόρτισης και διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων .....	- 14 -
1.4. 1 Ευφυή Δίκτυα.....	- 15 -
1.4.2 Σταθμοί Φόρτισης.....	- 17 -
1.4.3 Πρότυπα και Διατάξεις .....	- 21 -
Κεφάλαιο 2 : Το πρωτόκολλο ATM.....	- 27 -
2.1 Εισαγωγή.....	- 27 -
2.2 Ιστορικά Στοιχεία .....	- 27 -
2.3 Αρχή Λειτουργίας ATM .....	- 30 -
2.4 Μορφή ATM πακέτου .....	- 31 -
2.5 Αρχιτεκτονική ATM Δικτύου .....	- 32 -
2.6 Επίπεδα προσαρμογής ATM.....	- 33 -
2.7 Δρομολόγηση στο ATM .....	- 38 -
2.8 ATM και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS).....	- 39 -
2.9 Εικονικά δίκτυα και ATM .....	- 40 -
Κεφάλαιο 3 : Το πρωτόκολλο MPLS .....	- 42 -
3.1 Εισαγωγή.....	- 42 -
3.2 Ιστορικά Στοιχεία .....	- 42 -
3.3 Τι είναι το MPLS .....	- 43 -
3.4 Τρόπος Λειτουργίας του δικτύου MPLS .....	- 43 -
3.5 Αρχιτεκτονική δικτύου MPLS .....	- 44 -
3.5.1 LSR(Label Switch Router) .....	- 44 -
3.5.2 LER(Label Edge Router) .....	- 45 -
3.5.3 FEC(Forwarding Equivalent Class).....	- 45 -
3.5.4 MPLS Ετικέτες .....	- 46 -

3.5.5 LSP .....	- 47 -
3.5.6 LDP .....	- 48 -
3.6 MPLS – Traffic Engineering (TE) .....	- 50 -
3.6.1 Επιλογή κατάλληλου μονοπατιού .....	- 51 -
3.6.2 Δρομολόγηση της κυκλοφορίας στην υπολογισμένη διαδρομή .....	- 51 -
3.6.3 Συγκομιδή τοπολογικών πληροφοριών.....	- 51 -
3.6.4 Διαχείριση της κυκλοφορίας .....	- 52 -
3.6.5 Αλγόριθμοι δρομολόγησης (TE) .....	- 52 -
3.7 MPLS VPN.....	- 53 -
3.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του MPLS.....	- 55 -
Κεφάλαιο 4 : Το πρωτόκολλο WiMAX.....	- 57 -
4.1 Εισαγωγή – Ιστορικά στοιχεία .....	- 57 -
4.2 Το πρότυπο 802.16(WiMAX).....	- 59 -
4.3 Αρχιτεκτονική δικτύου WiMAX.....	- 60 -
4.4 Στοιβά πρωτοκόλλων WiMAX.....	- 61 -
4.4.1 Μοντέλο OSI .....	- 61 -
4.4.2 Physical Layer .....	- 63 -
4.4.3 MAC Layer .....	- 65 -
4.5 WiMAX QoS.....	- 67 -
4.5.1 Τύποι Υπηρεσιών(ToS) .....	- 67 -
4.6 Ασφάλεια δικτύων WiMAX.....	- 68 -
4.7 Εφαρμογές του WiMAX .....	- 70 -
Κεφάλαιο 5 : Το πρωτόκολλο UMTS.....	- 72 -
5.1 Εισαγωγή.....	- 72 -
5.2 Ιστορικά Στοιχεία .....	- 73 -
5.3 Αρχιτεκτονική Συστήματος .....	- 75 -
5.3.1 Κυτταρική Δομή .....	- 77 -
5.3.2 Δίκτυο Επίγειας Ασύρματης Πρόσβασης UMTS (UTRAN) .....	- 79 -
5.3.3 Δίκτυο Κορμού (CN) .....	- 81 -
5.3.4 Εξοπλισμός Χρήστη (UE) .....	- 83 -
5.4 Πρωτόκολλα.....	- 84 -
5.5 Υπηρεσίες UMTS .....	- 86 -
Κεφάλαιο 6 : Το Λογισμικό Riverbed Modeler.....	- 89 -

6.1 Εισαγωγή.....	- 89 -
6.2 Αρχιτεκτονική Riverbed Modeler.....	- 90 -
6.3 Συντάκτες (Editors) .....	- 91 -
6.3.1 Συντάκτης Σχεδίου (Project editor).....	- 93 -
6.3.2 Συντάκτης Κόμβου (Node editor) .....	- 95 -
6.3.3 Συντάκτης Διεργασίας (Process editor) .....	- 96 -
6.4 Παράλληλη προσομοίωση Riverbed Modeler και Matlab .....	- 99 -
6.4.1 Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου (HLA) .....	- 100 -
6.4.2 Μονάδα εξωτερικού συστήματος (Esys Module).....	- 102 -
6.4.3 Διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών MEX (MEX API Interface).....	- 105 -
Κεφάλαιο 7 : Περιγραφή Μελέτης και Ανάλυση Αποτελεσμάτων .....	- 107 -
7.1 Στόχος Μελέτης .....	- 107 -
7.2 Μελέτη σύγκρισης τεσσάρων πρωτοκόλλων επικοινωνίας για σύνδεση ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας .....	- 108 -
7.2.1 1 <sup>ο</sup> Σενάριο προσομοίωσης (WiMAX) .....	- 112 -
7.2.2 2 <sup>ο</sup> Σενάριο προσομοίωσης (UMTS).....	- 117 -
7.2.3 3 <sup>ο</sup> Σενάριο προσομοίωσης (ATM).....	- 121 -
7.2.4 4 <sup>ο</sup> Σενάριο προσομοίωσης (MPLS).....	- 124 -
7.2.5 Συγκριτικά Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τα 4 πρωτόκολλα .....	- 127 -
7.3 Μελέτη παραμέτρων δικτύου WiMAX με παράλληλη προσομοίωση Riverbed Modeler και Matlab.....	- 137 -
7.3.1 Μέθοδος διασύνδεσης Riverbed Modeler και Matlab (co-simulation) .....	- 137 -
7.3.2 Περιγραφή μελέτης .....	- 140 -
7.3.3 Αποτελέσματα Μελέτης .....	- 141 -
Κεφάλαιο 8 : Συμπεράσματα Μελετών και Προτάσεις για το Μέλλον .....	- 143 -
Βιβλιογραφία .....	- 147 -

## Περιεχόμενα Εικόνων

### Κεφάλαιο 1°

Εικόνα 1. 1 Αριθμός οχημάτων Παγκοσμίως.....	- 1 -
Εικόνα 1. 2 Αριθμός Ηλεκτρικών Οχημάτων Παγκοσμίως .....	- 3 -
Εικόνα 1. 3 Το ηλεκτρικό όχημα του Thomas Edison.....	- 4 -
Εικόνα 1. 4 Ηλεκτρικό Όχημα Συσσωρευτών (BEV - BOEV) .....	- 8 -
Εικόνα 1. 5 Ηλεκτρικό Όχημα Κυψελών Καυσίμου (FCEV) .....	- 9 -
Εικόνα 1. 6 Τύποι Υβριδικών Οχημάτων .....	- 10 -
Εικόνα 1. 7 Φορτιστής με μονοφασική παροχή.....	- 18 -
Εικόνα 1. 8 Χώρος στάθμευσης εξοπλισμένος με φορτιστές τριφασικής παροχής .....	- 19 -
Εικόνα 1. 9 Αριστερά : Πιστοποίηση και χρέωση χρήστη. Δεξιά : Δημόσιος φορτιστής με DC παροχή.....	- 19 -
Εικόνα 1. 10 Αρχή λειτουργίας επαγωγικής φόρτισης εν κινήσει.....	- 20 -
Εικόνα 1. 11 Επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων σε λωρίδα αυτοκινητόδρομου .....	- 21 -
Εικόνα 1. 12 Υποδομή μονάδας φόρτισης με τη μέθοδο 3 .....	- 23 -
Εικόνα 1. 13 Υποδομή μονάδας φόρτισης με τη μέθοδο 4 .....	- 24 -
Εικόνα 1. 14 Βύσματα τύπου 2, AC αριστερά και DC δεξιά. ....	- 25 -
Εικόνα 1. 15 Βύσμα τύπου 3 με την υποδοχή του αριστερά. ....	- 25 -
Εικόνα 1. 16 Βύσμα τύπου CHAdeMO.....	- 26 -

### Κεφάλαιο 2°

Εικόνα 2. 1 The History of ATM Technology.....	- 28 -
Εικόνα 2. 2 Αρχή Λειτουργίας ATM.....	- 30 -
Εικόνα 2. 3 Δομή επικεφαλίδας ATM.....	- 31 -
Εικόνα 2. 4 ATM cell header structure at UNI.....	- 32 -
Εικόνα 2. 5 Επίπεδα και υποεπίπεδα της αρχιτεκτονικής ATM.....	- 33 -
Εικόνα 2. 6 Διαχωρισμός δεδομένων χρηστών σε στοιχεία .....	- 34 -
Εικόνα 2. 7 Επίπεδα AAL.....	- 36 -
Εικόνα 2. 8 Ιεραρχική δομή στην PNNI δρομολόγηση.....	- 39 -
Εικόνα 2. 9 Ιεραρχία μονοπατιών ATM.....	- 40 -

### Κεφάλαιο 3°

Εικόνα 3. 1 Δομή επικεφαλίδας MPLS .....	- 46 -
--	--------

### Κεφάλαιο 4°

Εικόνα 4. 1 Στοιβά πρωτοκόλλων του προτύπου IEEE 802.16 .....	- 63 -
---	--------

### Κεφάλαιο 5°

Εικόνα 5. 1 Ο δρόμος προς τα δίκτυα τρίτης γενιάς.....	- 73 -
Εικόνα 5. 2 Πλήρης Δομή Δικτύου UMTS .....	- 76 -
Εικόνα 5. 3 δίκτυο σταθμών βάσης με κατευθυντικές κεραιές .....	- 79 -

Εικόνα 5. 4 Δίκτυο UTRAN.....	- 80 -
Εικόνα 5. 5 Τοπολογία Δικτύου Κορμού .....	- 83 -
Εικόνα 5. 6 Υπηρεσίες παρεχόμενες από δίκτυα 3G.....	- 87 -

## **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>**

Εικόνα 6. 1 Διάγραμμα ροής εργασίας του προγράμματος.....	- 91 -
Εικόνα 6. 2 Οι 3 συντάκτες Project,Node και Process .....	- 93 -
Εικόνα 6. 3 Αναπαράσταση ενός δικτύου ATM μέσω του συντάκτη σχεδίου .....	- 93 -
Εικόνα 6. 4 Εσωτερική δομή ενός κόμβου ATM. ....	- 96 -
Εικόνα 6. 5 Μοντέλο διεργασιών για την υλοποίηση της μεταγωγής ATM.....	- 97 -
Εικόνα 6. 6 Διάγραμμα ροής του Riverbed Modeler με HLA.....	- 102 -
Εικόνα 6. 7 Συντάκτης εξωτερικού συστήματος (ESD).....	- 103 -
Εικόνα 6. 8 Αρχείο καθορισμού συστήματος (sd-system description) .....	- 103 -
Εικόνα 6. 9 Μονάδα Esys συνδεδεμένη με άλλα στοιχεία. ....	- 104 -
Εικόνα 6. 10 Αλληλεπίδραση μεταξύ κώδικα C και Matlab. ....	- 106 -
Εικόνα 6. 11 Διασύνδεση Matlab με το Riverbed Modeler μέσω κώδικα σε C. [36] .....	- 106 -

## **Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>**

Εικόνα 7. 1 Χώροι στάθμευσης πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου.....	- 108 -
Εικόνα 7. 2 Τοπολογία δικτύου με τρία υποδίκτυα-χώρους στάθμευσης και τη βάση δεδομένων - 109 -	
Εικόνα 7. 3 Εσωτερικό subnet χώρου στάθμευσης για δίκτυο ασύρματης δικτύωσης.....	- 110 -
Εικόνα 7. 4 Εσωτερικό subnet χώρου στάθμευσης για δίκτυο ενσύρματης δικτύωσης.....	- 110 -
Εικόνα 7. 5 Τιμές παραμέτρων κόμβων Application και Profile Config. ....	- 111 -
Εικόνα 7. 6 Τοπολογία δικτύου WiMAX. ....	- 112 -
Εικόνα 7. 7 Υποδίκτυο WiMAX χώρου στάθμευσης της διεύθυνσης μέριμνας.....	- 114 -
Εικόνα 7. 8 Υποδίκτυο WiMAX χώρου στάθμευσης στα παλιά κτίρια της σχολής HMMY.-	114
-	
Εικόνα 7. 9 Υποδίκτυο WiMAX χώρου στάθμευσης στο υπόγειο των νέων κτιρίων της σχολής HMMY.....	- 115 -
Εικόνα 7. 10 Τοπολογία Δικτύου UMTS .....	- 117 -
Εικόνα 7. 11 Υποδίκτυο UMTS χώρου στάθμευσης της διεύθυνσης μέριμνας. ....	- 118 -
Εικόνα 7. 12 Υποδίκτυο UMTS χώρου στάθμευσης παλαιών κτιρίων σχολής HMMY. ....	- 119 -
Εικόνα 7. 13 Υποδίκτυο UMTS χώρου στάθμευσης υπογείου νέων κτιρίων σχολής HMMY.....	- 119 -
Εικόνα 7. 14 Ανάθεση σταθμών φόρτισης στους τρεις κόμβους SGSN. ....	- 120 -
Εικόνα 7. 15 Τοπολογία Δικτύου ATM.....	- 121 -
Εικόνα 7. 16 Υποδίκτυο ATM χώρου στάθμευσης της διεύθυνσης μέριμνας.....	- 122 -
Εικόνα 7. 17 Υποδίκτυο ATM υπόγειου χώρου στάθμευσης νέων κτιρίων σχολής HMMY -	122 -
Εικόνα 7. 18 Υποδίκτυο ATM χώρου στάθμευσης παλαιών κτιρίων σχολής HMMY.....	- 123 -
Εικόνα 7. 19 Υποδίκτυο MPLS χώρου στάθμευσης της διεύθυνσης μέριμνας .....	- 125 -

Εικόνα 7. 20 Υποδίκτυο MPLS χώρου στάθμευσης παλαιών κτιρίων σχολής ΗΜΜΥ .....	- 125 -
Εικόνα 7. 21 Υποδίκτυο MPLS υπόγειου χώρου στάθμευσης νέων κτιρίων σχολής ΗΜΜΥ-	126 -
-	
Εικόνα 7. 22 Τοπολογία Δικτύου MPLS .....	- 126 -
Εικόνα 7. 23 Database Entry Response Time(sec) .....	- 128 -
Εικόνα 7. 24 Database Entry Traffic Received (bytes/sec) .....	- 129 -
Εικόνα 7. 25 Database Entry Traffic Sent (bytes/sec) .....	- 130 -
Εικόνα 7. 26 Database Query Response Time(sec) .....	- 130 -
Εικόνα 7. 27 Database Query Traffic Received (bytes/sec) .....	- 131 -
Εικόνα 7. 28 Database Query Traffic Sent (bytes/sec) .....	- 132 -
Εικόνα 7. 29 End to end Delay (all protocols).....	- 133 -
Εικόνα 7. 30 MPLS - ATM End to end Delay.....	- 134 -
Εικόνα 7. 31 Umts - Wimax received throughput .....	- 134 -
Εικόνα 7. 32 Node Traffic Received .....	- 135 -
Εικόνα 7. 33 Node Load Sent .....	- 136 -
Εικόνα 7. 34 ATM - MPLS Link Utilization.....	- 136 -
Εικόνα 7. 35 Τοπολογία δικτύου 5 κόμβων για παράλληλη προσομοίωση .....	- 137 -
Εικόνα 7. 36 Τοπολογία δικτύου 100 κόμβων για παράλληλη προσομοίωση .....	- 137 -
Εικόνα 7. 37 Κώδικας για την κλήση του Matlab από το Riverbed Modeler. ....	- 138 -
Εικόνα 7. 38 Τοπολογία του δικτύου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης.....	- 139 -
Εικόνα 7. 39 Προβολή τελευταίας τιμής δεδομένων σε bytes από το Matlab Console. ....	- 140 -
Εικόνα 7. 40 WiMAX Delay (sec).....	- 141 -
Εικόνα 7. 41 WiMAX Load (bits/sec) .....	- 142 -
Εικόνα 7. 42 Database Entry Response Time (sec) .....	- 142 -



## Περιεχόμενα Πινάκων

### **Κεφάλαιο 4°**

Πίνακας 4. 1 Ομάδες Επιπέδων Μοντέλου OSI ..... - 62 -

### **Κεφάλαιο 7°**

Πίνακας 7. 1 Παράμετροι δρομολογητή ..... - 113 -

Πίνακας 7. 2 Παράμετροι Σταθμού βάσης ..... - 115 -

Πίνακας 7. 3 Παράμετροι Συνδρομητικών σταθμών..... - 116 -

Πίνακας 7. 4 Παράμετροι WiMAX Config. .... - 116 -

Πίνακας 7. 5 Στοιχεία Δικτύου WiMAX ..... - 116 -

Πίνακας 7. 6 Στοιχεία Δικτύου UMTS ..... - 121 -

Πίνακας 7. 7 Στοιχεία Δικτύου ATM. .... - 124 -

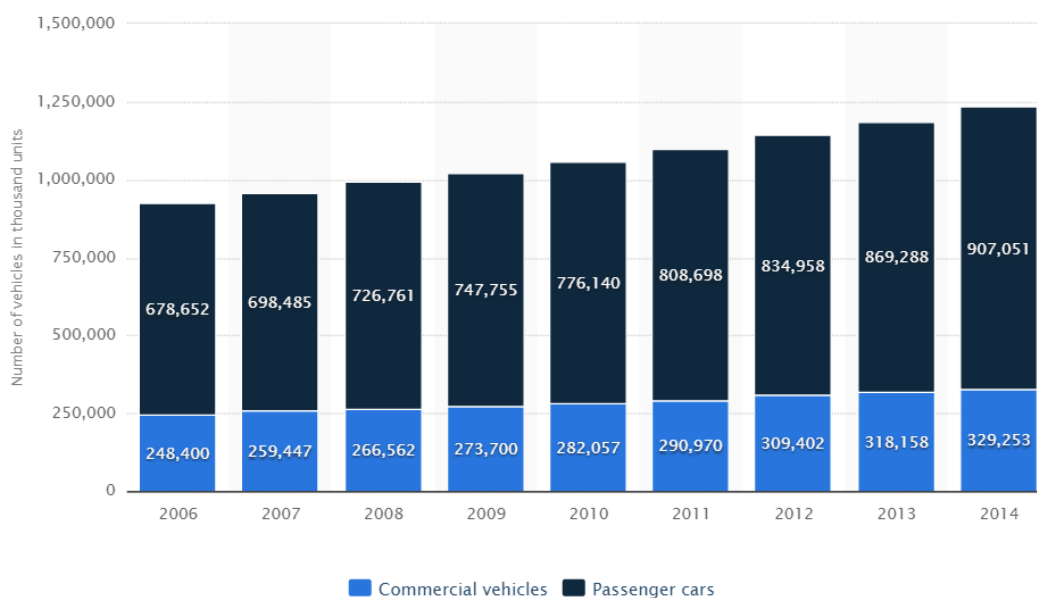
Πίνακας 7. 8 Στοιχεία Δικτύου MPLS..... - 125 -

# Κεφάλαιο 1 : Η τεχνολογία Vehicle to Grid - V2G

## 1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας, ιδιαίτερα στο τομέα της αποθήκευσης ενέργειας, σε συνδυασμό με τα προβλήματα που έχουν εμφανιστεί στον περιβαλλοντικό και ενεργειακό τομέα, έχουν οδηγήσει τις άλλοτε πολέμιες εταιρίες παραγωγής οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης, να στραφούν προς την κατασκευή υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων.

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία, φαίνεται ότι το έτος 2014 κυκλοφορούσαν περίπου 1,236 δισεκατομμύρια οχήματα σε όλο τον κόσμο, εκ των οποίων τα 907 εκατομμύρια είναι επιβατηγά και τα υπόλοιπα 329 εκατομμύρια επαγγελματικά. [1] Ο αριθμός των συνολικών οχημάτων αυξάνεται κάθε έτος όπως φαίνεται και από το ραβδόγραμμα της εικόνας 1.1. Στην Ελλάδα τα στοιχεία διαφέρουν κατά πολύ, καθώς σύμφωνα με την ελληνική στατιστική υπηρεσία, για το ίδιο έτος (2014), καταγράφηκαν 8.038.597 οχήματα, την στιγμή που στην τελευταία καταγραφή πληθυσμού της χώρας το 2011, οι νόμιμοι κάτοικοι ήταν 9.904.286. [2] Αν θεωρηθεί ότι οι αναλογίες δεν μεταβλήθηκαν πάρα πολύ, και κάνοντας ένα απλό υπολογισμό, προκύπτει ότι το 81,16% των νόμιμων κατοίκων της χώρας έχει στην κατοχή του όχημα. Το ποσοστό είναι εκ διαμέτρου αντίθετο με τα παγκόσμια στοιχεία, όπου προκύπτει ποσοστό 17% λαμβάνοντας υπόψιν παγκόσμιο πληθυσμό περίπου 7 δισεκατομμύρια ανθρώπους.



Εικόνα 1. 1 Αριθμός οχημάτων Παγκοσμίως

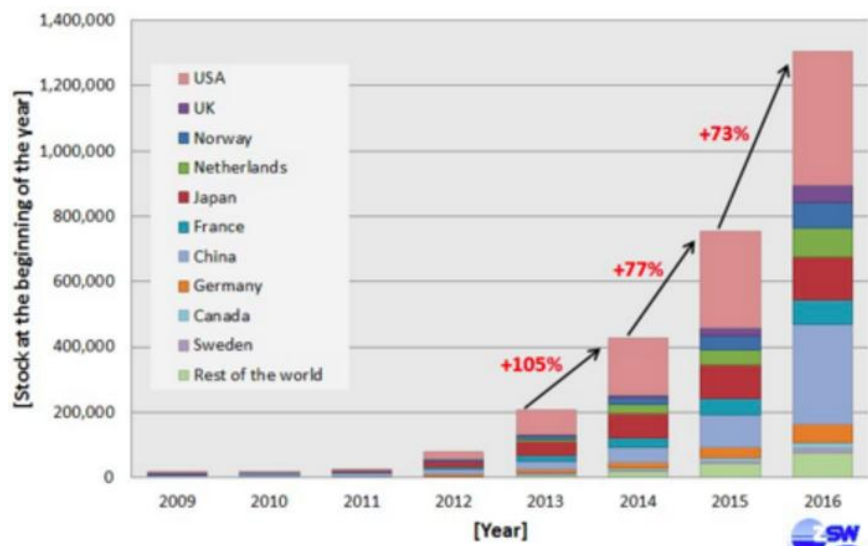
Ένας τόσο μεγάλος αριθμός οχημάτων, οι πλειοψηφία των οποίων λειτουργεί με κινητήρες εσωτερικής καύσης και πιο συγκεκριμένα με βενζινοκινητήρες ή πετρελαιοκινητήρες,

απελευθερώνει σε καθημερινή βάση τεράστιες ποσότητες βλαβερών ουσιών για την υγεία των ανθρώπων αλλά και το περιβάλλον. Οι επιπτώσεις αυτές είναι φανερές τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα μέτρα που λαμβάνονται με την εγκατάσταση πολύ αποδοτικών φίλτρων που δεσμεύουν το μεγαλύτερο ποσοστό των ρύπων δεν αποτελούν μόνιμη λύση στο πρόβλημα της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Οι αποφάσεις που λάβανε οι αρχηγοί των ευρωπαϊκών χωρών για την προστασία του περιβάλλοντος, με στόχο υλοποίησης ως το 2020, δημιουργεί πιέσεις προς πάσα κατεύθυνση για αλλαγές της επικρατούσας κατάστασης.

Ακόμη ένα πρόβλημα που αναμενόταν να εμφανιστεί κάποια στιγμή, είναι η εξάντληση λόγω της συνεχούς συρρίκνωσης των φυσικών πόρων του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Η εξάρτηση του παγκόσμιου συστήματος από τους ενεργειακούς πόρους και ιδιαίτερα τα ορυκτά καύσιμα, είναι τόσο μεγάλη που σε περίπτωση αδυναμίας εξόρυξης ή μεταφοράς τους, ο κίνδυνος κατήλωσης εκατομμύρια οχημάτων είναι το μικρότερο πρόβλημα, αν αναλογιστεί κανείς ότι μπορεί να δημιουργηθεί τόσο κοινωνική όσο και οικονομική κρίση πολύ μεγαλύτερη από αυτή που εμφανίστηκε το 2007.

Είναι προφανές ότι πρέπει να αποδεσμευτεί η παγκόσμια βιομηχανία οχημάτων από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, ώστε να υπάρχει δυνατότητα χρήσης των εναπομείναντων πόρων σε εφαρμογές που ακόμη δεν έχει βρεθεί εναλλακτική. Οι εταιρίες δείχνουν να αντιλαμβάνονται την κατάσταση και έχουν επανέλθει δυναμικά στην παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων. Εμφανίζονται συνεργασίες μεταξύ πρωτοπόρων εταιριών, όπως είναι η Toyota και η Honda, τόσο στο κομμάτι της έρευνας όπου μοιράζονται γνώσεις, όσο και στο κομμάτι της κατασκευής, όπου η Honda αναμένεται να χρησιμοποιήσει τα ώριμα πλέον εξαρτήματα των υβριδικών μοντέλων της Toyota.

Ερευνητικά στοιχεία δείχνουν πως η ζήτηση ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων έχει αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Η μεταβολή του παγκόσμιου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων, φαίνεται στο ραβδόγραμμα της εικόνας 1.2.



Εικόνα 1. 2 Αριθμός Ηλεκτρικών Οχημάτων Παγκοσμίως

## 1.2 Ιστορικά Στοιχεία

Τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζονται ως μια νέα τεχνολογία που τραβά το ενδιαφέρον ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, παρ'όλ'αυτά η αλήθεια είναι ότι τα ηλεκτρικά οχήματα είναι από τα πρώτα είδη μηχανοκίνητων οχημάτων που κατασκευάστηκαν ποτέ.

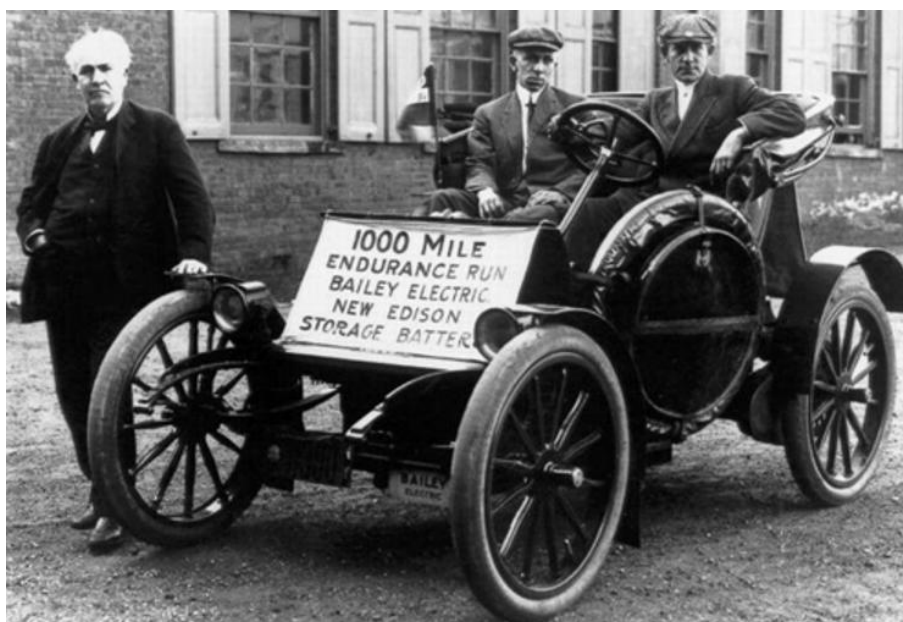
Εμφανίστηκαν στην αγορά σχεδόν ταυτόχρονα με τα συμβατικά οχήματα. Η πρώτη καταγεγραμμένη επιτυχής προσπάθεια κατασκευής ενός οχήματος που κινούταν με ηλεκτρισμό, έλαβε χώρο τη δεκαετία του 1830. Αυτός όμως που κατασκεύασε ένα πρακτικό και ρεαλιστικό μοντέλο πρώτος, ήταν ο αμερικανός Thomas Davenport με το δημιούργημα του το 1834. Ακολούθησε το όχημα του σκωτσέζου Robert Davidson το 1842. Τα επόμενα χρόνια ακολούθησαν αρκετοί επιστήμονες με τις εφευρέσεις τους, με το ενδιαφέρον πλέον να κινείται πέρα από την λειτουργικότητα των οχημάτων, η οποία είχε επιτευχθεί σε ικανοποιητικό για την εποχή βαθμό. Οι σχεδιαστές τότε ασχολούνταν με την εξυπηρέτηση και τις επιδόσεις των οχημάτων, κατασκευάζοντας οχήματα που μεταφέρουν πολλούς επιβάτες και σε ικανοποιητικές ταχύτητες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό του καθηγητή Charles Page, ο οποίος το 1847 έφτιαξε ένα όχημα που απορροφούσε ενέργεια από 100 συσσωρευτές και την απέδιδε, μέσω ενός κινητήρα 16 ίππων, στην κίνηση του οχήματος που μετέφερε έως και 12 επιβάτες με ταχύτητα 19 μίλια την ώρα.

Ακολούθησαν και άλλες κατασκευές, όπως αυτή των Lilly και Colton το 1847, οι οποίοι δημιούργησαν ένα ηλεκτρικό όχημα, με τροφοδοσία από σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω ηλεκτροφόρων ραγών, αντίστοιχων με των σημερινών συρμών, αλλά μικρότερου μεγέθους.

Το κύριο πρόβλημα όλων των οχημάτων εκείνης της εποχής ήταν η δυσαναλογία μεταξύ μεγέθους και αποθήκευσης ενέργειας των συσσωρευτών. Οι συσσωρευτές ήταν τεράστιοι, έχοντας δυνατότητα αποθήκευσης πολύ μικρών ποσών ενέργειας, μεγάλο βάρος και ως

μεγαλύτερο μειονέκτημα την αδυναμία επαναφόρτισης τους. Κατά συνέπεια τα οχήματα είχαν πολύ μικρή αυτονομία κίνησης. Λύσεις όπως αυτή των Lilly και Colton δεν θα μπορούσαν να εφαρμοστούν μαζικά, αφενός διότι απαιτεί τεράστια ποσά σε επενδύσεις υποδομών και αφετέρου δε θα ήταν χωροταξικά λειτουργικό ένα τέτοιο σχέδιο για την εξυπηρέτηση χιλιάδων οχημάτων αφού θα περιόριζε την κίνησή τους μονάχα στην διαδρομή που ορίζουν οι ηλεκτροφόρες ράγες.

Το 1859 ο Γάλλος Gaston Plante έδωσε την λύση στο πρόβλημα της επαναφόρτισης, που λειτουργούσε ως τροχοπέδη στην περαιτέρω ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων, ανακαλύπτοντας το στοιχείο Μολύβδου-Οξέως (Pb-Acid), το οποίο επέτρεπε την επαναφόρτιση των συσσωρευτών μετά την πρώτη χρήση. Χρειάστηκε να αλλάξει αιώνας για να εμφανιστεί άλλη λύση συσσωρευτών με δυνατότητα επαναφόρτισης, όπως αυτή του συσσωρευτή Νικελίου-Σιδήρου (Ni-Fe). Κατασκευάστηκε το 1910 από τον Thomas Edison, που ήταν κατά κοινή ομολογία ένας από τους πατέρες του ηλεκτρισμού και αποτελούσε το πιο προηγμένο τεχνολογικά στοιχείο εκείνης της εποχής. Ο ίδιος κατασκεύασε και ένα όχημα που απορροφούσε ενέργεια από συσσωρευτές Νικελίου-Σιδήρου για την κίνηση του [βλ. εικόνα 1.3].



*Εικόνα 1. 3 Το ηλεκτρικό όχημα του Thomas Edison*

Αφού επιλύθηκε και το πρόβλημα επαναφόρτισης των συσσωρευτών (από το 1859), η έρευνα γύρω από τα ηλεκτρικά οχήματα αυξανόταν και πλέον στρεφόταν περισσότερο σε τομείς όπως η επιδόσεις των οχημάτων. Ο Βέλγος Camille Jenatton κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρικό όχημα που κατάφερε να σπάσει το φράγμα των 100χιλιομέτρων την ώρα, δίνοντας πνοή για ακόμη μεγαλύτερες προσδοκίες.

Τα ηλεκτρικά οχήματα πλεονεκτούσαν έναντι των ανταγωνιστών τους εκείνη των εποχή σε πολλούς τομείς. Είχαν άμεση εκκίνηση απλά με το κλείσιμο ενός διακόπτη, σε αντίθεση με τα

βενζινοκίνητα που απαιτούσαν χειροκίνητη εκκίνηση και τα ατμοκίνητα που απαιτούσαν αρκετό χρόνο της τάξης μισής ώρας για την προθέρμανση του κινητήρα και για αυτό το λόγο θεωρούνταν οχήματα πολυτελείας. Επίσης το γεγονός ότι το υπεραστικό οδικό δίκτυο δεν ήταν κατάλληλο για χρήση οχημάτων, είχε ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται οχήματα μόνο μέσα στα όρια των πόλεων και κατά συνέπεια η αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν επαρκής. Δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία για την αγορά οχημάτων της εποχής, αλλά αυτά που υπάρχουν δείχνουν ότι έως το 1920, το 38% του συνολικού αριθμού οχημάτων στις ΗΠΑ κινούνταν με ηλεκτρισμό, το 22% με βενζίνη και το υπόλοιπο 40% κινούνταν με ατμό [3].

Μια σειρά παραγόντων, όπως η βελτίωση του υπεραστικού οδικού δικτύου, η προσθήκη ηλεκτρικού εκκινητή στα βενζινοκίνητα οχήματα, η μείωση του κόστους καυσίμων λόγω την ανακάλυψης μεγάλων αποθεμάτων πετρελαίου και η μείωση του κόστους των βενζινοκίνητων οχημάτων, λόγω της μαζικής του παραγωγής οδήγησαν στην συρρίκνωση και στη συνέχεια την εξάλειψη της βιομηχανίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Η απουσία διήρκεσε μέχρι τη δεκαετία του 1990 όταν και επέστρεψαν δειλά στο προσκήνιο εξετίας της κλιματικής αλλαγής και της εξάντλησης των αποθεμάτων πετρελαίου παγκοσμίως.

### 1.3 Τεχνολογία Ηλεκτρικών Οχημάτων (EV)

Τα ηλεκτρικά οχήματα που παρουσιάζονται στην αγορά δεν φαίνεται να διαφέρουν ιδιαίτερα, από την πλευρά του χρήστη, σε σχέση με τα συμβατικά που χρησιμοποιούν κινητήρα εσωτερικής καύσης. Η αλήθεια όμως είναι πως οι ομοιότητες τους στο εσωτερικό δεν είναι πάρα πολλές. Τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα δεν απαιτούν ντεπόζιτο αποθήκευσης καυσίμου, ούτε κινητήρα με πιστόνια για να κινηθούν με την ενέργεια που δημιουργείται από τις εκρήξεις και εν συνεχεία να μεταδώσουν την κίνηση στους ή στον άξονα του οχήματος προκυμμένου να κυλίσουν οι τροχοί. Δεδομένου αυτού αντιλαμβάνεται κανείς ότι εξοικονομείται πολύ χώρος αλλά και βάρος.

Τα ηλεκτρικά οχήματα λειτουργούν όπως ένα απλό κύκλωμα. Όταν ο οδηγός κλείσει τον διακόπτη, είτε γυρνώντας το κλειδί στη μίζα είτε με κάποιο ηλεκτρονικό σύστημα, αρχίζει η ροή ρεύματος από την μπαταρία προς τα ηλεκτρονικά συστήματα του οχήματος. Πατώντας ο οδηγός το πεντάλ της επιτάχυνσης, στην πραγματικότητα δίνει εντολή αύξησης της ροπής του κινητήρα του οχήματος, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση. Ο χρόνος που απαιτείται για την αύξηση της ροπής σε ένα ηλεκτρικό κινητήρα είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με ένα βενζινοκινητήρα, γεγονός που δίνει στα ηλεκτρικά οχήματα πλεονέκτημα σε περιπτώσεις που χρειάζεται γρήγορα επιτάχυνση.

Λόγω του μεγάλου μειονεκτήματος που παρουσιάζουν τα ηλεκτρικά οχήματα, με τα συστήματα αποθήκευσης, οι κατασκευαστές ψάχνουν συνεχώς τρόπους να μειώσουν κατά το δυνατόν τις απώλειες του οχήματος κατά την κίνηση. Μία από τις τεχνικές που χρησιμοποιούν για να το επιτύχουν αυτό είναι το αναγεννητικό φρενάρισμα. Είναι ένας μηχανισμός που ανακτά ενέργεια από κινήσεις που αναπόφευκτα θα πραγματοποιήσει κάποια στιγμή ο οδηγός του οχήματος, όπως είναι η πέδηση. Κατά την πέδηση των συμβατικών οχημάτων, οι τροχοί μπλοκάρονται και

καταναλώνουν την κινητική ενέργεια αφού μετατραπεί πρώτα σε μορφή θερμικής μέσω της τριβής, εξαπολύοντας την στο περιβάλλον. Στην περίπτωση όμως των ηλεκτρικών οχημάτων, όταν ο οδηγός χρησιμοποιεί το σύστημα πέδησης, μειώνεται η ροπή του κινητήρα και η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια οδηγείται πάλι πίσω στους συσσωρευτές για μεταγενέστερη χρήση. Στα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, αυτό δεν μπορεί να γίνει, καθώς το καύσιμο έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για την μικροέκρηξη και αυτή η ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί ξανά.

Τα ηλεκτρικά οχήματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Σε αυτά με κινητήρες AC και σε αυτά με κινητήρες DC. Η χρήση DC κινητήρων μειώνει το κόστος της κατασκευής καθώς αποτελούν φθηνές λύσεις, αλλά έχουν το μειονέκτημα του μεγάλου βάρους και του όγκου τους. Από την πλευρά τους οι κινητήρες AC, απαιτούν πολλά πολύπλοκα ηλεκτρονικά συστήματα για να λειτουργήσουν, οπότε το κόστος τους αυξάνεται πολύ σε σχέση με τους DC. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής (σε τι όχημα τοποθετείται) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο υλοποιήσεις.

Τα ηλεκτρικά οχήματα διακρίνονται περαιτέρω σε τέσσερις κατηγορίες. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του, ένα όχημα μπορεί να είναι :

- 1) Ηλεκτρικό συσσωρευτών (BEV - Battery Electrical Vehicle),
- 2) Ηλεκτρικό με κυψέλες καυσίμου (FCEV - Fuel Cell Electrical Vehicle),
- 3) Υβριδικό (HEV - Hybrid Electric Vehicle) και
- 4) Ηλεκτρικό με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (PEV - Plug-in Electric Vehicle)

Στη συνέχεια αναλύονται τα βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν κάθε μία από τις τέσσερις κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων.

### 1.3.1 Είδη Ηλεκτρικών Οχημάτων (EV)

#### 1.3.1.1 Ηλεκτρικά οχήματα συσσωρευτών (BEV)

Ο συγκεκριμένος τύπος αποτελεί την πιο απλή λύση σχεδίασης και υλοποίησης ηλεκτρικών οχημάτων. Ο ηλεκτροκινητήρας αυτών των οχημάτων λειτουργεί αμιγώς με ηλεκτρική ενέργεια που δίνεται από τους συσσωρευτές. Οι συσσωρευτές είναι συνήθως τύπου μολύβδου-οξέος, νικελίου-καδμίου ή ιόντων λιθίου, με τις πρώτες να αποτελούν τη φθηνότερη λύση και τις άλλες δύο τις πιο προηγμένες τεχνολογικά και πιο αξιόπιστες. Είναι προφανές ότι τα ηλεκτρικά οχήματα δεν χρησιμοποιούν μια απλή μπαταρία των 12V, αλλά μια συστοιχία πολλών δωδεκάβολτων μπαταριών ή ειδικές κατασκευές για το κάθε όχημα. Η χρήση πολλών συσσωρευτών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βάρους και του απαιτούμενου δεσμευμένου όγκου στο εσωτερικό του οχήματος.

Ένα αμιγώς ηλεκτρικό όχημα αποτελείται από : τη συστοιχία μπαταριών, το σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS), τα ηλεκτρονικά ισχύος, το σύστημα υψηλής τάσης και το σύστημα μετάδοσης κίνησης με τον ηλεκτροκινητήρα.

Η συστοιχία μπαταριών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αποτελείται από ένα αριθμό μπαταριών, κατά προτίμηση όμοιων, που έχουν συνδεθεί μεταξύ τους παράλληλα ή σε σειρά δίνοντας στην έξοδο μια επιθυμητή τιμή τάσεως.

Σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS) μπορεί να ονομαστεί οποιοδήποτε ηλεκτρονικό σύστημα που δύναται να διαχειριστεί μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Το σύστημα προστατεύει την μπαταρία, απαγορεύοντας τη λειτουργία εκτός ασφαλών ορίων, ελέγχει την κατάσταση της, καταγράφει σημαντικά λειτουργικά δεδομένα και δίνει αναφορές σχετικά με αυτά. Έχει επίσης την ικανότητα πιστοποίησης των στοιχείων των μπαταριών. Στην περίπτωση που το BMS είναι ενσωματωμένο στη συστοιχία μπαταριών, τότε το σύστημα ονομάζεται έξυπνο πακέτο μπαταριών (smart battery pack) και απαιτείται αντίστοιχος έξυπνος φορτιστής μπαταριών (smart battery charger) για την φόρτιση του.

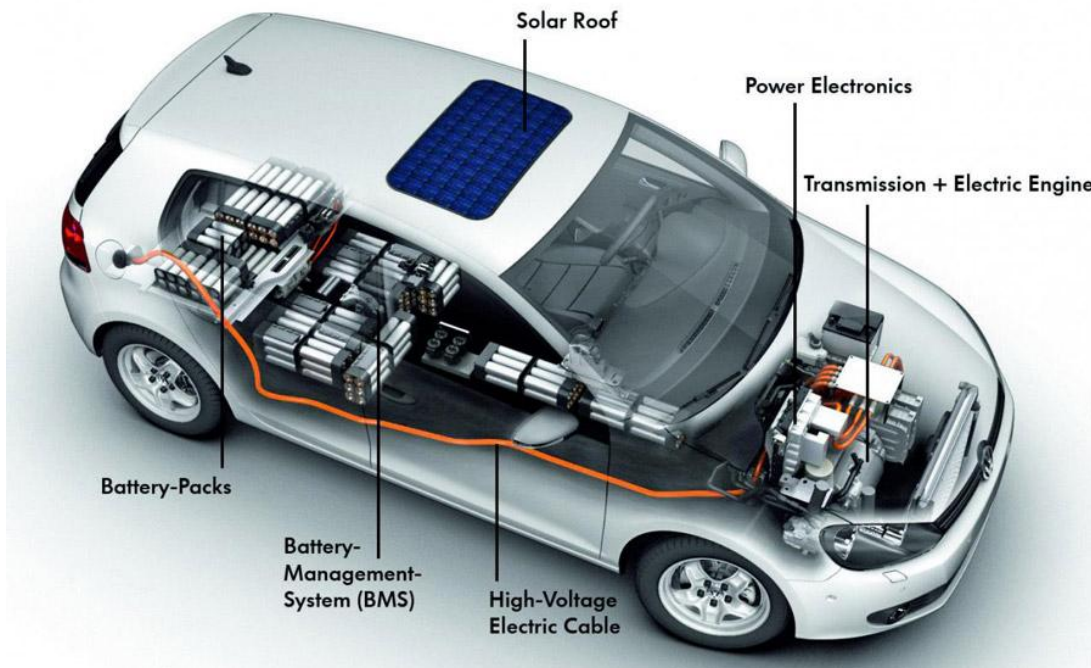
Τα ηλεκτρονικά ισχύος ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι το σύνολο των συστημάτων που χρειάζονται για να λειτουργήσει. Σε αυτά συγκαταλέγονται οι αντιστροφείς, που μετατρέπουν την DC τάση του συστήματος των μπαταριών σε AC τάση ώστε να τροφοδοτηθεί ο ηλεκτροκινητήρας, οι μετατροπείς DC/DC (choppers), οι οποίοι υποβιβάζουν ή ανυψώνουν την τάση λειτουργίας και συστήματα φόρτισης και διασύνδεσης με το εξωτερικό δίκτυο.

Το σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης αφορά όλες τις καλωδιώσεις που χρησιμοποιούνται στο εσωτερικό του ηλεκτρικού οχήματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος από το σύστημα των μπαταριών προς τον ηλεκτροκινητήρα. Προτιμάται η χρήση υψηλότερης τάσης ώστε να επιτυγχάνονται τα ίδια επίπεδα ισχύος με χαμηλότερες τιμές ρεύματος. Κατά συνέπεια δεν χρειάζονται καλώδια μεγάλης διατομής που καταλαμβάνουν πολύ χώρο.

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης με τον ηλεκτροκινητήρα αποτελείται από το κινητήρα του οχήματος που απορροφά ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα των μπαταριών και την μετατρέπει σε κινητική και τον μηχανολογικό εξοπλισμό που συνδέεται στον άξονα του κινητήρα και μεταδίδει την κίνηση στους τροχούς.

Στην εικόνα 1.4 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία από το εσωτερικό ενός ηλεκτρικού οχήματος που λειτουργεί μόνο με συσσωρευτές.





Εικόνα 1. 4 Ηλεκτρικό Όχημα Συσσωρευτών (BEV - BOEV)

Η οροφή με φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελεί μια πηγή ανανεώσιμης ενέργειας και δεν είναι απαραίτητο στοιχείο ενός ηλεκτρικού οχήματος συσσωρευτών.

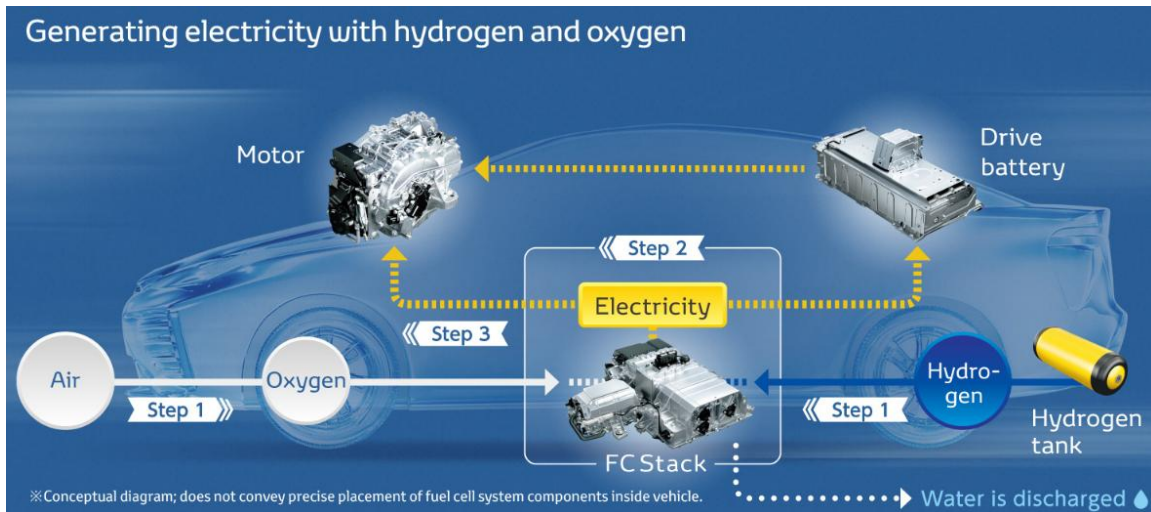
#### 1.3.1.2 Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEV)

Τα ηλεκτρικά οχήματα που βασίζονται στην τεχνολογία κυψελών καυσίμου αποτελούν μια άμεσα βιώσιμη και ρεαλιστική λύση, για την λειτουργία και κίνηση ηλεκτρικών οχημάτων. Πρόκειται για ένα τύπο οχημάτων που μοιάζουν αρκετά με τα υβριδικά, διαφοροποιούνται ωστόσο στο γεγονός ότι λειτουργούν μονάχα με ένα κινητήρα, τον ηλεκτροκινητήρα, επομένως το σύστημα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιείται ως τμήμα του ολικού ηλεκτρικού συστήματος του οχήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις το καύσιμο είναι υδρογόνο.

Τα οχήματα αυτού του τύπου παρουσιάζουν κάποιες κατασκευαστικές ομοιότητες και κάποιες διαφοροποιήσεις σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη ηλεκτρικών οχημάτων. Στις ομοιότητες συγκαταλέγονται η ύπαρξη συστοιχίας μπαταριών, τα ηλεκτρονικά ισχύος, το σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης και το σύστημα μετάδοσης κίνησης με τον ηλεκτροκινητήρα. Όσον αφορά τις διαφοροποιήσεις, τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου έχουν ντεπόζιτο – κυψέλες καυσίμου, ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, ειδικό σύστημα απορρόφησης οξυγόνου και επιπλέον καλωδίωση στο εσωτερικό του οχήματος.

Ο ηλεκτροκινητήρας τροφοδοτείται περίπου όπως και στα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα, μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος, από τις μπαταρίες ή από μια άλλη διάταξη ηλεκτροπαραγωγής. Η βασική ιδέα γύρω από την λειτουργία ηλεκτρικών οχημάτων τύπου FCEV, παρουσιάζεται στην εικόνα 1.5. Η διάταξη ηλεκτροπαραγωγής ή Fuel Cell Stack όπως είναι ευρύτερα γνωστή,

τροφοδοτείται με καύσιμο(υδρογόνο), ενώ από τον αέρα που φιλτράρει παρακρατεί το οξυγόνο. Στη συνέχεια μέσω μιας διαδικασίας ηλεκτροχημικής μετατροπής της ενέργειας το υδρογόνο με τον οξυγόνο μετατρέπονται σε νερό, ενώ παράλληλα παράγεται ηλεκτρισμός και θερμότητα. Ο ηλεκτρισμός που παράγεται έχει μορφή συνεχούς ρεύματος, γεγονός που καθιστά εύκολη την άμεση τροφοδότηση των μπαταριών μέσω ενός μετατροπέα DC/DC. Η διάταξη FCStack τροφοδοτεί τον κινητήρα του οχήματος τόσο απευθείας, όσο και μέσω των μπαταριών. Ανάλογα με το είδος του κινητήρα (AC,DC), χρησιμοποιούνται αντιστροφείς ή μετατροπείς τάσης για την τροφοδότηση του.



Εικόνα 1. 5 Ηλεκτρικό Όχημα Κυψελών Καυσίμου (FCEV)

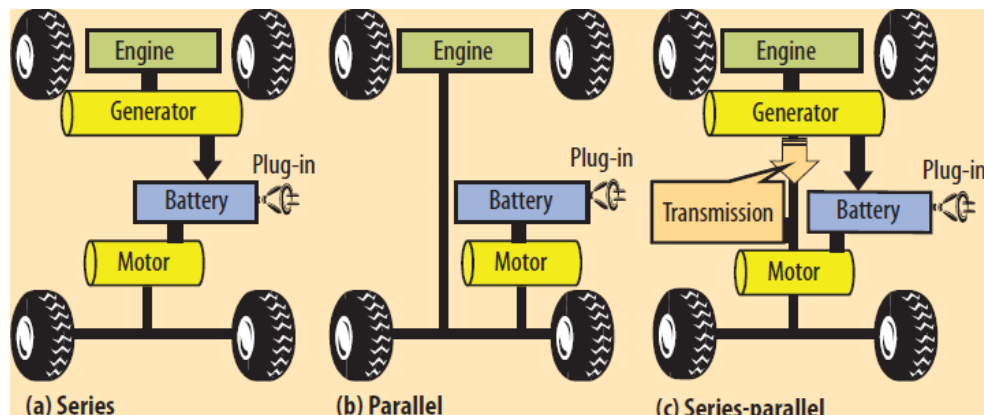
Η ύπαρξη κυψελών καυσίμου πέρα από τη συστοιχία μπαταριών, προσδίδει στο ηλεκτρικό όχημα μεγαλύτερη αυτονομία κίνησης, που φθάνει και τα 500 χιλιόμετρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το αυτοκίνητο Toyota Mirai, για το οποίο το νέο μοντέλο του 2016 έχει αυτονομία 502 χιλιόμετρα.

Από περιβαλλοντικής άποψης τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου έχουν μηδενικό αποτύπωμα, καθώς κατά τη λειτουργία τους δεν ελευθερώνουν βλαβερές ουσίες στο περιβάλλον. Κάθε άλλο, το παράγωγο του είναι καθαρό νερό. Φυσικά το ότι δεν υπάρχει άμεση μόλυνση του περιβάλλοντος δε σημαίνει ότι δε θα υπάρχει και έμμεση. Μόνο αν αναλογιστεί κανείς τα στοιχεία από τα οποία κατασκευάζονται τμήματα του οχήματος, όπως για παράδειγμα οι μπαταρίες, γίνεται αντιληπτό πως η λανθασμένη διαχείριση κατά το πέρας του κύκλου ζωής τους μπορεί να δημιουργήσει τεράστιο πρόβλημα εκπομπών προς το περιβάλλον. Αυτή την περίοδο γίνεται κυρίως προσπάθεια βελτίωσης της απόδοσης και του χρόνου ζωής των μπαταριών και αυτός είναι ο τομέας έρευνα που απασχολεί τους ειδικούς του κλάδου. Στο άμεσο μέλλον ωστόσο αναμένεται να απασχολήσει και σύσταση των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των εξαρτημάτων πέρα από τα στοιχεία που απασχολούν αυτή τη στιγμή.

### 1.3.1.3 Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEV)

Η χρήση οχημάτων, σε μεγαλύτερο ποσοστό, για την μετακίνηση εντός πόλεων και οι πολύ χαμηλές στροφές των κινητήρων που απαιτούνται κατά την κίνηση λόγω της κυκλοφοριακής συμφόρησης σε συνδυασμό με την ευαισθητοποίηση για την προστασία του περιβάλλοντος, έχει αναγκάσει τις αυτοκινητοβιομηχανίες να στραφούν προς πιο αποδοτικές λύσεις. Αυτή των υβριδικών οχημάτων λογίζεται ως μια από τις καλύτερες, ιδιαίτερα την περίοδο που ξεκίνησαν να εισέρχονται τα ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά και χρειαζόταν η προβολή και πώληση οχημάτων που ήταν πολύ γνώριμα στη λειτουργία και την εμφάνιση τους στους χρήστες.

Ο σχεδιασμός των υβριδικών οχημάτων βασίζεται στη συνύπαρξη δύο διαφορετικών μονάδων και τη συνεργασία τους για τη σωστή και αποτελεσματική λειτουργία. Ένα υβριδικό όχημα είναι εφοδιασμένο με ένα σύστημα προώθησης με μηχανή εσωτερική καύση (οι συμβατικοί κινητήρες βενζίνης ή πετρελαίου) και ένα σύστημα ηλεκτροκινητήρα. Ανάλογα με τον τρόπο που συνδέονται οι δύο μονάδες, προσδίδονται στο όχημα πλεονεκτήματα για κίνηση με χαμηλές ή υψηλές στροφές αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και από την εικόνα 1.6, διακρίνονται τρεις τύποι σύνδεσης : η σύνδεση σε σειρά, η παράλληλη σύνδεση και η σύνδεση που συνδυάζει τις δύο προηγούμενες.



Εικόνα 1. 6 Τύποι Υβριδικών Οχημάτων

Κατά την σύνδεση εν σειρά [βλ. εικόνα 1.6(a)], ο ηλεκτροκινητήρας είναι αυτός που δίνει την πρόωση για την κίνηση των τροχών. Ο ηλεκτροκινητήρας τροφοδοτείται αποκλειστικά από τη συστοιχία μπαταριών του οχήματος. Όταν το απόθεμα ενέργειας της μπαταρίας μειωθεί κάτω από ένα όριο, το οποίο ορίζει ο κατασκευαστής, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης ενεργοποιείται και μέσω κατάλληλης διάταξης επαναφορτίζει τις μπαταρίες, έτσι ώστε αυτές με τη σειρά τους να ανατροφοδοτήσουν τον ηλεκτροκινητήρα. Τα οχήματα αυτού του τύπου ονομάζονται και ηλεκτρικά οχήματα αυξημένης αυτονομίας (EREV), αφού η χρήση της μηχανής εσωτερικής καύσης γίνεται για την φόρτιση των συσσωρευτών εν κινήσει. Σε αυτή την περίπτωση η μηχανή εσωτερικής καύσης έχει συνήθως μικρότερο μέγεθος, ενώ η συστοιχία μπαταριών μεγαλύτερο

σε σχέση πάντα με την υλοποίηση με παράλληλη σύνδεση, γεγονός που αυξάνει αρκετά το κόστος κατασκευής.

Όταν πραγματοποιείται παράλληλη σύνδεση των μονάδων [βλ. εικόνα 1.6(b)], ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ του ηλεκτροκινητήρα ή της μηχανής εσωτερικής καύσης για την πρόωση των τροχών του οχήματος. Οι δύο μονάδες δεν συνεργάζονται για την μετάδοση κίνησης. Λειτουργούν ανεξάρτητα, αποκλείοντας μάλιστα τη λειτουργία της μίας όταν η άλλη βρίσκεται σε κίνηση. Στην κατασκευή αυτή χρησιμοποιείται μεγαλύτερη μηχανή εσωτερικής καύσης και μικρότερου μεγέθους ηλεκτροκινητήρα. Παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, ειδικά για την κίνηση σε χαμηλές στροφές, όπου οι μηχανές εσωτερικής καύσης δεν είναι καθόλου αποδοτικές, καθιστώντας έτσι αυτά τα οχήματα πολύ καλές εναλλακτικές των συμβατικών οχημάτων.

Τέλος, κατά την σειριακή – παράλληλη σύνδεση [βλ. εικόνα 1.6(c)], η κίνηση του οχήματος γίνεται περίπου όπως στην παράλληλη σύνδεση, με τη διαφοροποίηση ότι πλέον είναι δυνατή η φόρτιση των συσσωρευτών από τη μηχανή εσωτερικής καύσης. Τα οχήματα αυτού του τύπου, συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων υλοποιήσεων, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την συνολική αποδοτικότητα του οχήματος, τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές ταχύτητες.

#### *1.3.1.4 Ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (PEV)*

Ένα οποιοδήποτε ηλεκτρικό όχημα μπορεί να καλείται Plug-in EV, αν έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου αυτού, όλα τα BEV ανήκουν από κατασκευής τους και στην κατηγορία PEV αφού συνδέονται με το δίκτυο για την φόρτιση τους. Αν θεωρηθεί ότι η κατηγορία FCEV αποτελεί υποκατηγορία των HEV, τότε ορίζεται μια ευρύτερη κατηγορία για όλα τα οχήματα αυτών των τύπων που έχουν δυνατότητα σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, τα PHEV.

Τα υβριδικά οχήματα που έχουν δυνατότητα σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, είναι εφοδιασμένα με μεγαλύτερης χωρητικότητας μπαταρίες, ώστε να έχουν μεγαλύτερη αυτονομία κίνησης με αμιγώς ηλεκτρική ενέργεια, εξοικονομώντας με αυτό τον τρόπο τα αποθέματα καυσίμου (υδρογόνο, υδρογονάνθρακας πετρέλαιο, βενζίνη) του οχήματος.

Τα ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο έχουν στο εσωτερικό τους κατάλληλες διατάξεις ανορθωτών και αντιστροφών για την μετατροπή της τάσης από εναλλασσόμενη σε συνεχή και από συνεχή σε εναλλασσόμενη αντίστοιχα.

Τα PEVs μπορούν να συνδεθούν με οποιασδήποτε μορφής δίκτυο, είτε αυτό είναι το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, είτε το δίκτυο διανομής, είτε είναι κάποιο μικροδίκτυο, είτε απλά μια πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Τα οχήματα αυτού του τύπου έχουν τόσο ικανότητα φόρτισης από το δίκτυο, όσο και εκφόρτισης προς αυτό όταν απαιτείται.

Η ικανότητα φόρτισης και εκφόρτισης λογίζεται ως ένα τεράστιο πλεονέκτημα από τους διαχειριστές του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς όταν πρόκειται για μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων οχημάτων είναι δυνατή η σταθεροποίηση του συστήματος, εγγέροντας άμεσα απαιτούμενη ενέργεια ή καταναλώνοντας παραπάνω ενέργεια ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο προστατεύεται το δίκτυο από μη επιθυμητές τιμές, υπερβολικής χωρητικής ή επαγωγικής συμπεριφοράς σε διάφορα σημεία. Για να γίνει αντιληπτό το πόσο σημαντικό ρόλο μπορεί να έχουν τα συνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα για τη σταθεροποίηση του δικτύου, αναφέρεται ότι ένα μέσο ηλεκτρικό όχημα μπορεί να παρέχει ισχύ 50kW. Αν επίσης ληφθεί υπόψιν ότι κατά μέσο όρο ένα όχημα μένει σταθμευμένο το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της μέρας, συμπεραίνεται εύκολα ότι από ένα ικανοποιητικό αριθμό οχημάτων μπορεί να δοθεί στο σύστημα αξιοπιστία, λόγω διττής εφεδρείας της τάξης των MW, με ικανότητα αποθήκευσης ή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

### 1.3.2 Κατηγορίες Συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές είναι διατάξεις που μετατρέπουν χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η λειτουργία τους βασίζεται στην κίνηση ηλεκτρονίων από ένα πλακίδιο που ονομάζεται άνοδος προς ένα άλλο που ονομάζεται κάθοδος. Ανάμεσα στις δύο πλάκες υπάρχει ένας ηλεκτρολύτης που απαγορεύει στα ηλεκτρόνια να τον διαπεράσουν αναγκάζοντας με αυτό τον τρόπο τα ηλεκτρόνια να βρουν άλλη αγωγή οδό για να φτάσουν στην κάθοδο, ώστε να επέλθει εκ νέου ισορροπία στο σύστημα.

Για να μπορεί να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ των διαφόρων τύπων μπαταριών και να μπορεί να επιλεγεί η βέλτιστη λύση ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής, κάθε μπαταρία χαρακτηρίζεται από : μια τιμή ενεργειακής πυκνότητας ανά μονάδα βάρους (Wh/kg) που δίνει την ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονά βάρους, μια τιμή που αφορά την πυκνότητα ισχύος (W/kg) που δίνει την μέγιστη ισχύ τροφοδοσίας της μπαταρίας, ένα αριθμό για τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης, τον βαθμό απόδοσης και την ικανότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (Ah).

Ο τρόπος λειτουργίας που αναφέρθηκε συνοπτικά παραπάνω μπορεί να πραγματοποιηθεί με αρκετούς διαφορετικούς συνδυασμούς στοιχείων, καθένας από τους οποίους παρουσιάζει ιδιαίτερα προτερήματα σε κάποια χαρακτηριστικά και μειονεκτήματα ως προς κάποια άλλα. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα είναι : μολύβδου-οξέος, Νικελίου-καδμίου, Ιόντων λιθίου και Νικελίου-μετάλλου υδριδίου.

- Μπαταρίες Μολύβδου-οξέος (lead-acid) : Εφευρέθηκαν το 1859 από τον Γάλλο Gaston Planté και αποτελούν τις πρώτες μπαταρίες με ικανότητα επαναφόρτισης. Χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (35 Wh/kg), πολύ μεγάλο όγκο, και πολύ χαμηλό κόστος κατασκευής γεγονός που σε συνδυασμό με την ωριμότητα της τεχνολογίας κάνει τους κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων να προτιμούν

μπαταρίες αυτού του τύπου. Οι μπαταρίες Μολύβδου-οξέος παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία στις καιρικές συνθήκες και τη διαχείριση φόρτισης τους που μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την μεγάλη μείωση του χρόνου ζωής τους.

- Μπαταρίες Νικελίου–καδμίου (Ni-Cd) : Είναι οι πρώτες αλκαλικές μπαταρίες. Κατασκευάστηκαν από τον Σουηδό Waldemar Jungner το 1899 και η λειτουργία τους βασιζόταν σε δύο ηλεκτρόδια, ένα νικελίου και ένα καδμίου, ενώ μεταξύ αυτών χρησιμοποιούνταν ηλεκτρολύτης υδροξειδίου του καλίου, ο πρώτος αλκαλικός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιήθηκε σε μπαταρία. Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου υπερτερούν στα περισσότερα χαρακτηριστικά έναντι των μπαταριών μολύβδου-οξέος, παρουσιάζοντας υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα (50 Wh/kg), πολύ μεγάλη ανθεκτικότητα σε ακραίες θερμοκρασίες, υψηλές αποφορτίσεις, ενώ έχουν και μεγάλο αριθμό κύκλων ζωής. Ωστόσο, το πολύ υψηλό κόστος και η τοξικότητα του καδμίου μειώνουν σε μεγάλο βαθμό την χρήση αυτών των συσσωρευτών.
- Μπαταρίες Νικελίου–μετάλλου-υδριδίου (Nickel-metal-hydride - NiMH) : Οι πρώτες μπαταρίες νικελίου μετάλλου υδριδίου εμφανίστηκαν στην αγορά το 1989 ως παραλλαγή των μπαταριών νικελίου-υδρογόνου. Εμφανίζουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής από τις μπαταρίες νικελίου καδμίου, ενώ με την πρόοδο και την συνεχή έρευνα στο τομέα ο χρόνος αυτός αυξάνεται. Επιπλέον, το γεγονός ότι δεν έχει τοξικά στοιχεία, όπως το κάδμιο, κάνει τις μπαταρίες νικελίου μετάλλου υδριδίου πιο φιλικές προς το περιβάλλον. Στα αρνητικά συγκαταλέγονται η υψηλή αυτοεκφόρτιση και ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που μειώνεται ακόμη περισσότερο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.
- Μπαταρίες Ιόντων λιθίου (lithium-ion) : Από το 1912 είχαν αρχίσει οι πειραματισμοί και οι έρευνες γύρω από τις μπαταρίες που βασίζονται στο λίθιο, ένα πολλά υποσχόμενο χημικό στοιχείο για τον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας, αφού σε πολύ χαμηλή πυκνότητα παρουσίαζε υψηλές τιμές ενέργειας προς βάρος (Wh/kg). Παρά τις πρώιμες έρευνες, οι μπαταρίες λιθίου κυκλοφόρησαν στην αγορά την δεκαετία του 1970, ενώ οι πρώτες μπαταρίες ιόντων λιθίου δημιουργήθηκαν το 1985 από μια ιαπωνική ερευνητική ομάδα με επικεφαλής τον Akira Yoshino. Εμπορικά έγιναν διαθέσιμες από την εταιρία Sony το 1991. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου που χρησιμοποιούνται στην αποθήκευση ενέργειας σε ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν πολύ εντυπωσιακά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες. Έχουν ενεργειακή πυκνότητα πάνω από 200Wh/kg, υψηλή πυκνότητα ισχύος και αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης στους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 80 και 90%. Στον αντίποδα, έχουν πολύ μικρό χρόνο ζωής, της τάξης των χιλιάδων κύκλων φόρτισης εκφόρτισης, είναι επικίνδυνες αφού μπορεί να εκραγούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ενώ επίσης είναι επιβλαβή για το περιβάλλον καθώς κατά την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται και τοξικά στοιχεία. Τα αρνητικά αυτά στοιχεία γίνεται συνεχής προσπάθεια, αν όχι να απαλειφθούν, τότε έστω να συρρικνωθούν κατά το δυνατόν, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με τη χρήση άλλων παραλλαγών για μπαταρίες ιόντων λιθίου.

#### 1.4 Υποδομές Φόρτισης και διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων

Έχοντας παρουσιάσει τα σημαντικότερα στοιχεία σχετικά με τα είδη και τον τρόπο λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων, στην παρούσα παράγραφο θα αναφερθούν κάποια στοιχεία που αφορούν τις υποδομές που απαιτούνται, ώστε να είναι δυνατή η σύνδεση, η φόρτιση ή εκφόρτιση και η διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορεί να αποτελούν μια τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα των μεταφορών, αλλά λόγω της ιδιαίτερης κατασκευής και λειτουργίας τους που στηρίζεται σε μπαταρίες και κίνηση με ηλεκτρική ενέργεια, έχουν ήδη δημιουργήσει ενδιαφέρον για έρευνα στον τομέα της μεταφοράς, πρόβλεψης και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την πλευρά του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, τα ηλεκτρικά οχήματα αντιμετωπίζονται ως μικρές εγκαταστάσεις παραγωγής ή απορρόφησης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διαχειριστές των δικτύων τα λαμβάνουν υπόψιν τους ως κινούμενες μπαταρίες που έχουν τη δυνατότητα παροχής ή απορρόφησης ηλεκτρικής ισχύος της τάξης των δεκάδων έως λίγων εκατοντάδων kW.

Αν τα ηλεκτρικά οχήματα ληφθούν υπόψιν ως παθητικά στοιχεία, που καταναλώνουν ενέργεια, τότε γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η μεγάλη διείσδυση στην αγορά θα έχει ως αποτέλεσμα την υπερφόρτωση του δικτύου και σε πολλές περιπτώσεις την αδυναμία εξυπηρέτησης της υπέρμετρης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η ιδέα μεγάλης διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων δε θα έπρεπε να χαροποιεί τους μηχανικούς που εργάζονται στη διαχείριση και παραγωγή ενέργειας. Το γεγονός που λαμβάνουν υπόψιν τους ως προτέρημα μιας επικείμενης διείσδυσης, είναι η αρχιτεκτονική λειτουργίας των οχημάτων αυτού του τύπου που βασίζεται σε μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας και διόλου ευκαταφρόνητης ικανότητας παροχής ισχύος, που μπορεί με κατάλληλη διαχείριση να παρέχεται στο δίκτυο σε ώρες αιχμής.

Ολόκληρη η διαδικασία “vehicle to grid” (V2G) αναφέρεται στην μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από ένα σύνολο ηλεκτρικών οχημάτων προς το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σε χρονικές περιόδους που τα οχήματα είναι σταθμευμένα. Το παραπάνω σκεπτικό λαμβάνει ως δεδομένο ότι κάθε ηλεκτρικό όχημα θα έχει τη δυνατότητα διασύνδεσης με το δίκτυο, θα είναι δηλαδή “plug-in electric or hybrid vehicle”. Αν το όχημα ανήκει σε κατηγορία με δυνατότητα διασύνδεσης, τότε είναι αυτονόητο ότι κατέχει κατάλληλο εξοπλισμό με αντιστροφείς και ανορθωτές, ώστε να είναι δυνατή η μετατροπή της DC τάσης σε AC των 50Hz για έγχυση ισχύος προς το δίκτυο και το αντίθετο για απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο.

Τα ηλεκτρικά οχήματα θα φορτίζονται κατά περιόδους χαμηλής ζήτησης ισχύος (αργά το βράδυ) ή όταν υπάρχει περίσσεια ισχύος (από παραγωγή ΑΠΕ), ενώ θα παρέχουν ισχύ στο δίκτυο σε περιόδους αιχμής (απογευματινές ώρες). Επειδή ακριβώς η δομή ενός ΣΗΕ είναι τέτοια που απαιτεί να τηρείται το ισοζύγιο ισχύος ανά πάσα στιγμή, η διείσδυση μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων, μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία του συστήματος, σταθεροποιώντας την τάση λειτουργίας και ρυθμίζοντας τη συχνότητα λειτουργίας λόγω της ταχείας απόκρισης των μπαταριών.

Για να είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ του δικτύου και των ηλεκτρικών οχημάτων, απαιτείται τόσο σύνδεση ισχύος, μέσω της οποίας τροφοδοτείται το δίκτυο με ισχύ από τα οχήματα, όσο και σύνδεση ελέγχου, μέσω της οποίας μεταφέρονται σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση εκφόρτισης του οχήματος, τα ποσά ενέργειας που μεταφέρονται ανά πάσα στιγμή προς το δίκτυο και βασικές πληροφορίες για την ταυτότητα του οχήματος. Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιείται μέσω μιας διάταξης που θα είναι εγκατεστημένη είτε σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος στο εσωτερικό των ηλεκτρικών οχημάτων, είτε στους σταθμούς φόρτισης όπου συνδέονται τα οχήματα.

Τα δεδομένα από ένα σύνολο σταθμών φόρτισης, λαμβάνονται από ένα διαμεσολαβητή (aggregator). Αυτός με τη σειρά του ενημερώνει τον κεντρικό διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς (πρώην ΔΕΣΜΗΕ, νυν ΛΑΓΗΕ + ΑΔΜΗΕ) σχετικά με τη δυνατότητα παροχής ή αποθήκευσης ενέργειας. Όλα τα ηλεκτρικά οχήματα είναι εξοπλισμένα με ένα σύστημα τηλεματικής, μέσω του οποίου αποστέλλονται βασικές πληροφορίες σχετικές με την ταυτοποίηση του οχήματος, τον εντοπισμό της γεωγραφική θέση του οχήματος με GPS ή από δίκτυο κινητής και την πλήρη καταγραφόμενη ενέργεια που ανταλλάσσεται και όχι απλά το συνολικό ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δικτύου και οχήματος ώστε να είναι η δυνατή η ακριβής κοστολόγηση.

Συστήματα ελέγχου εγκαθίστανται στα ηλεκτρικά οχήματα κατά την παραγωγή τους στα εργοστάσια, παρ'όλ'αυτά είναι πιθανόν να εγκαθίστανται και σε σταθμούς φόρτισης, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία των δεδομένων, αφού είναι πιθανόν επιτήδειοι ιδιοκτήτες οχημάτων να παραποιούν τα δεδομένα που αποστέλλει το σύστημα του οχήματος, προκειμένου να αποκομίσουν κέρδος.

#### 1.4. 1 Ευφυή Δίκτυα

Το υφιστάμενο ελληνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο στον ηπειρωτικό κορμό όσο και στο νησιωτικό, στερείται βασικού εξοπλισμού, ώστε να είναι δυνατή η διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων υπό τη λογική V2G που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Για να μπορεί να υποστηρίξει νέας μορφής τεχνολογίες είναι απαραίτητη η αναβάθμιση του σε “ευφύες δίκτυο”.

Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή τεχνολογική πλατφόρμα για τα ηλεκτρικά δίκτυα του μέλλοντος [4], ευφύες ονομάζεται ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να ενσωματώσει με έξυπνο τρόπο πληροφορίες σχετικές με τις απαιτήσεις των χρηστών που συνδέονται σε αυτό. Συλλέγει και επεξεργάζεται δεδομένα από παραγωγούς, καταναλωτές και από χρήστες που έχουν και τις δύο ιδιότητες (π.χ. ηλεκτρικά οχήματα που συνδέονται στο δίκτυο), έτσι ώστε να προσφέρει αποτελεσματικά βιώσιμη, οικονομική και ασφαλή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Δηλαδή, το έξυπνο δίκτυο αποτελεί ένα απλό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο όμως μέσω έξυπνων μετρητών και γενικότερα έξυπνων συσκευών συλλέγει ένα σύνολο από λειτουργικούς και ενεργειακούς δείκτες, με τη βοήθεια των οποίων είναι σε θέση να διαχειριστεί με αποδοτικό



τρόπο τεχνολογίες, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα επερχόμενα ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο και άλλες μονάδες παραγωγής και κατανάλωσης του συστήματος.

Τα έξυπνα δίκτυα υιοθετούν καινοτόμα προϊόντα και υπηρεσίες σε συνδυασμό με τεχνολογίες έξυπνης παρακολούθησης, ελέγχου, επικοινωνίας και αυτόματης διάγνωσης και αντιμετώπισης σφαλμάτων, προκειμένου να :

- Διευκολυνθεί η σύνδεση και λειτουργία μονάδων (γεννητριών) όλων των μεγεθών και τεχνολογιών.
- Επιτρέπεται στους καταναλωτές να διαδραματίζουν κάποιο ρόλο στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος.
- Παρέχονται στους καταναλωτές περισσότερες πληροφορίες και μεγαλύτερη ελευθερία στην επιλογή προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας με την απελευθέρωση της αγοράς.
- Μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από το συνολικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.
- Διασφαλιστούν υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας του συστήματος, αλλά και της ποιότητας παροχής υπηρεσιών (αδιάληπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας).
- Αναπτυχθεί μια ολοκληρωμένη ευρωπαϊκή αγορά.

Βασικά χαρακτηριστικά ενός έξυπνου δικτύου είναι : η αξιοπιστία, η ευελιξία, η αποδοτικότητα, η εξισορρόπηση φορτίου, η εξομάλυνση αιχμής, η βιωσιμότητα, η τροφοδότηση του χρηματιστηρίου ηλεκτρικής ενέργειας με δεδομένα και η άμεση ανταπόκριση σε μεταβολή της ζήτησης.

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται συσκευές SCADA για την μετάδοση δεδομένων σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, που αφορούν τους σταθμούς παραγωγής και κάποιους κρίσιμους κόμβους του δικτύου μεταφοράς μόνο. Πρόσφατα ενεργοποιήθηκε μια σειρά επενδύσεων για τον εκσυγχρονισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε διάφορους κόμβους του δικτύου διανομής. Η συγκεκριμένη ενέργεια συνδυαζόμενη με κάποιες άλλες κινήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, αναμένεται να βοηθήσει ιδιαίτερα στην είσοδο μονάδων παραγωγής μικρής ισχύος, όπως θα μπορούσαν να θεωρηθούν τα ηλεκτρικά οχήματα, τόσο σε μικροδίκτυα όσο και στο διασυνδεδεμένο δίκτυο.

Η εγκατάσταση μετρητών και η προετοιμασία του δικτύου για την υποδοχή νέων τεχνολογιών είναι ένα βήμα προς τη σωστή κατεύθυνση, ωστόσο ειδικά για τεχνολογίες όπως αυτές των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτούνται επιπλέον επενδύσεις στον τομέα των υποδομών και οι οποίες αφορούν τους σταθμούς φόρτισης και εκφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων από και προς το δίκτυο διανομής αντίστοιχα.

### 1.4.2 Σταθμοί Φόρτισης

Οι σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούν τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στα οχήματα και το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσω αυτών ενημερώνεται ο διαχειριστής του δικτύου για την ικανότητα αποθήκευσης και απορρόφησης ενέργειας, ενώ αποτελούν επίσης τη διεπαφή που χρησιμοποιείται για την ταχεία και αξιόπιστη φόρτιση των οχημάτων.

Οι σταθμοί φόρτισης διακρίνονται σε δύο είδη ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιούν για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από και προς το όχημα.

#### 1.4.2.1 Φόρτιση με Επαφή

Στη μέθοδο φόρτισης με επαφή, το ηλεκτρικό όχημα συνδέεται με ειδικό καλώδιο στο σταθμό και πραγματοποιείται η φόρτιση. Αναλυτικότερα, το ηλεκτρικό όχημα απαιτείται να έχει κατάλληλο εξοπλισμό, που αποτελείται από ανορθωτές, αντιστροφείς και μονάδες ελέγχου ροής ισχύος, για τη διασύνδεση με ένα σταθμό. Οι διατάξεις ανόρθωσης και αντιστροφής είναι απαραίτητες για να μπορεί το όχημα να συνδεθεί σε σταθμό ανεξάρτητα με το αν αυτός λειτουργεί με εναλλασσόμενο ή συνεχές ρεύμα. Η μονάδες ελέγχου χρειάζεται τόσο για την διασφάλιση σωστής φόρτισης (έλεγχος επαφής, εξακρίβωση ροής, προστασία συστήματος από υπέρταση ή υπερένταση), όσο και για την λήψη δεδομένων σχετικών με τη φόρτιση. Μονάδα ελέγχου υπάρχει εξίσου και στο σταθμό φόρτισης, ώστε να λαμβάνει δεδομένα και από την πλευρά του.

Η φόρτιση με επαφή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διαφορετικά επίπεδα τάσης και μορφές ρεύματος. Η επιλογή του συνδυασμού που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το χώρο που εγκαθίσταται ο σταθμός και από τις απαιτήσεις σε ταχύτητα φόρτισης.

#### Φόρτιση με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC)

Κατά τη φόρτιση εξ επαφής με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος είναι απαραίτητη η χρήση της ανορθωτικής διάταξης του οχήματος, ώστε να μπορεί να τροφοδοτηθεί η μπαταρία που λειτουργεί με συνεχές ρεύμα. Η φόρτιση μπορεί να γίνει από μονοφασική ή τριφασική παροχή.

Φόρτιση από μονοφασική παροχή πραγματοποιείται ως επί των πλείστων σε ιδιωτικούς χώρους στάθμευσης σπιτιών, όπου η παροχή είναι ούτως η άλλως μονοφασική [βλ. Εικόνα 1.7]. Εξαιτίας της χαμηλής τάσης των 230V που παρέχει η μονοφασική σύνδεση, η φόρτιση του οχήματος είναι αρκετά αργή.



*Εικόνα 1. 7 Φορτιστής με μονοφασική παροχή*

Υπάρχει δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε δύο επίπεδα ρεύματος, ανάλογα με την ασφάλεια και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Το χαμηλότερο επίπεδο είναι αυτό των 10-14A (με χρήση ασφάλειας 16A), ενώ το ανώτερο επίπεδο είναι αυτό των 30A (με χρήση ασφάλειας 32A). Στην πρώτη περίπτωση χρειάζονται περίπου 10ώρες για τη φόρτιση μιας μέσης μπαταρίας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η φόρτιση μπορεί να ολοκληρωθεί σε περίπου 5 ώρες.

Όταν πραγματοποιείται φόρτιση από τριφασική παροχή το επίπεδο τάσης αυξάνεται στα 400V, οπότε δίνεται η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε χαμηλότερη τιμή ρεύματος, με γνώμονα την αύξηση της ασφάλειας των χρηστών, με την οποία ολοκληρώνεται η φόρτιση σε περίπου 4 ώρες ή επιλέγεται ακόμη ταχύτερη φόρτιση, της τάξης της 1 ώρας, με αύξηση της τιμής του ρεύματος, κίνηση η οποία απαιτεί τη λήψη επιπλέον μέτρων για την προστασία του εξοπλισμού και των χρηστών. Η φόρτιση με τριφασική παροχή συναντάται κυρίως σε δημόσιους σταθμούς ή σε ιδιωτικούς σταθμούς δημόσια χρήσης, όπως είναι οι σταθμοί των εμπορικών κέντρων [βλ. Εικόνα 1.8].



Εικόνα 1. 8 Χώρος στάθμευσης εξοπλισμένος με φορτιστές τριφασικής παροχής

### Φόρτιση με συνεχές ρεύμα (DC)

Η φόρτιση με χρήση συνεχούς ρεύματος συγκαταλέγεται στις μεθόδους ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Επειδή η παροχή είναι συνεχούς ρεύματος και οι συσσωρευτές των οχημάτων φορτίζονται επίσης με συνεχές ρεύμα, δεν απαιτείται η χρήση ανορθωτικών διατάξεων γεγονός που αυξάνει την ταχύτητα φόρτισης των μπαταριών, ολοκληρώνοντας την σε λιγότερο από μία ώρα. Για τη φόρτιση χρησιμοποιούνται γεννήτριες συνεχούς ρεύματος ή ανορθωτικές διατάξεις από την πλευρά του σταθμού φόρτισης. Φορτιστές συνεχούς ρεύματος συναντώνται σε δημόσιους σταθμούς φόρτισης [βλ. Εικόνα 1.9].



Εικόνα 1. 9 Αριστερά : Πιστοποίηση και χρέωση χρήστη. Δεξιά : Δημόσιος φορτιστής με DC παροχή

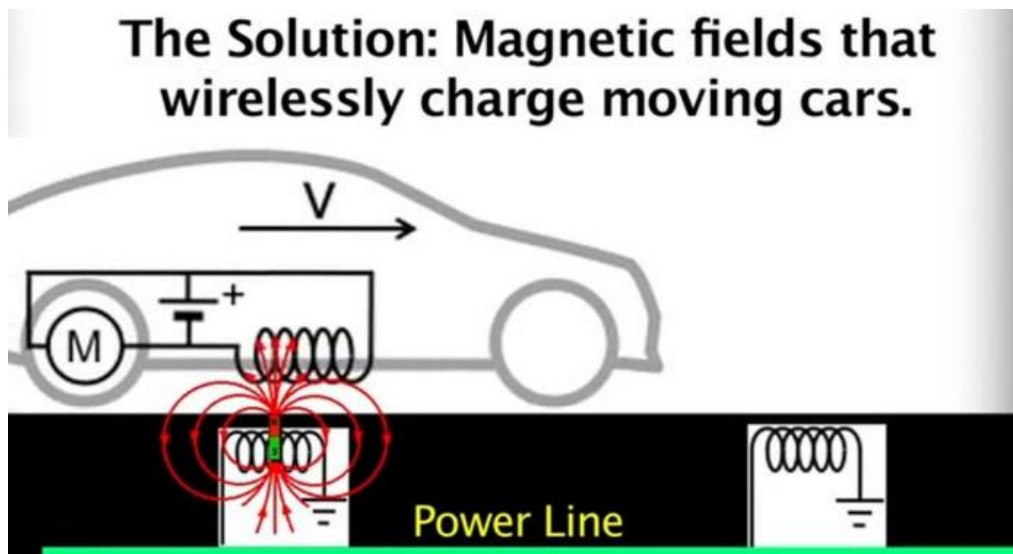
Ανάλογα με το επίπεδο τάσης, την ταχύτητα φόρτισης και τη μορφή του ρεύματος που χρησιμοποιείται, διακρίνονται 3 επίπεδα φόρτισης. Στο πρώτο επίπεδο ανήκει η φόρτιση από

μονοφασική παροχή χαμηλής τιμής ρεύματος, στο επίπεδο 2 η φόρτιση από μονοφασική παροχή με υψηλή τιμή ρεύματος και η τριφασική παροχή με χαμηλή τιμή ρεύματος και στο επίπεδο 3 η φόρτιση από τριφασική παροχή με υψηλή τιμή ρεύματος και η φόρτιση από παροχή συνεχούς ρεύματος.

#### 1.4.2.2 Επαγωγική Φόρτιση

Στη μέθοδο φόρτισης με επαγωγή, κανένα τμήμα του σταθμού δεν έρχεται σε άμεση επαφή με κάποιο εξάρτημα του οχήματος. Η διαδικασία φόρτισης στηρίζεται στην αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, σύμφωνα με την οποία εμφανίζεται ηλεκτρισμός εξετίας αναπτυσσόμενων μαγνητικών πεδίων. Μια διαταραχή της ισορροπίας του χώρου έχει ως συνέπεια την μεταβολή της μαγνητικής ροής γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού μεταξύ των άκρων ενός αγωγού. Η διαταραχή του ηλεκτρικού πεδίου αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς μια κατεύθυνση, ώστε να επανέλθει το σύστημα σε ισορροπία.

Στην περίπτωση της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων υπάρχουν δύο τύλιγματα, όπως και στους μετασχηματιστές. Το πρωτεύον βρίσκεται στην πλευρά τροφοδοσίας, ενώ το δευτερεύον στην πλευρά του οχήματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.10. Όταν ένα όχημα, εξοπλισμένο με κατάλληλη διάταξη τυλίγματος, κινηθεί πάνω από το πρωτεύον τύλιγμα που βρίσκεται στο σταθμό φόρτισης, διαταρράσει το μαγνητικό πεδίο που βρίσκεται σε ισορροπία μέχρι εκείνη τη στιγμή και αναγκάζει την ανακατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Έτσι ενεργοποιείται η ροή ηλεκτρονίων στο δευτερεύον τύλιγμα που βρίσκεται στο όχημα. Επειδή το ρεύμα που αναπτύσσεται έχει εναλλασσόμενη μορφή, ενώ η συστοιχία μπαταριών λειτουργεί με συνεχές ρεύμα, χρησιμοποιείται μια ανορθωτική διάταξη πριν την τροφοδότηση των συσσωρευτών.



Εικόνα 1. 10 Αρχή λειτουργίας επαγωγικής φόρτισης εν κινήσει



Εικόνα 1. 11 Επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων σε λωρίδα αυτοκινητόδρομου

Η φόρτιση εξ επαγωγής παρουσιάζει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα έναντι της φόρτισης με επαφή, καθώς αφενός μπορεί να πραγματοποιηθεί απλά με τη στάθμευση του οχήματος σε χώρο που υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός, χωρίς να απαιτούνται καλώδια μεγάλου μήκους και όγκου, και αφετέρου επιτρέπει στα ηλεκτρικά οχήματα να φορτίσουν τις μπαταρίες τους εν κινήσει [βλ. Εικόνα 1.11]. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της επαγωγικής φόρτισης είναι η ηλεκτρική απομόνωση του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στο πρωτεύον και η προστασία που παρέχεται στους χρήστες αφού δεν χρειάζεται να έρθουν σε επαφή με τυχόν ηλεκτροφόρα καλώδια.

Παρά τα θετικά που παρουσιάζουν οι σταθμοί φόρτισης εξ επαγωγής, δεν είναι το ίδιο διαδεδομένοι με τους σταθμούς φόρτισης με επαφή κυρίως λόγω της διαφοράς κόστους που παρουσιάζουν.

#### 1.4.3 Πρότυπα και Διατάξεις

Ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία που έχει αυξηθεί πολύ το ενδιαφέρον γύρω από την τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων, έχουν σχεδιαστεί μια σειρά προτύπων με στόχο την σύγκλιση διαφόρων ιδεών προς μια κατεύθυνση. Όσον αφορά την ελληνική επικράτεια, αρκετά πρόσφατα (2015), εκδόθηκε φύλλο εφημερίδας της κυβέρνησης στο οποίο αναφέρονται στοιχεία σχετικά με τα ηλεκτρικά οχήματα και τις διατάξεις φόρτισης των μπαταριών αυτών.

Βάσει νομοθεσίας, όπως αναγράφεται στην παράγραφο 2 του άρθρου 1 της έκδοσης ΦΕΚ 50B 2015 [5], ως ηλεκτροκίνητα οχήματα νοούνται τα αυτοκίνητα και δίτροχα των κατωτέρω κατηγοριών:

---

α) Επαναφορτιζόμενα υβριδικά με ηλεκτρική ενέργεια από εξωτερική πηγή (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEV*), στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμο-ποιείται για την κίνηση τους παρέχεται κυρίως από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και αποθηκεύεται στους συσσωρευτές τους.

β) Ηλεκτροκίνητα με συσσωρευτές και ηλεκτροπαραγωγική μονάδα (*Extended Range Electric Vehicles– E-REV*), η οποία δεν συνδέεται με τους κινητήριους τροχούς του οχήματος και δεν σχετίζεται με την πρόωση του. Το όχημα κινείται αποκλειστικά από τον ηλεκτροκινητήρα (ή τους ηλεκτροκινητήρες), η κίνηση του είναι αμιγώς ηλεκτρική όπως ακριβώς συμβαίνει και με τα ηλεκτρικά οχήματα τύπου *BEV*.

γ) Ηλεκτροκίνητα με συσσωρευτές (*Battery Electric Vehicles – BEV*), τα οποία είναι αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα, η κίνηση των οποίων παρέχεται αποκλειστικά από ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στους συσσωρευτές τους.

---

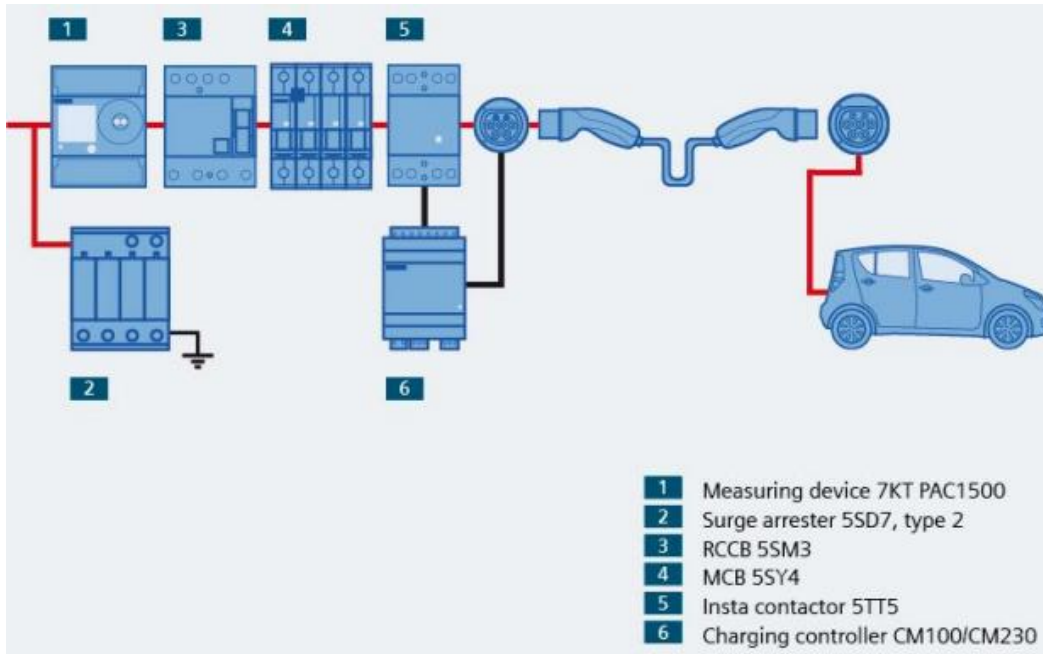
Στο άρθρο 2 της ίδιας έκδοσης ΦΕΚ αναγράφονται οι προϋποθέσεις που οφείλει να πληροί ένας σταθμός φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, ώστε να επιτρέπεται η νόμιμη λειτουργία του εντός της ελληνικής επικράτειας. Αρχικά στην παράγραφο 1 γίνεται λόγος για τις αποδεκτές μεθόδους φόρτισης, που είναι η μέθοδος 3 (Mode 3 AC Charging) και η μέθοδος 4 (Mode 4 DC Charging), όπως αυτές καθορίζονται από το πρότυπο IEC 61851-1 «Electric Vehicle Conductive Charging System». Στην ίδια παράγραφο γίνεται αναφορά και στα αποδεχτά είδη ακροδεκτών που χρησιμοποιούνται από τις συσκευές φόρτισης, οι οποίοι καθορίζονται από το πρότυπο IEC 62196-2 «Plugs Socket-outlets, Vehicle Couplers and Vehicle Inlets-Conductive Charging of Electric Vehicles», ενώ παράλληλα αναφέρεται ιδιαίτερα στους ακροδέκτες που επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν για τις μεθόδους 3 και 4 και οι οποίοι καθορίζονται από τα πρότυπα IEC 62196-2 "Type 2" (VDE-AR-E-2623-2-2) και IEC 62196-2 "Type 3" (DC Compro 2) αντίστοιχα. Γίνεται δε ειδικά μνεία στο πρωτόκολλο CHAdeMO και στους ακροδέκτες που ακολουθούν τις προδιαγραφές του για τη μέθοδο φόρτισης 4. [5]

#### Μέθοδος φόρτισης 3 (Mode 3 AC Charging)

Η μέθοδος αυτή προβλέπει την ύπαρξη απευθείας αγωγίμης σύνδεσης του ηλεκτρικού οχήματος με την παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος, αλλά απαιτείται μια ειδική μόνιμη ηλεκτρική παροχή η οποία οφείλει να είναι εφοδιασμένη με μονάδα εποπτείας και διαχείρισης της φόρτισης, με την οποία συνδέεται ο αγωγός σημάτων επικοινωνίας [βλ. Εικόνα 1.12].

Η διάταξη περιλαμβάνει συσκευές : μέτρησης ενεργειακών δεδομένων (ενεργός και άεργος ισχύς) (measuring device), προστασίας από υπέρταση και υπερένταση (surge arrester), προστασίας από διαρροή ρεύματος (RCCB), προστασίας κυκλώματος από υπερένταση (MCB),

ενεργοποίησης και απενεργοποίησης τροφοδοσίας τάσης προς τους ακροδέκτες φόρτισης (insta contactor) και ελέγχου φόρτισης (charging controller).



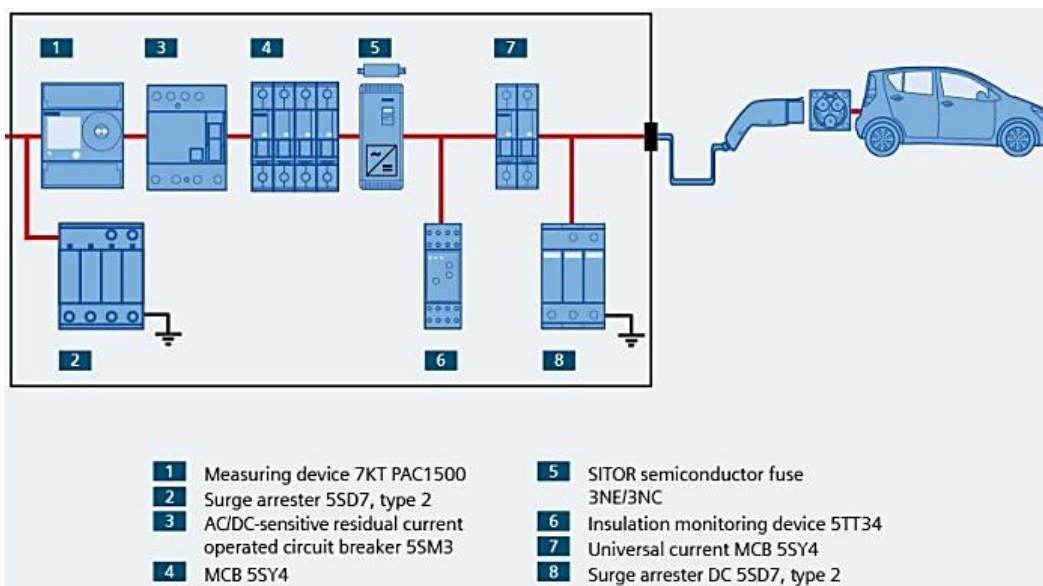
Εικόνα 1. 12 Υποδομή μονάδας φόρτισης με τη μέθοδο 3

#### Μέθοδος φόρτισης 4 (Mode 4 DC Charging)

Η τέταρτη μέθοδος φόρτισης πραγματοποιείται με την εγκαθίδρυση έμμεσης αγωγίμης οδού ανάμεσα στην ηλεκτρική παροχή και το ηλεκτρικό όχημα. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένας ανορθωτής που μετατρέπει την εναλλασσόμενη μονοφασική ή τριφασική τάση της παροχής σε τάση DC. Ο ανορθωτής είναι υποχρεωτικά εγκατεστημένος στην πλευρά της μόνιμης εγκατάστασης παροχής και είναι συνεχώς συνδεδεμένος με το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, δεν χρησιμοποιείται η αντίστοιχη διάταξη από το εσωτερικό του οχήματος. Η μέθοδος προτιμάται κυρίως για την ταχεία φόρτιση που προσφέρει και φυσικά αποτελεί την πιο ακριβή επιλογή για εγκατάσταση φόρτισης.

Οι σταθμοί φόρτισης που λειτουργούν σύμφωνα με τη μέθοδο 4 του προτύπου IEC 61851-1, οφείλουν να περιλαμβάνουν συσκευές : μέτρησης ενεργειακών δεδομένων (ενεργός και άεργος ισχύς) (measuring device), προστασίας από υπέρταση και υπερένταση (surge arrester), προστασίας από διαρροή ρεύματος (RCCB), προστασίας από βραχυκύκλωμα (MCB), ασφάλειας (fuse) και ελέγχου μόνωσης καλωδίων (insulation monitoring device).





Εικόνα 1. 13 Υποδομή μονάδας φόρτισης με τη μέθοδο 4

Όσον αφορά τους τύπους βυσμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σύμφωνα με τη νομοθεσία, αυτοί είναι τύπου : IEC 62196-2 "Type 2"(VDE-AR-E-2623-2-2), IEC 62196-2 "Type 3" (DC Compro 2) και CHAdeMO.

#### Βύσμα IEC 62196-2 τύπου 2 (Mennekes)

Είναι από τους πιο διαδεδομένους τύπους βυσμάτων για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων εντός Ευρώπης. Το βύσμα έχει κυκλική μορφή με πεπλατυσμένη άνω πλευρά και είχε αρχικά σχεδιαστεί για την φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων τύπου BEV, με παροχή ισχύος της τάξης 3-70kW. Διαθέτει 7 ακροδέκτες και χρησιμοποιείται τόσο προς την πλευρά του αυτοκινήτου, όσο και προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής για φόρτιση από μονοφασική ή τριφασική AC ή μονοφασική DC πηγή.

Όπως αναγράφεται και στην εικόνα 1.14, οι 7 ακροδέκτες που έχει το βύσμα είναι οι :

1. L1 : φάση τροφοδοσίας 1
2. L2 : φάση τροφοδοσίας 2
3. L3 : φάση τροφοδοσίας 3
4. Neutral : ουδέτερος αγωγός
5. Control pilot : έλεγχος ορθής λειτουργίας συστημάτων φόρτισης
6. Earth : γείωση
7. Proximity : Επιβεβαίωσης ύπαρξης βύσματος και ακινητοποίησης οχήματος κατά τη διάρκεια φόρτισης.

Στην περίπτωση DC βύσματος αντικαθίστανται οι ακροδέκτες L2 και L3 με τους αντίστοιχους ‘+’ και ‘-’.



Εικόνα 1. 14 Βύσματα τύπου 2, AC αριστερά και DC δεξιά.

### Βύσμα IEC 62196-2 τύπου 3 (Scaem)

Η μορφή των βυσμάτων τύπου 3 σχεδιάστηκε και υποστηρίζεται από μια ομάδα, γνωστή ως EV Plug Alliance, που απαρτίζεται από βιομηχανίες του κλάδου. Στόχος της ομάδας αυτής είναι η προώθηση ενός τύπου βύσματος που προσφέρει επιπλέον προστασία σε ανυποψίαστους χρήστες αποκλείοντας το ενδεχόμενο να έρθουν σε επαφή με ηλεκτροφόρους αγωγούς.

Ο συγκεκριμένος τύπος βυσμάτων σιγά σιγά παραγκωνίστηκε έως το σημείο όπου τον Οκτώβριο του 2015 μια από τις πρώτες εταιρίες που συμμετείχαν στην ίδρυση του EV Plug Alliance, έπαυε και επίσημα την παραγωγή βυσμάτων αυτού του τύπου, οπότε οι τύποι αυτοί εγκαταλείφθηκαν πλήρως. Μια επίσκεψη στην ιστοσελίδα, που έχει σταματήσει να λειτουργεί, της ομάδας «EV Plug Alliance» δείχνει πως η υποστήριξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας έχει σταματήσει.



Εικόνα 1. 15 Βύσμα τύπου 3 με την υποδοχή του αριστερά.

### Βύσμα CHAdeMO

Τα βύσματα CHAdeMO υποστηρίζουν συστήματα ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, παρέχοντας ισχύ της τάξης των 60kW, μέσω μιας ειδικής σύνδεσης υψηλής τάσης

(500Volt DC) και συνεχούς ρεύματος (125A). Με χρήση της μεθόδου CHAdeMO επιτυγχάνεται φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων μικρού μεγέθους συσσωρευτών (με αυτονομία περίπου 100km) σε λιγότερο από μισή ώρα. Λόγω των πολλά υποσχόμενων επιδόσεων, η μέθοδος προτάθηκε ως παγκόσμιο βιομηχανικό πρότυπο και συμπεριλήφθηκε από την διεθνή κοινοπραξία μηχανικών (IEC) στο πρότυπο IEC 62196 ως βύσμα τύπου 4. Το εμπορικό του όνομα προέρχεται από τη φράση "CHArge de MOve", που μεταφράζεται ως "Κίνηση με Φόρτιση".



*Εικόνα 1. 16 Βύσμα τύπου CHAdeMO*

Η μέθοδος φόρτισης υποστηρίχθηκε από πολλούς με αποτέλεσμα πρωτοπόρες αυτοκινητοβιομηχανίες να εντάσσουν υποδοχείς βυσμάτων τύπου CHAdeMO στα νέα ηλεκτρικά οχήματα που παράγουν.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο και τα βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων πρωτοκόλλων επικοινωνίας τα οποία μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

## Κεφάλαιο 2 : Το πρωτόκολλο ATM

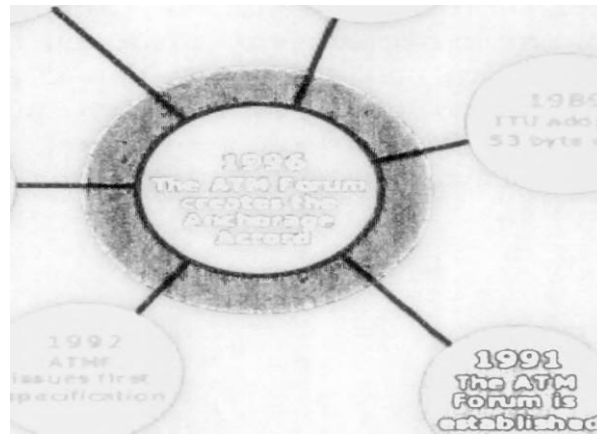
### 2.1 Εισαγωγή

Εδώ και πολλά χρόνια ο όρος ATM καταλαμβάνει εξέχουσα θέση στο χώρο των τηλεπικοινωνιών. Το ακρωνύμιο ATM σημαίνει «Asynchronous Transfer Mode», δηλαδή «ασύγχρονος τρόπος μεταφοράς». Πολλές μεγάλες τηλεπικοινωνιακές εταιρείες προωθούν αυτό το τηλεπικοινωνιακό πρότυπο για το ISDN ευρείας ζώνης. Το ATM συγκαταλέγεται στην οικογένεια των τηλεπικοινωνιακών προτύπων που εισήγαγαν την έννοια της μεταγωγής πακέτου, της αναμετάδοσης πλαισίου και τέλος της υπηρεσίας δεδομένων υψηλών ταχυτήτων με μεταγωγή. Τόσο το ATM όσο και το STM (χρησιμοποιείται στα τηλεφωνικά δίκτυα για τη μεταφορά πακέτων δεδομένων και φωνής σε μακρινές αποστάσεις) στηρίζονται σε παρεμφερή τεχνολογία. Το ATM χρησιμοποιεί κύτταρα δηλαδή πλαίσια σταθερού μεγέθους και σχήματος.

Οι ολοένα αυξανόμενες ανθρώπινες ανάγκες για αναπτυγμένα τηλεπικοινωνιακά μέσα οδήγησαν στη δημιουργία του νέου ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς πακέτων. Το ATM καλείται να αντιμετωπίσει απαιτήσεις σε δικτυακές εφαρμογές, όπως: φωνή, δεδομένα, εικόνα και βίντεο. Το ATM βασίζεται στη μέθοδο ανταλλαγής πακέτων διαμέσου του ίδιου δικτυακού δρόμου και είναι σχεδιασμένο για να υποστηρίζει πολλές υπηρεσίες πάνω σε ένα απλό δίκτυο. Το ATM έχει δημιουργηθεί για να απλοποιήσει την μεταγωγή, αλλά και να εξασφαλίσει υψηλή ταχύτητα μεταφοράς πακέτων. Αναπτύχθηκε από την επιθυμία των εταιρειών να κρατήσουν σταθερή την ποιότητα των φωνητικών επικοινωνιών. [6] Η κεντρική ιδέα πίσω από το ATM είναι, αντί να αναγνωρίζει το σύστημα τον αριθμό της σύνδεσης από τη θέση του πακέτου σε ένα bucket, απλά να μεταφέρει το πακέτο τον αριθμό της σύνδεσης, μαζί με τα δεδομένα και ταυτόχρονα να κρατά το συνολικό αριθμό των bytes σε ένα μικρό πακέτο. Στη συνέχεια αν κατά την μεταφορά χαθεί κάποιο πακέτο λόγω συμφόρησης, να υπάρχει ελάχιστη επιρροή στην ροή των δεδομένων που πιθανόν να μπορούν να ανακτηθούν με ειδικούς αλγόριθμους επαναληπτικότητας. Τα παραπάνω αναφέρονται στη μεταγωγή πακέτου, όποτε και ονομάστηκε «Γρήγορη μεταγωγή πακέτου με μικρά σταθερού μεγέθους πακέτα».

### 2.2 Ιστορικά Στοιχεία

Στην πόλη Νάπερβιλ του Ιλλινόις των ΗΠΑ το 1980, στα εργαστήρια της A.T & T, γεννήθηκε το ATM, σαν μια τεχνική μεταγωγής που εξυπηρετούσε τη μετάδοση φωνής και δεδομένων με τη μορφή πακέτου. Το 1986, στο συνέδριο που έλαβε χώρα στη Σεούλ της Ν. Κορέας, ο οργανισμός ITU-T εισήγαγε την ATM τεχνολογία στο BISDN. Το 1991 οι εταιρείες Cisco Systems NET/ADAPTIVE, North Telecom and Sprint, δημιούργησαν το ATM Forum, που το 1993 τα μέλη του ανέρχονταν περί τα 350. Σκοπός του ATM Forum είναι η προώθηση αυτής της τεχνολογίας βασιζόμενο πάντα στα επίσημα πρότυπα και κανόνες των ITU-T και ANSI. [7]



Εικόνα 2. 1 The History of ATM Technology

Το ATM δημιουργήθηκε προκειμένου να αντικαταστήσει το STM (Synchronous transfer mode). Το STM χρησιμοποιείται στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα υποδομής για τη μεταφορά πακέτων δεδομένων και φωνής σε μακρινές αποστάσεις. Είναι ένας μηχανισμός μεταγωγής κυκλώματος στον οποίο μια σύνδεση αρχίζει μεταξύ δύο τελικών σημείων, ακολουθεί η μεταφορά δεδομένων και στο τέλος η σύνδεση μεταξύ των δύο σημείων κλείνει. Κατά τη διάρκεια επικοινωνίας, το εύρος ζώνης παραμένει κατειλημμένο ανεξάρτητα με το αν διακινείται ή όχι πληροφορία. Το εύρος ζώνης διαιρείται σε στοιχειώδη κομμάτια χρόνου (buckets) και τα πακέτα δεδομένων οργανώνονται σε μια ουρά που περιέχει ένα σταθερό αριθμό πακέτων. Ένα bucket περιέχει  $N$  πακέτα, ένα για κάθε σύνδεση, και υπάρχουν  $M$  διαφορετικά buckets που επαναλαμβάνονται κάθε  $T$  δευτερόλεπτα. Ο συνολικός αριθμός συνδέσεων που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα STM τηλεπικοινωνιακό σύστημα είναι  $N \cdot M$ . Επίσης μια σύνδεση που δε χρησιμοποιεί όλο το εύρος που της προσφέρεται δεν μπορεί να «δανείσει» το περισσευούμενο εύρος σε μια άλλη σύνδεση που έχει άμεση ανάγκη από εύρος.

Μία σύνδεση STM, αφενός δεν κατανέμει δίκαια το διαθέσιμο εύρος στις επιμέρους συνδέσεις και δεν επιδέχεται περισσότερες από  $N \cdot M$  ταυτόχρονες συνδέσεις και αφετέρου ότι η μορφή των δεδομένων που διακινούνται στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αλλάζει σταδιακά από φωνή και μονόδρομα κινούμενη εικόνα σε ένα μίγμα από φωνή, δεδομένα υπολογιστών, video και audio-on-demand, ιστοσελίδες πλούσιες σε γραφικά, παραπέμπουν στην ανάγκη για αναζήτηση νέου προτύπου. Έτσι το πρότυπο STM για μεταφορά δεδομένων αποδεικνύεται μη αποδοτικό όταν αυξάνονται:

- Ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς
- Το μέγιστο εύρος ζώνης του φυσικού μέσου μεταφοράς και
- Η μεταβολή του ρυθμού ροής δεδομένων. Σύμφωνα με όλες τις ενδείξεις από τον κόσμο των υπολογιστών, έτσι θα διαμορφωθούν τα προφίλ των συνδέσεων δεδομένων για τα επόμενα χρόνια.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες αναπτύχθηκε το ATM, έχοντας πρωταρχικό στόχο του, τη δημιουργία ενός ενιαίου δικτύου το οποίο θα υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών, όπως : φωνή, πακέτα δεδομένων (SMDS,IP,FR), video, εφαρμογές εικόνας (imaging), εξομοίωση κυκλωμάτων.

Η τεχνολογία ATM έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα δικτυακών εφαρμογών όπως:

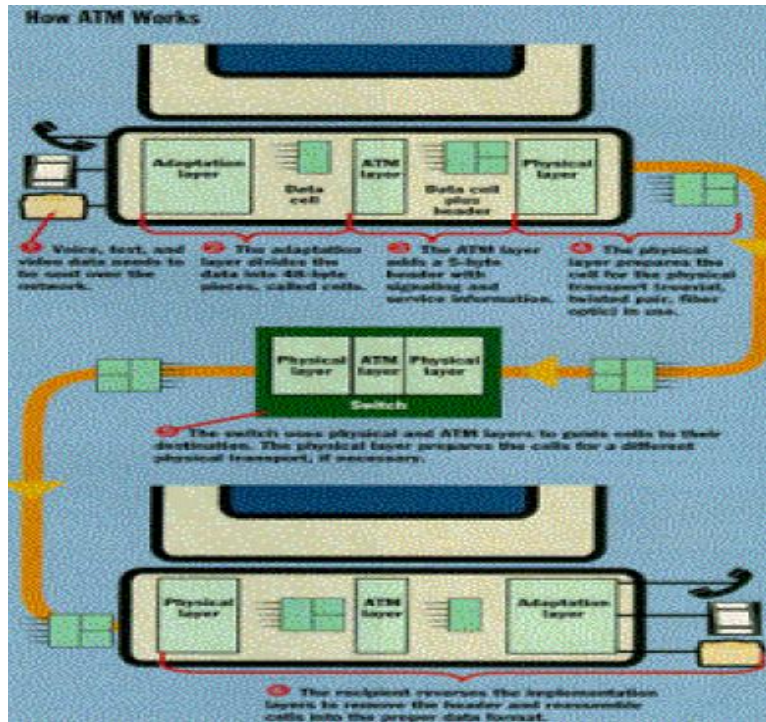
- Εικονοτηλέφωνο
- Τηλεσυνδιάσκεψη
- Συνδιάσκεψη από γραφείο σε γραφείο
- Εικονικά τοπικά δίκτυα
- Εικόνας / ήχου κατά παραγγελία
- Επικοινωνίες ATM μεγάλης χωρητικότητας με κινητούς κόμβους (συνήθως με δορυφορικές ζεύξεις).

Η τεχνολογία του ATM προσφέρει στους χρήστες του κάποια πλεονεκτήματα, όπως:

- Υψηλές ταχύτητες, υποστηρίζει ρυθμούς μεταφοράς μέχρι και 622 Mbps(θεωρητικά).
- Επεκτασιμότητα, παρέχει το αυξημένο εύρος ζώνης μέσα στις ήδη υπάρχουσες αρχιτεκτονικές.
- Αποκλειστικό εύρος ζώνης : εγγυάται το ρυθμό μεταφοράς για μια υπηρεσία.
- Υποστήριξη ιδιωτικών και δημόσιων δικτύων
- Τεχνολογική βάση για LANs και για WANs
- Προσομοίωση και μεταγωγή πακέτου και μεταγωγής κυκλώματος
- Υποστήριξη υπηρεσιών με διαφορετικά είδη κυκλοφοριακής κίνησης
- Υποστήριξη πολλαπλών κατηγοριών ποιότητας υπηρεσιών
- Υποστήριξη υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου
- Υποστήριξη κυκλοφοριακής κίνησης με προτεραιότητες

Το ATM έχει παγκόσμια εφαρμογή και έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την ίδια ευκολία τόσο σε κοντινές αποστάσεις (π.χ. ένα γραφείο ή ένα κτίριο) όσο και σε μακρινές (διεθνείς και διηπειρωτικές συνδέσεις). Αυτό υπονοεί ότι μεγάλο μέρος της δουλειάς υποδομής που απαιτείται σήμερα για να συνεργάζονται τα τοπικά δίκτυα με τα δίκτυα μεγάλων αποστάσεων ή και τα μητροπολιτικά δίκτυα μπορεί να εξαλειφθεί. Η πλατφόρμα ATM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξει μια μεγάλη ποικιλία από υπηρεσίες, όπως : πολλαπλά πρωτόκολλα πάνω από ATM (MPOA – Multi-Protocol Over ATM), Μεταγωγή Πλαισίου (Frame Relay) και Εξομοίωση κυκλώματος (Circuit Emulation).

Ένα τελευταίο και πολύ σημαντικό επακόλουθο της ενοποίησης των δικτύων φωνής και δεδομένων είναι η λεγόμενη ενοποίηση τηλεφωνικών δικτύων και δικτύων δεδομένων σε μεγάλες και μικρές επιχειρήσεις (CTI:Computer and Telephony Integration). Με τη δυνατότητα του ATM να χειρίζεται με την ίδια ευκολία το φορτίο που του αναθέτουν, είναι δυνατό να ενοποιηθούν τα συνήθως ανεξάρτητα δύο εσωτερικά δίκτυα των οργανισμών αυτών σε ένα, μειώνοντας το κόστος της συντήρησης και επένδυσης. Η αναβαθμισιμότητα του ATM, όπως διαφάνηκε παραπάνω, αφήνει δε πολλά περιθώρια για επέκταση του ενιαίου δικτύου, τόσο σε χωρητικότητα, όσο και σε απόσταση. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει όλα αυτά σε συντομία:



Εικόνα 2. 2 Αρχή Λειτουργίας ATM

### 2.3 Αρχή Λειτουργίας ATM

Το μοντέλο μεταφοράς που περιγράφει τα ATM δίκτυα αποτελείται από τρία βασικά στρώματα: Το Φυσικό στρώμα, το ATM στρώμα και το στρώμα προσαρμογής ATM.

Η κύρια λειτουργία του φυσικού στρώματος είναι να δέχεται τις ATM κυψελίδες που προέρχονται από το αμέσως ανώτερο στρώμα (το ATM στρώμα), να τις μετατρέπει σε κατάλληλη μορφή ώστε να μπορούν να μεταδοθούν από το φυσικό μέσο και στη συνέχεια να εκτελεί τη μετάδοση τους. Φυσικά πρέπει να έχει και τη δυνατότητα εκτέλεσης της αντίστροφης διαδικασίας.

Το ATM στρώμα έχει να κάνει με την μετακίνηση κυψελίδων από άκρη σε άκρη και συμβάλει στη δρομολόγηση με αλγόριθμους και πρωτόκολλα μεταξύ των ATM διακοπτικών στοιχείων. Οι αποφάσεις για την δρομολόγηση βασίζονται στους Virtual Circuit Identifiers (VCIs) και στους Virtual Path Identifiers (VPIs). Εξαιτίας του μικρού μεγέθους των ATM κυψελίδων, την υψηλή ταχύτητα των συνδέσεων εκπομπής και την ταχύτητα εναλλαγής των κόμβων, το ATM παρέχει ελάχιστες λανθάνουσες καταστάσεις.

Το ATM στρώμα υποστηρίζει ένα μεγάλο αριθμό λειτουργιών όπως:

- Κατασκευή κυψελίδων
- Λήψη κυψελίδων και νομιμοποίηση (αναγνώριση εγκυρότητας) επικεφαλίδων.
- Μεταγωγή, προώθηση και αντιγραφή κυψελίδων χρησιμοποιώντας τις τιμές των κωδικών αναγνώρισης νοητού μονοπατιού/κυκλώματος (VPI/VCI).
- Πολυπλεξία και αποπλεξία κυψελίδων χρησιμοποιώντας τις τιμές VPI/VCI.
- Διάκριση κυψελίδων με βάση τον τύπο πεδίου πληροφορίας των κυψελίδων.
- Επεξεργασία του πεδίου «Προτεραιότητας απώλειας κυψελίδων».
- Υποστήριξη πολλαπλών κλάσεων «ποιότητας υπηρεσιών».

- Αναγνώριση των τιμών ένδειξης προς τις επικεφαλίδες που έχουν κρατηθεί και προεκχωρηθεί.
- Γενικός έλεγχος ροής.
- Άμεση ένδειξη συμφόρησης.
- Εκχώρηση και μετακίνηση συνδέσεων.

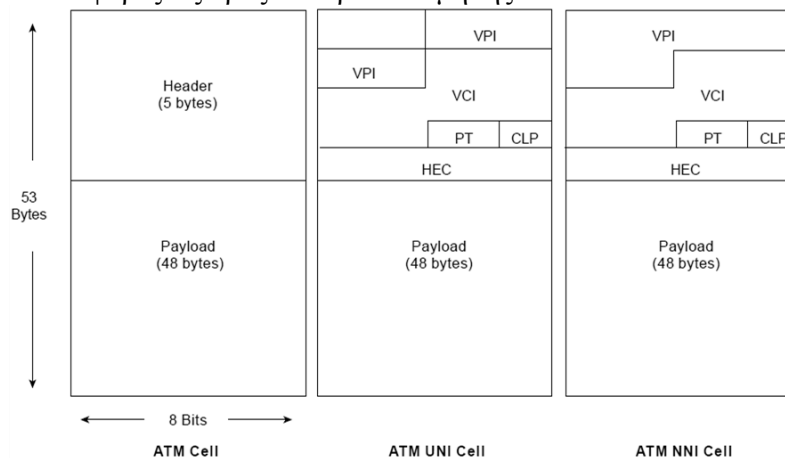
Τέλος το στρώμα προσαρμογής στα ATM δίκτυα (AAL – ATM Adaptation Layer) είναι τελείως διαφορετικό από το πρωτόκολλο TCP (Transmission Control Protocol). Οι σχεδιαστές του ενδιαφέρονται για την γρήγορη και όχι την ακριβή μεταφορά φωνής και βίντεο. Το στρώμα ATM εξάγει κυψελίδες 53bytes τη μία μετά την άλλη. Δεν περιλαμβάνει έλεγχο λάθους ούτε έλεγχο ροής.

Λειτουργίες κατά τη μεταφορά πληροφορίας

- Η πηγή ζητά σύνδεση με συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας για δεδομένη εφαρμογή
- Το δίκτυο εντοπίζει ένα μονοπάτι με επαρκείς διαθέσιμους πόρους
- Η πηγή τοποθετεί την πληροφορία σε κύτταρα ATM
- Η πηγή εισάγει τα κύτταρα στο δίκτυο με κατάλληλο ρυθμό
- Το δίκτυο μεταφέρει τα κύτταρα κατά μήκος ενός εικονικού κυκλώματος, ώστε να επιτυγχάνεται η ποιότητα υπηρεσίας
- Ο κόμβος προορισμού ανασυντάσσει τα κύτταρα στην αρχική μορφή της πληροφορίας
- Η εφαρμογή τερματίζει τη σύνδεση

## 2.4 Μορφή ATM πακέτου

Το ATM cell είναι το σημαντικότερο δομικό στοιχείο του ATM πρωτοκόλλου, καθώς είναι η βασική μονάδα μεταφοράς πληροφορίας. Η ισχύουσα μορφή της κυψέλης ATM αποτελεί το προϊόν συμβιβασμού των οργανισμών ANSI και ETSI Συγκεκριμένα αποτελείται από 53 bytes εκ των οποίων τα 5 πρώτα αποτελούν την επικεφαλίδα (header) που περιέχει σε 3 bytes το μοναδικό αναγνωριστικό σύνδεσης VCI, 1 byte ελέγχου και άλλο ένα byte με κώδικα ανίχνευσης λάθους για την επικεφαλίδα. Τα υπόλοιπα 48 bytes χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πληροφορίας του χρήστη (user information). Για τις κυψελίδες του ATM υπάρχουν δύο τυποποιημένες δομές, που αναφέρονται στην προσαρμογή χρήστη με δίκτυο (User to Network Interface - UNI) και δικτύου με δίκτυο (Network to Network Interface - NNI). Οι δομές αυτές, παρουσιάζουν διαφορές ως προς τον τρόπο δόμησης του header του ATM cell. [8]



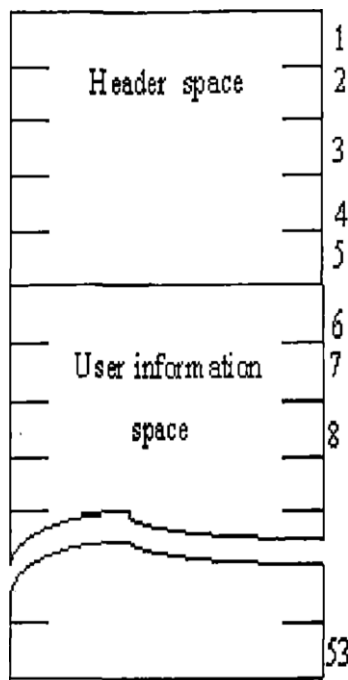
Εικόνα 2. 3 Δομή επικεφαλίδας ATM



Τα πεδία που συνθέτουν την επικεφαλίδα στις δύο αυτές δομές κελιών είναι τα ακόλουθα:

- Πεδίο γενικού ελέγχου ροής (GFC)
- Κωδικοί αναγνώρισης νοητού μονοπατιού και κυκλώματος (VPI/VCI)
- Τύπος πεδίου πληροφορίας (PT)
- Προτεραιότητα Απώλειας Κελιών (CLP)
- Έλεγχος σφάλματος επικεφαλίδας (HEC)

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η δομή του ATM cell.



(a)

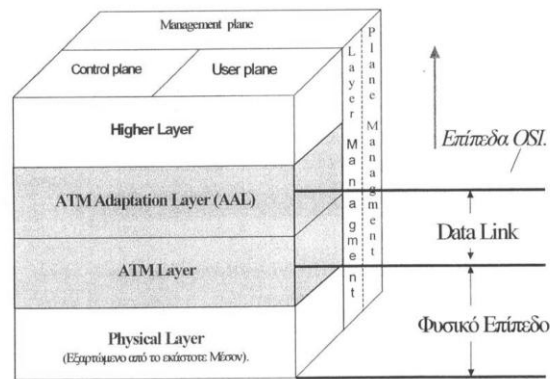
Εικόνα 2. 4 ATM cell header structure at UNI

## 2.5 Αρχιτεκτονική ATM Δικτύου

Το ATM είναι γνωστό και ως cell relay και σε ορισμένα σημεία παρόμοιο με την ανταλλαγή πακέτων μέσω X.25 ή frame relay. Το ATM μεταφέρει δεδομένα σε διακεκριμένα μπλοκ και έχει οργανωμένη τη ροή της πληροφορίας σε πακέτα σταθερού μεγέθους, τις κυψέλες. [9] Το ATM είναι ένα πρωτόκολλο με ελάχιστο έλεγχο λαθών και ροής.

Το μοντέλο αναφοράς πρωτοκόλλων (Protocol Reference Model – PRM) σύμφωνα με τις συστάσεις της ITU – TI. 121 αποτελείται από τα παρακάτω επίπεδα.

- α. το επίπεδο του χρήστη
- β. το επίπεδο ελέγχου
- γ. το επίπεδο διαχείρισης



Εικόνα 2. 5 Επίπεδα και υποεπίπεδα της αρχιτεκτονικής ATM

### α. Επίπεδο χρήστη.

Το επίπεδο του χρήστη παρέχεται για τη μεταφορά της εφαρμογής του τελικού χρήστη και περιλαμβάνει το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο ATM και τα επίπεδα προσαρμογής στο ATM (ATM Adaptation Layers – AALs), που θεωρούνται απαραίτητα για την υποστήριξη του χρήστη. Το φυσικό επίπεδο παρέχει πρόσβαση στο φυσικό μέσο με σκοπό τη μεταφορά των ATM κυψελών. Το επίπεδο ATM αποτελεί το βασικό σημείο της τεχνολογίας «Ασύγχρονου Τρόπου Μεταφοράς». Δέχεται ενότητες δεδομένων, από επίπεδο προσαρμογής στο ATM (AAL), έτοιμες για τη διαδικασία ενθυλάκωσης κυψελών και παραδίδει την πληροφορία στο επίπεδο προσαρμογής στο ATM μετά την αποενθυλάκωση. Το επίπεδο προσαρμογής στο ATM αντιστοιχεί τα δεδομένα των ανωτέρων επιπέδων σε κυψέλες με σκοπό τη μεταφορά τους μέσω του δικτύου.

### β. Επίπεδο ελέγχου

Το επίπεδο ελέγχου περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα που υποστηρίζουν την εγκατάσταση, αποδέσμευση συνδέσεων καθώς και λειτουργίες ελέγχου σύνδεσης που απαιτούνται για την παροχή μεταγωγικών υπηρεσιών. Επίσης περιλαμβάνει διαδικασίες προσαρμογής στο ATM και πρωτόκολλα σηματοδότησης ανώτερων επιπέδων. Το επίπεδο ελέγχου μοιράζεται το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο ATM με το επίπεδο χρήστη.

### γ. Το επίπεδο διαχείρισης

Το επίπεδο διαχείρισης παρέχει τη δυνατότητα ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των επιπέδων χρήστη και ελέγχου. Τα επιμέρους τμήματα του είναι η διαχείριση στρωμάτων και επιπέδων.

## 2.6 Επίπεδα προσαρμογής ATM

Το στρώμα προσαρμογής στα ATM δίκτυα (AAL – ATM Adaptation Layer) είναι τελείως διαφορετικό από το πρωτόκολλο TCP (Transmission Control Protocol), γιατί οι σχεδιαστές ενδιαφερόντουσαν για την μεταφορά φωνής και βίντεο στα οποία η γρήγορη

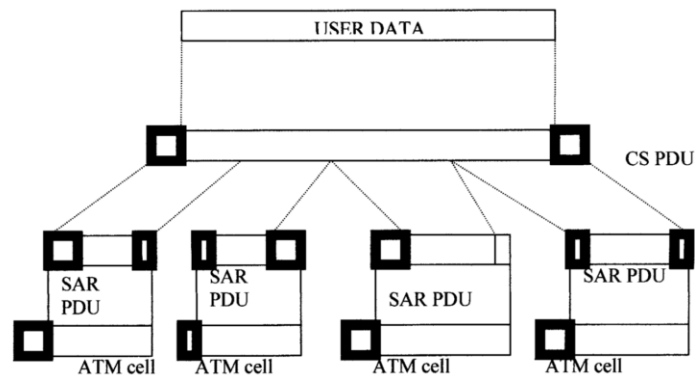
μεταφορά είναι πιο σημαντική απ' ό τι η ακριβής μεταφορά. Το στρώμα ATM εξάγει 53bytes κυψελίδες τη μία μετά την άλλη. Δεν περιλαμβάνει έλεγχο λάθους ούτε έλεγχο ροής με αποτέλεσμα να μην ανταποκρίνεται αρκετά στις περισσότερες απαιτήσεις των εφαρμογών. Ο οργανισμός ITU-T πρότεινε τη σύσταση I.363, ορίζοντας ένα από άκρη – σε –άκρη επίπεδο στην κορυφή του ATM στρώματος, προκειμένου να γεφυρώσει αυτό το χάσμα. Αυτό το στρώμα ονομάστηκε AAL. Ο οργανισμός ITU-T οργάνωσε τον χώρο εξυπηρέτησης πάνω σε τρεις άξονες:

- Από τον πραγματικό χρόνο εξυπηρέτησης μέχρι εξυπηρέτηση σε μη πραγματικό χρόνο
- Από την υπηρεσία σταθερού δυαδικών ψηφίων μέχρι υπηρεσία μεταβλητού ρυθμού δυαδικών ψηφίων
- Από την υπηρεσία προσανατολισμένη σε σύνδεση μέχρι υπηρεσία προσανατολισμένη χωρίς σύνδεση

Το στρώμα προσαρμογής στο ATM ( AAL – ATM Adaptation Layer) αντιστοιχεί τα δεδομένα των ανώτερων στρωμάτων σε κυψελίδες με σκοπό την μεταφορά τους μέσω του δικτύου. Το AAL αποτελείται από το υποεπίπεδο σύγκλισης ( CS – Convergence Sublayer) και από το υποεπίπεδο τμηματοποίησης και επανασύστασης (SAR – Segmentation And Seassembly). Το υποεπίπεδο σύγκλισης αποτελείται από το ειδικό τμήμα υπηρεσιών (SS – Service Specific) και το κοινό τμήμα (CP – Common Part).

**Το υπόστρωμα σύγκλισης** παρέχει τις μεθόδους για μια ιδιαίτερη εφαρμογή με την χρησιμοποίηση του επιπέδου προσαρμογής (AAL). Συγκεκριμένα κάθε χρήστης του επιπέδου AAL, συνδέεται μ' ένα σημείο πρόσβασης υπηρεσιών (SAP), τη διεύθυνση εφαρμογής. Το στρώμα αυτό εξαρτάται από την υπηρεσία.

**Το υπόστρωμα τμηματοποίησης και επανασύστασης** είναι αρμόδιο να συλλέγει την πληροφορία που λαμβάνεται από το υπόστρωμα σύγκλισης σε κυψέλες και να ανασυνθέτει την πληροφορία στο άλλο άκρο.



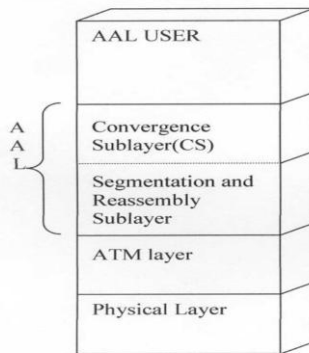
Εικόνα 2. 6 Διαχωρισμός δεδομένων χρηστών σε στοιχεία

Το παραπάνω διάγραμμα επεξηγεί πως τα δεδομένα χρηστών, διαιρούνται σε στοιχεία unit πρωτοκόλλου υποστρώματος σύγκλισης (CS PDU) και έπειτα μεταφέρονται πάλι στο υπόστρωμα τμηματοποίησης και επανασύστασης (SAR PDU), το οποίο διαιρείται σε κύτταρα του ATM.

Ο οργανισμός ITU-T καθορίζει τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών για τα Ευρυζωνικά Ψηφιακά Δίκτυα Ενοποιημένων Υπηρεσιών (B-ISDN - Broadband Integrated Services Digital Network). Οι υπηρεσίες της κατηγορίας A σκοπεύουν στα συνεχούς ρυθμού ρεύματα σύγχρονων δυαδικών ψηφίων (CBR - Constant Bit Rate). Η κατηγορία B σκοπεύει σε μεταβλητού ρυθμού συμπιεσμένα ρεύματα ήχου ή εικόνας (VBR - Variable Bit Rate). Τα μοντέλα της κατηγορίας C και της κατηγορίας D εξυπηρετούν τις υπάρχουσες υπηρεσίες μετάδοσης πληροφοριών. Για να υποστηρίξει αυτές τις διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών ο οργανισμός ITU-T πρότεινε τρία διαφορετικά στρώματα προσαρμογής : τα AAL 1, AAL 2, και AAL 3/4. Το ATM Forum πρότεινε ένα νέο στρώμα, το AAL 5 και ερευνά το AAL 6. [10]

Συγκεκριμένα:

- το **AAL 1** προτάθηκε για τις υπηρεσίες της κατηγορίας A, απασχολεί λειτουργίες ομαδοποίησης και από-ομαδοποίησης στο UNI για να μετατρέψει το συρμό των δυαδικών ψηφίων σε κυκλοφοριακή κίνηση βασιζόμενη σε κυψελίδες και αντιστρόφως.
- Το **AAL 2** παρέχει υπηρεσίες της κατηγορίας B. Η υλοποίηση του AAL 2 είναι δύσκολη. Ο μεταβλητός ρυθμός δεδομένων κάνει δύσκολη τη διαφύλαξη πόρων για τέτοιου είδους κίνηση.
- το **AAL 3/4** υλοποιεί υπηρεσίες της τάξης C και D. Η κυριότερη λειτουργία του είναι η κατάτμηση και η συναρμολόγηση εκ νέου μεγάλων μηνυμάτων. Το AAL 3/4 χρησιμοποιεί ένα πεδίο αναγνώρισης μηνυμάτων (MID - Multiplexing Identifier), επιτρέποντας κίνηση με παρεμβολές διαφορετικών μηνυμάτων μέσα από το ίδιο VC.
- το **AAL 5** παρέχει επίσης υπηρεσίες της τάξης C και D. Έχοντας προταθεί στο ATM Forum από κατασκευαστές υπολογιστών, αρχικά ονομαζόταν ως το απλό και αποτελεσματικό στρώμα προσαρμογής (SEAL - Simple Effective Adaptation Layer). Το AAL 5 παρέχει καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η διαδικασία επανασυναρμολόγησης είναι ελαφρώς απλοποιημένη. Το μειονέκτημα είναι ότι μια κατεστραμμένη κυψελίδα θα οδηγεί πάντα σε ένα μήνυμα που απορρίπτεται στο AAL 5, ενώ το AAL 3/4 παρέχει τρόπους να εντοπίζει σφάλματα bit σε μεμονωμένες κυψελίδες.



Εικόνα 2. 7 Επίπεδα AAL

Το διάγραμμα παρουσιάζει οπτικά το πρωτόκολλο AAL.

Τα πρωτόκολλα AAL που έχουν οριστεί έχουν ταξινομηθεί σύμφωνα με τρεις παραμέτρους συγχρονισμός ανάμεσα στην αφετηρία και τον προορισμό (απαιτείται, δεν απαιτείται), ρυθμό δεδομένων (σταθερό ή μεταβλητό) και τρόπος σύνδεσης (προσανατολισμένη προς σύνδεση ή προσανατολισμένη χωρίς σύνδεση). Οι κλάσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

**Κλάση A :** Απαιτείται συγχρονισμός, σταθερός ρυθμός δυαδικών ψηφίων, προσανατολισμένη προς σύνδεση. Στη συγκεκριμένη κλάση ανήκουν π.χ. η φωνή στα 64 Kbps και το video CBR.

**Κλάση B :** Απαιτείται συγχρονισμός, μεταβλητός ρυθμός δυαδικών ψηφίων (Variable Bit Rate – VBR), προσανατολισμένη προς σύνδεση. Εδώ ανήκει το VBR – κωδικοποιημένο video).

**Κλάση C:** Δεν απαιτείται συγχρονισμός, μεταβλητός ρυθμός δυαδικών ψηφίων (Variable Bit Rate – VBR), προσανατολισμένη προς σύνδεση. Ανήκει η προσανατολισμένη προς τη σύνδεση μεταφορά δεδομένων.

**Κλάση D :** απαιτείται συγχρονισμός, μεταβλητός ρυθμός δυαδικών ψηφίων (Variable Bit Rate – VBR), προσανατολισμένη χωρίς σύνδεση. Εδώ ανήκει η μεταφορά δεδομένων μεταξύ δύο LANs χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN).

**Κλάση X :** Δεν απαιτείται συγχρονισμός, μεταβλητός ρυθμός δυαδικών ψηφίων (Variable Bit Rate – VBR), προσανατολισμένη προς σύνδεση ή χωρίς σύνδεση.

**Κλάση Y:** Η κλάση αυτή εισήχθη με σκοπό να επιτρέψει την πιθανή αλλαγή των χαρακτηριστικών μεταφοράς του επιπέδου ATM, που παρέχονται από το δίκτυο, μετά την εγκατάσταση της σύνδεσης. Η κλάση Y παρέχει την δυνατότητα υποστήριξης στα δίκτυα ATM κίνησης που μεταβάλλεται χρονικά.

Τα ATM εξυπηρετούν διάφορους τύπους κυκλοφορίας συμπεριλαμβανομένου τα σταθερού ρυθμού δυαδικά ψηφία (CBR – Constant Bit Rate) και τα μεταβλητού τύπου δυαδικά ψηφία (Variable Bit Rate – VBR).

Το στρώμα προσαρμογής στο **ATM τύπου 1 (AAL1)** υποστηρίζει υπηρεσίες σταθερού ρυθμού δυαδικών ψηφίων, όπως CBR ήχος, CBR φωνή, και CBR βίντεο. Επίσης αυτές οι υπηρεσίες απαιτούν συγχρονισμό μεταξύ των δύο επικοινωνούντων άκρων. Η υπηρεσία αυτή όταν προσφέρεται από τα δημόσια ATM δίκτυα πραγματοποιείται με ενιαία χρέωση, φθηνότερη από τις αντίστοιχες μισθωμένες γραμμές. Τα CBR είναι οικονομικά και αξιόπιστα και σίγουρα μεταδίδουν πολύ γρήγορα όλα τα δεδομένα εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας ATM δικτύων.

Το στρώμα προσαρμογής στο **ATM τύπου 2 (AAL2)** υποστηρίζει υπηρεσίες μεταβαλλόμενου ρυθμού δυαδικών ψηφίων (VBR), με προσανατολισμό προς τη σύνδεση, οι οποίες απαιτούν την ύπαρξη συγχρονισμού από άκρο σε άκρο, όπως είναι ο VBR ήχος, η VBR φωνή και το VBR βίντεο. Το VBR είναι μια υπηρεσία μεταβλητού ρυθμού δεδομένων με σκοπό να υποστηρίξει τις εφαρμογές δεδομένων όπως τη μεταγωγή πλαισίου (frame Relay) και την αλληλοσύνδεση Τοπικών Δικτύων (LANs). Η υπηρεσία VBR έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί σε ATM συνδέσμους που μοιράζονται από πολλούς χρήστες. Η VBR κυκλοφορία προκύπτει από μία μέγιστη και μία μέση τιμή. Κατά την περίοδο της λειτουργίας οι κυψελίδες μεταφέρονται στο δίκτυο με σταθερό ρυθμό, αλλά κατευθύνονται από μέγιστο ρυθμό δεδομένων (PCR – Peak Cell Rate). Ο μέγιστος ρυθμός που η πηγή VBR μπορεί να διανεμίει είναι το PCR. Η διάρκεια της περιόδου on/off χαρακτηρίζεται από τον βιώσιμο ρυθμό κυψελίδων (SCR -Sustainable Cell Rate). Αυτό το μοντέλο κυκλοφορίας πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για μεταφορά στα LANs πακέτων δεδομένων ή μεταγωγή πλαισίου πάνω στα ATM. Ο βαθμός του ξεσπάσματος του VBR (burstiness) μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ως :

$$\text{Burstiness} = \text{PCR/SCR}$$

Καθώς η τιμή του PCR/SCR αυξάνει, η κυκλοφορία από την πηγή εκτονώνεται περισσότερο.

Οι υπηρεσίες που υποστηρίζονται από **AAL-3** επίπεδο χωρίζονται σε υπηρεσίες τύπου μηνύματος (message – mode) και τύπου ροής (streaming – mode). Και οι δύο παραπάνω τύποι υποστηρίζουν τόσο τον βέβαιο όσο αβέβαιο τρόπο λειτουργίας.

Ο βέβαιος τρόπος λειτουργίας εφαρμόζεται μόνο σε συνδέσεις του ATM επιπέδου από σημείο σε σημείο (point to point ATM layer connections). Στον αβέβαιο τρόπο λειτουργίας, τα χαμένα και τα φθαρμένα (corrupted) cells δεν αναμεταδίδονται. Όταν παρουσιασθεί ανάγκη, οι φθαρμένες SDUs μεταφέρονται σε ανώτερα επίπεδα, ενώ ο έλεγχος ροής παρέχεται για συνδέσεις από σημείο σε σημείο και όχι για συνδέσεις από σημείο σε πολλά σημεία. Επιπλέον, το AAL3/4 επίπεδο παρέχει τη δυνατότητα να μεταφέρονται οι AAL-SDUs από ένα AAL-SAP (AAL Service Access Point) σε ένα AAL-SAP, ή από ένα AAL-SAP σε πολλά AAL-SAPs.

Το AAL5 είναι ένα απλούστερο σε υλοποίηση «lightweight» επίπεδο, το οποίο όμως υποστηρίζει VBR, connectionless και connection-oriented. Σχεδόν όλα τα υπόλοιπα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν το AAL5 και όχι το AAL3/4 (LAN, IP). Αποτελείται και αυτό από 1 SAR sublayer το οποίο απλά ανιχνεύει το τέλος μιας ακολουθίας cells και 1 CPCS (Common Part Convergence Sublayer).

Το AAL5 εισάχθηκε για να:

1. Μειώσει τον επιπλέον χρόνο επεξεργασίας πρωτοκόλλων.
2. Μειώσει τον επιπλέον χρόνο εκπομπής
3. Διασφαλίσει προσαρμοστικότητα στα υπάρχοντα πρωτόκολλα μεταφορά

## 2.7 Δρομολόγηση στο ATM

Για την εγκαθίδρυση συνδέσεων μεταξύ ATM συστημάτων, η σηματοδότηση αρχικά ανατρέχει στο PISP, ένα στατικό πρωτόκολλο δρομολόγησης, ή στο PNNI, που αποτελεί ένα δυναμικό πρωτόκολλο δρομολόγησης, το οποίο παρέχει διαδρομές εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας (QoS), βασιζόμενο στις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας όπως αυτές ορίστηκαν στην αίτηση εγκατάστασης της σύνδεσης. [8]

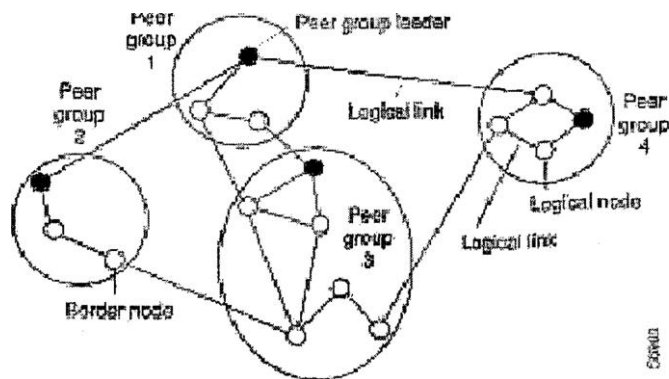
Το PNNI (Private Network Node Interface ) είναι ένα δυναμικό πρωτόκολλο δρομολόγησης για τα ATM δίκτυα, καθώς μαθαίνει την τοπολογία του δικτύου και τις πληροφορίες προσβασιμότητας με την ελάχιστη δυνατή αρχική ρύθμιση. Το PNNI αυτόματα προσαρμόζεται στις αλλαγές του δικτύου με την ανταλλαγή πληροφοριών για την κατάσταση της τοπολογίας του δικτύου. Το PNNI παρέχει τις διαδρομές που ικανοποιούν την ποιότητα σύνδεσης υπηρεσιών (QoS) των αιτημάτων Το PNNI επιλέγει τις διαδρομές μέσω του δικτύου που βασίζεται στο διοικητικό βάρος (AW) και άλλες παραμέτρους QoS, όπως :

- Διαθέσιμος ρυθμός κυψελίδων (AvCR)
- Μέγιστη καθυστέρηση μεταφοράς κυψελίδων (maxCTD)
- Μέγιστη-Ελάχιστη διακύμανση καθυστέρησης κυψελίδων (CDV)
- Αναλογία απώλειας στοιχείων (CLR)

Το PNNI χρησιμοποιεί ως κύριο μέτρο το AW. Εάν μια σύνδεση ζητά είτε max CTD είτε CDV είτε κι τα δύο, το PNNI μπορεί να μην μπορεί να υπολογίσει μια βέλτιστη διαδρομή μέσω του δικτύου. Ο αρχικός στόχος της ιεραρχίας του PNNI είναι η επίτευξη της κλιμακούμενης δομής του. Παρά ταύτα η ιεραρχία του PNNI μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για άλλες ανάγκες, όπως η δημιουργία ενός διοικητικού ορίου.

Τα βασικά συστατικά της ιεραρχίας PNNI αναπτύσσονται παρακάτω:

1. Κόμβος του χαμηλότερου επιπέδου - ένας λογικός κόμβος στο χαμηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας PNNI.
2. Ομότιμη ομάδα - μια ομάδα λογικών κόμβων. Κάθε κόμβος ανταλλάσσει τις πληροφορίες με άλλα μέλη της ομάδας, και όλα τα μέλη διατηρούν μια ίδια όψη της ομάδας.
3. Όμοιος ηγέτης ομάδας (PGL) - ένας λογικός κόμβος μέσα σε μια όμοια ομάδα που συνοψίζει την όμοια ομάδα και την αντιπροσωπεύει ως ενιαίο λογικό κόμβο στο επόμενο επίπεδο της ιεραρχίας PNNI.
4. Λογικός κόμβος ομάδας (LGN) - ένας λογικός κόμβος που αντιπροσωπεύει τη χαμηλότερη όμοια ομάδα επιπέδων του στην επόμενη υψηλότερη όμοια ομάδα επιπέδων. Κατά την δημιουργία ενός PGL, το PGL δημιουργεί έναν γονέα LGN για να αντιπροσωπεύσει την όμοια ομάδα ως ενιαίο λογικό κόμβο στο επόμενο επίπεδο. Το PGL είναι ένας λογικός κόμβος μέσα στην όμοια ομάδα, και το συνδεδεμένο LGN είναι ένας λογικός κόμβος στην επόμενη υψηλότερη όμοια ομάδα επιπέδων.



Εικόνα 2. 8 Ιεραρχική δομή στην PNNI δρομολόγηση

## 2.8 ATM και Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS)

Με τον όρο ποιότητα υπηρεσίας (QoS) εννοούμε το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη για μια υπηρεσία, όπως αυτός διαμορφώθηκε από την "απόδοση" της υπηρεσίας σε όλη τη διάρκεια της (δηλαδή πρόκειται για την άποψη που έχει ο χρήστης για την υπηρεσία). Η ποιότητα υπηρεσίας είναι ένα σημαντικό θέμα για τα ATM δίκτυα, εξαιτίας του ότι χρησιμοποιούνται για μεταφορά πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο όπως ο ήχος και το βίντεο. Όταν ένα νοητό κύκλωμα εγκαθίσταται, τότε το στρώμα μεταφοράς και το ATM στρώμα πρέπει να συμφωνήσουν σε ένα συμβόλαιο το οποίο να ορίζει τις υπηρεσίες. Στην περίπτωση ενός δημόσιου δικτύου, αυτό το συμβόλαιο πρέπει να έχει νομότυπες διαδικασίες. Έτσι για παράδειγμα, εάν ο μεταφορέας συμφωνήσει σε απώλεια μίας κυψελίδας σε μεταφορά πλήθους ενός δισεκατομμυρίου κυψελίδων τότε αν χαθούν δύο από αυτές έχουμε καταπάτηση του συμβολαίου. Το συμβόλαιο ανάμεσα στα δύο άκρα μεταφοράς σε ένα δίκτυο απαρτίζεται από τρία τμήματα:

- Δείκτες κίνησης
- QoS απαιτήσεις
- Κατηγορία υπηρεσίας

Το πρώτο μέρος του συμβολαίου (δείκτες κίνησης), χαρακτηρίζει το φορτίο που μπορεί να εξυπηρετηθεί στο δίκτυο. Το δεύτερο μέρος (QoS), καθορίζει την ποιότητα των υπηρεσιών. Το τρίτο μέρος δηλώνει την κατηγορία της υπηρεσίας που έχουμε και εξαρτάται από τα δύο προηγούμενα μέρη του συμβολαίου.

Οι δείκτες που δίνουν πληροφορίες για την κίνηση είναι οι ακόλουθοι:

- Μέγιστος ρυθμός κυψελίδων (PCR - Peak Cell Rate)
- Υποστηρίξιμος ρυθμός κυψελίδων (SCR - Sustainable Cell Rate)
- Ελάχιστος ρυθμός κυψελίδων (MCR - Minimum Cell Rate)
- Ανοχή απόκλισης καθυστέρησης κυψελίδων (CDVT - Cell Delay Variation Tolerance)

Η παράμετρος PCR είναι ο μέγιστος ρυθμός στον οποίο ο αποστολέας σχεδιάζει να στείλει κυψελίδες. Αυτή η παράμετρος μπορεί να είναι μικρότερη απ' ό,τι η συχνότητα των καναλιών επιτρέπει. Εάν ο αποστολέας σχεδιάζει να στέλνει κυψελίδες κάθε 4 μsec τότε το PCR είναι 250.000 κυψελίδες / δευτερόλεπτο, ακόμη και αν ο πραγματικός χρόνος μετάδοσης κυψελίδων είναι 2,7μsec. Η δεύτερη παράμετρος (SCR) αποτελεί τον αναμενόμενο ή τον απαιτούμενο μέσο ρυθμό κυψελίδων από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα μετάδοσης. [10]

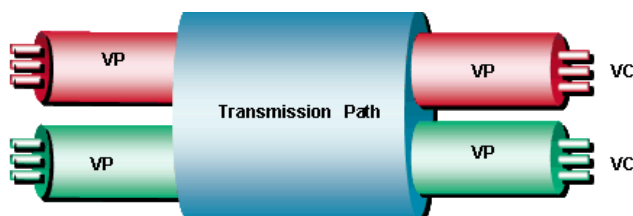
Η τρίτη παράμετρος (MCR) υποδηλώνει τον μικρότερο αριθμό του λόγου κυψελίδων / sec όπου ο χρήστης θεωρεί αποδεκτό. Εάν ο φορέας δεν μπορεί να εγγυηθεί την παροχή αυτής της συχνότητας (ελάχιστου ρυθμού κυψελίδων) τότε διακόπτει την σύνδεση. Το CVDT μας



ενημερώνει σχετικά με την διακύμανση που θα υπάρξει κατά την μεταφορά των κυψελίδων. Η παράμετρος αυτή ελέγχει το πλήθος της αποδεκτής διακύμανσης, χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο αλγόριθμο για να την περιγράψει.

## 2.9 Εικονικά δίκτυα και ATM

Τα δίκτυα ATM είναι δομημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν υπηρεσίες μέσω μιας ιεραρχημένης δομής. Μπορούν και δημιουργούν εικονικά μονοπάτια (virtual paths - VPs), τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από εικονικά κανάλια (virtual Channels - VCs). Έτσι το σύνολο των χρηστών διαχωρίζεται και καταλαμβάνει συγκεκριμένα κανάλια του δικτύου για την παροχή υπηρεσιών. Μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του διαχωρισμού είναι η ασφάλεια των χρηστών, λόγω της δυνατότητας χρήσης ιδιωτικών καναλιών και μονοπατιών. Τα εικονικά κανάλια δημιουργούνται ανάμεσα σε δύο τερματικούς σταθμούς του δικτύου ή μεταξύ ενός τερματικού και του ίδιου του δικτύου με στόχο την επικοινωνία και την αμφίδρομη αποστολή δεδομένων. Οι λογικές συνδέσεις, τα εικονικά κανάλια δηλαδή, που έχουν κοινό πέρασ πακετάρονται μέσα σε ένα εικονικό μονοπάτι. Η ολοκλήρωση μιας σύνδεσης για την μεταφορά δεδομένων δεν πραγματοποιείται μόνο μέσω ενός φυσικού δρόμου. Τα πακέτα ATM έχουν μεταβλητό μήκος που εξαρτάται από την πληροφορία που μεταδίδεται κάθε στιγμή και ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας χρησιμοποιούνται πολλά διαφορετικά διαθέσιμα κανάλια. Για να αποφευχθεί τυχόν απώλεια πακέτων, κάθε πακέτο ATM περιέχει στην επικεφαλίδα του πληροφορίες σχετικά με το εικονικό μονοπάτι και το εικονικό κανάλι στο οποίο υπάγεται. Οι πληροφορίες αυτές είναι γνωστές ως κώδικας αναγνώρισης νοητού καναλιού(VCI) και κώδικας αναγνώρισης νοητού μονοπατιού(VPI). Με βάση αυτούς τους δύο κώδικες κάθε κυψελίδα(cell) οδηγείται από άκρο σε άκρο μέσω συγκεκριμένων οδών. Σε κάθε ATM μεταγωγέα(σвич) οι κώδικες VCI και VPI της επικεφαλίδας του πακέτου αλλάζουν σύμφωνα με τον πίνακα μετάφρασης του κόμβου. Κατά την έξοδο του πακέτου από τον κόμβο μεταγωγής η κυψελίδα έχει νέες τιμές κωδικών VCI και VPI με τις οποίες προωθείται σε επόμενο κόμβο. Μια απεικόνιση της ιεραρχημένης δομής δίνεται παρακάτω :



Εικόνα 2. 9 Ιεραρχία μονοπατιών ATM

Είναι φανερό ότι τα νοητά κανάλια οργανώνονται σε δέσμες μέσα σε νοητά μονοπάτια. Ουσιαστικά ο φυσικός αγωγός περιέχει μικρότερους νοητούς αγωγούς(VPs), οι οποίοι με τη σειρά τους περιέχουν ακόμα μικρότερους(VCs). Όλα τα εικονικά κανάλια που ανήκουν στον ίδιο αγωγό έχουν ίδια τιμή κώδικα αναγνώρισης νοητού μονοπατιού(VPI). Η μεταγωγή των εικονικών μονοπατιών πραγματοποιείται από κόμβους γνωστούς ως χειριστές νοητών μονοπατιών.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μια σύνδεση μεταξύ δύο τερματικών σημείων δεν πραγματοποιείται μονάχα μέσω ενός εικονικού καναλιού ενός φυσικού δρόμου. Τα εικονικά κανάλια που δημιουργούνται μεταξύ των επιμέρους κόμβων αποτελούν μικρότερα τμήματα ενός μεγάλου καναλιού που εκτείνεται από το ένα άκρο σύνδεσης στο άλλο. Η σύνδεση αυτή ονομάζεται σύνδεση νοητού καναλιού (VCC – virtual channel connection). Κάθε σύνδεσμος εικονικού καναλιού (VCL – virtual channel link) είναι ένα κομμάτι ενός VCC και έχει τα ίδια άκρα με το εικονικό μονοπάτι στο οποίο υπάγεται.

Αντίστοιχα με τα εικονικά κανάλια, εγκαθιδρύονται συνδέσεις με εικονικά μονοπάτια. Ένα σύνολο από εικονικά μονοπάτια δημιουργούν συνδέσμους (VPLs – virtual path links) κατά μήκος δύο τερματικών σταθμών με στόχο την μετάδοση πακέτων. Οι σύνδεσμοι που δημιουργούνται μεταξύ των επιμέρους μονοπατιών έχουν ως τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας επιτυχημένης σύνδεσης εικονικού μονοπατιού (VPC) ανάμεσα στα δύο άκρα επικοινωνίας. [6]

Ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να ορίσει αν το κύκλωμα σύνδεσης είναι μόνιμο ή μεταγωγίμο. Στην περίπτωση του μόνιμου κυκλώματος (PVC – permanent virtual circuit) δεσμεύονται πόροι του δικτύου ανά πάσα στιγμή ανεξάρτητα με το αν χρησιμοποιείται το συγκεκριμένο κύκλωμα ή όχι. Φυσικά η εγκαθίδρυση μόνιμου κυκλώματος έχει μεγάλο κόστος, αλλά ικανοποιεί υψηλές απαιτήσεις. Από την άλλη ένα μεταγωγίμο εικονικό κύκλωμα (SVC – switched virtual circuit) έχει πολύ χαμηλότερο κόστος αλλά δεν έχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών από πλευράς χρήστη ανά πάσα στιγμή. Οι μόνιμες συνδέσεις είναι οι μισθωμένες συνδέσεις και χρησιμοποιούνται κυρίως από μεγάλες εταιρίες, ενώ τα SVCs είναι αντίστοιχες με τις απλές τηλεφωνικές συνδέσεις και δημιουργούνται κάθε φορά που παρουσιάζεται αίτηση από τον χρήστη, με προϋπόθεση να υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι φυσικά.

## Κεφάλαιο 3 : Το πρωτόκολλο MPLS

### 3.1 Εισαγωγή

Τα Multiprotocol Label Switching (MPLS) δίκτυα τείνουν να γίνουν η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνολογία μεταφοράς για δίκτυα παροχής υπηρεσιών. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω των διαφόρων χαρακτηριστικών που είναι διαθέσιμα σε μια ενιαία λύση, τα οποία δεν ήταν δυνατό να επιτευχθούν από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν, όπως ATM ή frame relay με μεταγωγή κυκλώματος. Οι τεχνολογίες αυτές δεν μπορούν να υποστηρίξουν πολλά διαφορετικά πρωτόκολλα με αποτέλεσμα την αδυναμία οικοδόμηση ενός καλά επεκτάσιμου δικτύου. Αυτές οι τεχνολογίες δεν παρέχουν ικανοποιητικές λύσεις για traffic engineering(TE), δηλαδή τον έλεγχο της ροής δεδομένων από τον διαχειριστή του δικτύου, χαρακτηριστικό που επιτρέπει στους παρόχους υπηρεσιών να βελτιστοποιήσουν τη ροή της κυκλοφορίας και τις συνδέσεις. Το MPLS ικανοποιεί επαρκώς τις προϋποθέσεις βελτιστοποιημένης ανοικοδόμησης ενός δικτύου κυρίως λόγω της δομής του πρωτοκόλλου και της θέσης στο μοντέλο OSI όπου δραστηριοποιείται.

### 3.2 Ιστορικά Στοιχεία

Η πρώτη ομάδα εργασίας της IETF κλήθηκε να σχεδιάσει το MPLS το 1997 με σκοπό την αντιμετώπιση προβλημάτων που παρουσιάζονταν στους παρόχους υπηρεσιών εκείνη την εποχή. Οι σχεδιαστές αρχικά προσπάθησαν να αντιμετωπίσουν τα πιο προβληματικά θέματα που την εποχή εκείνη ήταν η δυσκολία περαιτέρω ανάπτυξης του δικτύου. Έπρεπε να βρουν μια ιδέα η οποία θα επέτρεπε ταχύτερη δρομολόγηση πακέτων, η οποία θα έπρεπε να είναι συμβατή με πολλές ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες δρομολόγησης. Η ανάγκη συμβατότητας δεν αφορούσε μόνο τα παλαιότερα εδραιωμένα πρωτόκολλα(π.χ. IP), αλλά και τον εγκατεστημένο εξοπλισμό. Το πρωτόκολλο που δημιουργήθηκε λειτουργούσε ανάμεσα στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων (layer 2) και το επίπεδο δικτύου(layer 3). Μερικές φορές αναφέρεται ως πρωτόκολλο επιπέδου 2.5. Αυτό το επίπεδο επιτρέπει στο MPLS να λειτουργεί πάνω από οποιοδήποτε πρωτόκολλο υπάρχει στο επίπεδο 2 με την ενθυλάκωση του επιπέδου δικτύου. Είναι ένα πολύ ισχυρό χαρακτηριστικό γνώρισμα, το οποίο δίνει την δυνατότητα διασύνδεσης των διαφόρων δικτυακών τεχνολογιών και ενοποίησης τους κάτω από μία ενιαία λύση. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί δικό του τύπο διευθυνσιοδότησης που βασίζεται σε ετικέτες. Από τη στιγμή που υπάρχει ανεξαρτησία από το επίπεδο δικτύου, μπορεί να επιτευχθεί πολύ μεγαλύτερη απόδοση στην προώθηση πακέτων μεταξύ των δρομολογητών, αφού η εναλλαγή μεταξύ των ετικετών είναι ταχύτερη και ευκολότερη από ό,τι να γίνονται αναζητήσεις στον πίνακα δρομολόγησης. Η ομάδα της IETF εξακολουθεί να υφίσταται και να βελτιώνει το MPLS ακόμα και σήμερα που έχει εξελιχθεί σε ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται ευρέως και από το οποίο εξαρτώνται πολλά δίκτυα κορμού.

### 3.3 Τι είναι το MPLS

Το MPLS είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που προσφέρει υψηλές επιδόσεις διαχείρισης και προώθησης πακέτων με παράλληλο έλεγχο του δικτύου. Το κύριο χαρακτηριστικό του είναι η ανεξαρτησία από το είδος του πρωτοκόλλου, καθώς αντιμετωπίζει με τον ίδιο τρόπο όλα τα πρωτόκολλα σε διαφορετικά επίπεδα του μοντέλου OSI. Το ίδιο αποτελεί πρωτόκολλο επιπέδου 2.5, μιας και βρίσκεται μεταξύ των επιπέδων 2 και 3 του μοντέλου OSI και παρέχει δυνατότητες για μεταφορά δεδομένων με μεταγωγή πακέτων στο δίκτυο. Ο μηχανισμός λειτουργίας του καθιστά δυνατή την ταχύτερη εξυπηρέτηση, λόγω της χρήσης μικρών ετικετών για κάθε πακέτο αντί των μεγάλων διευθύνσεων που υπάρχουν στα συμβατικά δίκτυα IP. Επειδή δεν γίνεται χρήση των μεγάλων διευθύνσεων IP, δεν χρειάζονται πολύπλοκες αναζητήσεις στον πίνακα δρομολόγησης. Το MPLS δεν έχει στόχο την αντικατάσταση των συμβατικών δικτύων IP, αλλά την προσθήκη ορισμένων λειτουργιών προς καλύτερη απόδοση του δικτύου, αφού συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της IP δρομολόγησης με την απλότητα της αλλαγής ετικετών.

### 3.4 Τρόπος Λειτουργίας του δικτύου MPLS

Ο μηχανισμός δρομολόγησης πακέτων που ταξιδεύουν σε όλο το δίκτυο, βασίζεται σε αποφάσεις που λαμβάνουν οι συσκευές δρομολόγησης σε ένα μονοπάτι που δημιουργείται μεταξύ πηγής και προορισμού. Κάθε συσκευή δρομολόγησης, ελέγχει τις πληροφορίες που βρίσκονται στις επικεφαλίδες των πακέτων, τις επεξεργάζεται και εν συνεχεία λαμβάνει αποφάσεις δρομολόγησης βασισμένες στην ανάλυση και την διεύθυνση προορισμού. Η αντίστοιχη διαδικασία σε ένα δίκτυο IP εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με μια απλή ενέργεια προώθησης πακέτου μεταξύ των δρομολογητών.

Η διαδικασία προώθησης πακέτων σε επόμενο σημείο έχει δύο διαφορετικές λειτουργίες. Η πρώτη είναι η ανάλυση όλων των πιθανών πακέτα τα οποία μπορούν να ταξιδέψουν σε ολόκληρο το δίκτυο και η σύνδεση τους με ισοδύναμες κλάσεις προώθησης(FECs). Πακέτα που ανήκουν στην ίδια FEC αντιμετωπίζονται με ίδιο τρόπο και ακολουθούν πάντα ίδια διαδρομή για να φτάσουν στον προορισμό τους. Η δεύτερη λειτουργία είναι η συσχέτιση κάθε FEC με ένα μοναδικό επόμενο σημείο μεταπήδησης. Και οι δύο ενέργειες πραγματοποιούνται σε κάθε συσκευή δρομολόγησης.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως το πρωτόκολλο MPLS επιλύει προβλήματα ανεξαρτησίας του δικτύου, χρησιμοποιώντας χρονικά οικονομικές τεχνικές για την προώθηση πακέτων. Οι αποφάσεις προώθησης γίνονται βάσει ετικετών οι οποίες συνδυαζόμενες δημιουργούν ένα μονοπάτι εναλλαγής ετικετών(LSP) μέσα στο δίκτυο MPLS. Αξίζει να σημειωθεί πως η προώθηση πακέτων βασισμένη σε στοιχεία της εισερχόμενης ετικέτας έχει αντίστροφη λογική από την προώθηση της κίνησης σε προ-δρομολογημένο περιβάλλον με πίνακες. Από τη στιγμή που οι συσκευές δεν ελέγχουν τίποτα άλλο πέρα από την εισερχόμενη ετικέτα και προωθούν πακέτα σύμφωνα με αυτή, κάθε συσκευή ικανή να ελέγξει και να αλλάξει την εισερχόμενη ετικέτα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δίκτυο MPLS. [11]

Η ταξινόμηση των πακέτων σε κλάσεις και η αποφάσεις προώθησης γίνονται μόνο μια φορά στις ακραίες συσκευές(LERs), ενώ οι συσκευές του υπόλοιπου δικτύου(LSRs) δεν ασχολούνται καθόλου τις ενθυλακωμένες κεφαλίδες των πακέτων, παρά μόνο εκτελούν ένα ακριβή έλεγχο για τις εισαρχόμενες και τις εξαρχόμενες ετικέτες, τις εναλλάσσουν και προωθούν τα πακέτα ανεξάρτητα από τύπο διασύνδεσης.

Αν υποτεθεί ένα πακέτα που απαιτεί πρόσθετες ενέργειες για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων κλάσεων(FECs), χρησιμοποιώντας τη συμβατική προώθηση IP(με πίνακες) κάθε συσκευή θα έπρεπε να εκτελέσει αυτές τις ενέργειες, ενώ στο MPLS οι ενέργειες εκτελούνται μονάχα από την πρώτη συσκευή(ingress LER). Έτσι, οι συσκευές που βρίσκονται στον πυρήνα του δικτύου έχοντας μειωμένες υποχρεώσεις μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλους τους διαθέσιμους πόρους τους για την απλή εναλλαγή ετικετών και την προώθηση των πακέτων πιο κοντά στον προορισμό τους πολύ ταχύτερα και αξιόπιστα.

Προκειμένου να έχει ο διαχειριστής ένα συνολικό έλεγχο του δικτύου(traffic engineering-TE) ως προς τη ροή των δεδομένων και την παροχή ορισμένων εγγυήσεων, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επιθυμητός ο ορισμός συγκεκριμένης διαδρομής που ακολουθούν τα πακέτα, η οποία ορίζεται ρητά. Παρέχετε δηλαδή ο επιθυμητός έλεγχος στο σύνολο της κυκλοφορίας, προς τα πού υπάρχει ροή και πώς διαχειρίζεται στη διαδρομή. Πρόσθετοι περιορισμοί μπορούν να επιβληθούν στα μονοπάτια του δικτύου (LSPs), όπως η εγγυημένη απόδοση εύρους ζώνης, η προτεραιότητα πακέτων, τα χαρακτηριστικά σύνδεσης και οι επιλογές διαδρομής. Όσον αφορά δίκτυα των φορέων παροχής υπηρεσιών, είναι απαραίτητη η παροχή ορισμένων εγγυήσεων προς τους πελάτες για τις εφαρμογές τους.

### 3.5 Αρχιτεκτονική δικτύου MPLS

Τα πιο βασικά στοιχεία που συνθέτουν ένα δίκτυο MPLS είναι οι δρομολογητές. Υπάρχει μια γκάμα διαφορετικών ονομάτων δρομολογητών ανάλογα με τις κύριες λειτουργίες που επιτελούν. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι 2, οι LSRs και οι LERs που χωρίζονται σε υποκατηγορίες και οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω.

#### 3.5.1 LSR(Label Switch Router)

Κάθε δρομολογητής στον κύριο άξονα(backbone) του δικτύου. Δουλειά του είναι η λήψη πακέτων από προηγούμενο σημείο δρομολόγησης που υποστηρίζει ετικέτες(LER ή LSR), ο έλεγχος και η εναλλαγή ετικετών και η προώθηση στο επόμενο βήμα(δρομολογητή). Πιο συγκεκριμένα ο LSR δρομολογητής λαμβάνει ένα πακέτο και ελέγχει την ετικέτα που βρίσκεται στην επικεφαλίδα του πακέτου. Εν συνεχεία αφαιρεί την υπάρχουσα ετικέτα για την οποία ο επόμενος δρομολογητής δεν έχει στοιχεία, προσθέτει μια καινούργια και προωθεί το πακέτο στο επόμενο σημείο(next hop) δρομολόγησης. Επειδή ακριβώς αυτού του τύπου οι δρομολογητές έχουν πολύ μικρή πολυπλοκότητα, εφόσον η μόνη τους λειτουργία είναι αυτή που αναφέρθηκε

παραπάνω, μπορούν να εξυπηρετούν πολύ μεγάλο αριθμό πακέτων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. [12]

### 3.5.2 LER(Label Edge Router)

Δρομολογητές τέτοιου τύπου βρίσκονται στα άκρα του δικτύου MPLS και είναι υπεύθυνοι για την αποδοτική σύνδεση με δρομολογητές που δεν μπορούν να υποστηρίξουν ετικέτες. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Στη μια παρουσιάζονται οι ενέργειες που πραγματοποιούνται από τον LER όταν εισέρχεται ένα πακέτο στο δίκτυο MPLS και στην άλλη οι εργασίες όταν εξέρχεται. Στην πρώτη περίπτωση ο δρομολογητής ονομάζεται *Ingress Router*. Επειδή το πακέτο δεν έχει ετικέτα και συνεπώς δε θα είναι δυνατή η δρομολόγηση του με το πρωτόκολλο MPLS χωρίς μια, ο LER που το λαμβάνει, είναι υπεύθυνος για την απόδοση ετικετών σε κάθε πακέτο πριν την προώθηση στο επόμενο βήμα. Στον *Ingress Router* γίνεται και ο διαχωρισμός των πακέτων σε αντίστοιχες κλάσεις (FECs) ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε πακέτου. Η αντίστροφη διαδικασία πραγματοποιείται σε ένα *Egress Router*. Όταν ένα πακέτο φτάσει σε ένα δρομολογητή τέτοιου τύπου, αφαιρείται η ετικέτα έτσι ώστε να είναι δυνατή η δρομολόγηση του από τα επόμενα στοιχεία που δεν ανήκουν στο δίκτυο MPLS και κατά συνέπεια δεν αντιλαμβάνονται τις ετικέτες.

### 3.5.3 FEC(Forwarding Equivalent Class)

Όπως ήδη αναφέρθηκε στους LERs εισόδου γίνεται διαχωρισμός των πακέτων σε ομάδες διαφορετικών κλάσεων, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους. Αυτή η ομαδοποίηση των πακέτων επιτρέπει την ευκολότερη και αποδοτικότερη διαχείριση του συνόλου των πακέτων, επιτρέποντας να δοθεί προτεραιότητα σε ομάδες πιο κρίσιμης σημασίας. Με αυτό τον τρόπο εισάγεται πρακτικά η έννοια της εγγυημένης ποιότητας υπηρεσιών(QoS) σε όποιες περιπτώσεις είναι αναγκαία. Για να μπορεί να αντιληφθεί ο δρομολογητής εισόδου τη βαρύτητα του πακέτου που πρόκειται να προωθήσει, ελέγχει την κλάση υπηρεσιών(CoS) που χαρακτηρίζει το πακέτο.

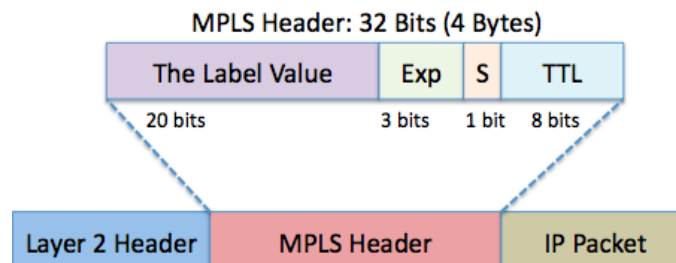
Οι κανόνες σύμφωνα με τους οποίους γίνεται ο χωρισμός των πακέτων σε ομάδες συγκεκριμένων κλάσεων προώθησης, πραγματοποιείται από το ίδιο το πρωτόκολλο MPLS. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις : Τοπική ανάθεση (Local Binding) ή απομακρυσμένη ανάθεση (Remote Binding).

Κατά την τοπική ανάθεση ο δρομολογητής εισόδου έχει την ευθύνη να κατατάξει τις ετικέτες σε ομάδες κλάσεων προώθησης, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω την πολυπλοκότητα του. Στην περίπτωση της απομακρυσμένης ανάθεσης, ένας LSR κόμβος είναι αυτός που θα αναθέσει την ετικέτα σε κάποια εκ των κλάσεων προώθησης. Κάθε επιλογή έχει τα θετικά τις και τα αρνητικά της στοιχεία, αλλά η δυνατότητα που δίνεται στο διαχειριστή να επιλέξει τι από τα δύο τον εξυπηρετεί περισσότερο είναι σίγουρα άλλο ένα πλεονέκτημα της τεχνολογίας.

### 3.5.4 MPLS Ετικέτες

Οι ετικέτες προστίθενται μεταξύ των επικεφαλίδων επιπέδου 2 και 3 ενός πακέτου από το δρομολογητή εισόδου του δικτύου MPLS, με σκοπό να καθίσταται δυνατή η δρομολόγηση σύμφωνα με τις αρχές του πρωτοκόλλου MPLS. Αφού αποδοθεί μια ετικέτα το εισερχόμενο πακέτο δεν προωθείται έως ότου δεσμευτεί μια συγκεκριμένη τιμή ετικέτας σε κάθε δρομολογητή που βρίσκεται στη διαδρομή του πακέτου, από την πηγή στον προορισμό. Η τιμή της ετικέτας που αποδίδεται στο πακέτο είναι άμεσα συσχετισμένη με τις πληροφορίες που περιέχει η IP επικεφαλίδα, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάθεση του πακέτου σε κάποια FEC. [11]

Η MPLS επικεφαλίδα του πακέτου έχει μέγεθος 32bit. Αποτελείται από 4 τμήματα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Το πρώτο τμήμα στη σειρά καταλαμβάνει 20 bits και αφορά την τιμή που λαμβάνει η ετικέτα του πακέτου(*label value*). Τα επόμενα 3 bits αφορούν το *experimental field (EXP)* και αυτή τη στιγμή χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό CoS, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικότερα για τον καθορισμό χαρακτηριστικών της ποιότητας υπηρεσίας που απαιτεί το πακέτο. Ακολουθεί 1 bit (*S- bottom of stack bit*) το οποίο ανάλογα με τη θέση της επικεφαλίδας στη στοίβα των MPLS κεφαλίδων λαμβάνει τιμή 1 ή 0. Συγκεκριμένα έχει τιμή 0 για κάθε επικεφαλίδα πλην της τελευταίας που στην οποία λαμβάνει τιμή 1 ώστε να ειδοποιήσει πως εκεί αδειάζει η στοίβα. Το τελευταίο πεδίο της επικεφαλίδας καταλαμβάνει 8bits και περιέχει στοιχεία για το χρόνο ζωής του πακέτου(*TTL*) πριν καταστραφεί. Η χρήση αυτού του πεδίου είναι πολύ σημαντική αφού βοηθάει να αποφευχθούν ατέρμονες επαναλήψεις βρόγχων για ένα πακέτο.



Εικόνα 3. 1 Δομή επικεφαλίδας MPLS

#### Μέθοδοι δημιουργίας ετικετών

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη δημιουργία ετικετών:

- δημιουργία βασισμένη στην τοπολογία(*topology based method*) : αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα απλής δρομολόγησης (όπως είναι τα OSPF και BGP).
- δημιουργία βασισμένη σε αιτήσεις(*request based method*) : χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις αιτήματος ελέγχου κυκλοφορίας (όπως είναι το πρωτόκολλο δρομολόγησης RSVP).

- δημιουργία βασιζόμενη στην κίνηση του δικτύου(traffic based method) : σε αυτή τη μέθοδο η λήψη ενός πακέτου ενεργοποιεί την ανάθεση αντίστοιχης ετικέτας.

Οι πρώτες δύο μέθοδοι δημιουργίας ετικετών είναι παραδείγματα ρυθμιζόμενης ομαδοποίησης ετικετών(control driven label binding), ενώ η τρίτη μέθοδος είναι παράδειγμα ομαδοποίησης ανάλογα με το είδος των δεδομένων(data driven binding).

### 3.5.5 LSP

Το LSP(label switched path) είναι μια διαδρομή που σχηματίζεται στο εσωτερικό του MPLS δίκτυο μεταξύ δύο κόμβων που υποστηρίζουν MPLS δρομολόγηση βάσει ετικετών. Οι κόμβοι δεν απαιτείται να βρίσκονται στην άκρη του δικτύου. Ένα μονοπάτι LSP δημιουργείται από μια ακολουθία MPLS κόμβων(LERs ή και LRSs), οι οποίοι προωθούν πακέτα με ετικέτες μιας συγκεκριμένης κλάσης (FEC). Ο κόμβος στον οποίο εκκινεί το μονοπάτι LSP καλείται "head-end" κόμβος ή "ingress" κόμβος εισόδου. Κατ' αντιστοιχία ο κόμβος που καταλήγει το μονοπάτι καλείται ουρά "tail-end" ή "egress" κόμβος εξόδου του μονοπατιού LSP. Η γνώση των ετικετών που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε κάθε κόμβο είναι θέμα του επιπέδου ελέγχου(control plane), σύμφωνα με το οποίο ομαδοποιημένες ετικέτες μεταφέρονται μεταξύ των κόμβων, με τη βοήθεια ενός πρωτοκόλλου διανομής ετικέτας(LDP).

Στην συμβατική προώθηση(IP) κάθε συσκευή πραγματοποιεί μια φορά διαχωρισμό των πακέτων σε κλάσεις. Στην περίπτωση της MPLS προώθησης υπάρχουν 3 διαφορετικές λειτουργίες που εκτελούνται κατά μήκος του LSP, προκειμένου να διαβιβάσει ένα πακέτο.

Η πρώτη κατά σειρά διαδικασία είναι η επιβολή ετικέτας(label imposition). Στα πακέτα που μεταφέρονται μέσω του δικτύου MPLS επιβάλλεται μια νέα ετικέτα κατά της είσοδο τους στον edge LER. Δημιουργείται μια νέα επικεφαλίδα με μια μοναδική τιμή ετικέτας που χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη κλάση προώθησης (FEC).

Έπειτα ακολουθεί η εναλλαγή ετικετών (label swapping). Η διαδικασία εναλλαγής ετικετών πραγματοποιείται στους κόμβους LSR, όπου απλά και πολύ γρήγορα : γίνεται έλεγχος της ετικέτας που εισέρχεται στο κόμβο, αποστέλλεται ένα σήμα στον επόμενο κόμβο με την τιμή της ετικέτας του πακέτα, αλλάζει η τιμή της υπάρχουσας ετικέτα, αποδίδεται μια νέα τιμή και το πακέτο προωθείται στον ακόλουθο κόμβο. Σκοπός του κάθε κόμβου είναι να απαλλαγεί από το πακέτο το συντομότερο δυνατόν.

Η τρίτη διαδικασία είναι η αφαίρεση της ετικέτας(label disposition) από το πακέτο. Αυτό λαμβάνει χώρα στο προτελευταίο κόμβο LSR και μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους. Είτε εναλλάσσοντας την τιμή της ετικέτας με την τιμή μηδέν(explicit null) στον προτελευταίο κόμβο LSR, είτε αφαιρώντας την ετικέτα στον προτελευταίο κόμβο(implicit null) και προωθώντας το πακέτο χωρίς ετικέτα στο LER.

#### Explicit Null



Ο τελευταίος κόμβος στέλνει ένα σήμα με τιμή ετικέτας μηδέν στον προτελευταίο, η οποία αντιπροσωπεύει ρητά την τιμή μηδέν στο IPv4. Με αυτό τον τρόπο ο προτελευταίος κόμβος ενημερώνεται ότι είναι πριν τον τελευταίο κόμβο του μονοπατιού(LSP) και δεσμεύεται να ανταλλάξει την τιμή της εισαρχόμενης ετικέτας με την τιμή μηδέν, πριν εκτελέσει την προώθηση στο επόμενο βήμα(hop). Καθώς το πακέτο φτάνει στο ακραίο LER, αφαιρείται η MPLS ετικέτα αφού πρώτα ελεγχθούν τυχόν παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα υπηρεσιών. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η διατήρηση κλάσεων υπηρεσίας(CoS) σε όλο το μήκος του LSP.

### Implicit Null

Σε αυτή την περίπτωση ο ακραίος κόμβος στέλνει σήμα στον προηγούμενο με αίτημα απόδοσης τιμής ετικέτας ίση με 3, τιμή η οποία αντιπροσωπεύει το σιωπηλό μηδέν. Λόγω του συγκεκριμένου αιτήματος ο LSR δρομολογητής δεν προβαίνει σε εναλλαγή τιμών ετικέτας, αλλά αφαιρεί ο ίδιος(label pop) την ετικέτα MPLS, με αποτέλεσμα ο ακραίος κόμβος να λάβει το πακέτο στη μορφή που το έλαβε και ο δρομολογητής εισόδου (ingress LER). Έτσι μειώνεται ο αριθμός των ενεργειών που απαιτούνται για να ληφθεί η επιθυμητή πληροφορία. Επειδή όμως δεν υπάρχει επικεφαλίδα MPLS στο πακέτο, όταν αυτό φτάνει στο egress LER, ο δρομολογητής είναι αναγκασμένος να ελέγξει περεταίρω την κεφαλίδα του πακέτου για έλεγχο επιπλέον απαιτήσεων(CoS).

### 3.5.6 LDP

Ακρογωνιαίος λίθος του πρωτοκόλλου MPLS είναι το πρωτόκολλο διαχείρισης και απόδοσης ετικετών(LDP). Αυτό είναι υπεύθυνο για την αποκατάσταση της επικοινωνίας μεταξύ των δρομολογητών(LSRs) ώστε να καθίσταται δυνατή η προώθηση και επεξεργασία πακέτων μέσω αυτών. Για την ενημέρωση και την ανάθεση ετικετών στους δρομολογητές το LDP αποκαθιστά συνδέσεις TCP, μέσω των οποίων ο ένας δρομολογητής μπορεί να ενημερώσει τον γειτονικό του σχετικά με την ετικέτα που αποδίδει και την κλάση(FEC) στην οποία την προσθέτει. Δύο LSRs που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο LDP για την ανταλλαγή σημάτων με στόχο την μεταξύ τους επικοινωνία, καλούνται "label distribution peers", λόγω της πληροφορίας που ανταλλάσσουν.

Το LDP ορίστηκε για τη διανομή των ετικετών. Αποτελείται από μια σειρά διαδικασιών, σύμφωνα με τις οποίες οι δρομολογητές (LSRs) εδραιώνουν μονοπάτια(LSPs) μέσα σε ένα δίκτυο, ακολουθώντας μια διαδικασία χαρτογράφησης του επιπέδου δικτύου(network layer), και δρομολογώντας τα πακέτα απευθείας στο επίπεδο των δεδομένων(data link layer). Το LDP συσχετίζει κάθε κλάση προώθησης(FEC) με ένα αντίστοιχο μονοπάτι (LSP) που δημιουργεί. Κάθε FEC καθορίζει ποια πακέτα ανήκουν στο συσχετισμένο με αυτό μονοπάτι (LSP). Το μονοπάτι που δημιουργείται, επεκτείνεται κατά μήκος του δικτύου, καθώς κάθε LSR κόμβος αντιστοιχίζει τις εισαρχόμενες ετικέτες μιας κλάσης FEC με τις εξαρχόμενες για την ίδια κλάση, επεκτείνοντας με αυτό τον τρόπο την αλυσίδα.

Το LDP όμως δεν αποτελεί τη μοναδική λύση πρωτοκόλλου διανομής ετικετών. Έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται και άλλες, όπως είναι : το CR-LDP, το RSVP και το BGP.

- Το CR-LDP είναι μια παραλλαγή του LDP στη οποία ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να θέσει περιορισμούς κίνησης πακέτων. Το CR-LDP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να οριστούν σαφείς περιορισμοί στις διαδρομές που χρησιμοποιούνται, την ποιότητα των υπηρεσιών(QoS), και άλλα χαρακτηριστικά. Αυτά όμως μπορούν να ρυθμιστούν και στο απλό LDP. Μεγάλο πλεονέκτημα έναντι του απλού LDP είναι η δυνατότητα υποστήριξης ελέγχου κυκλοφορίας(traffic engineering). Οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται με την επέκταση του LDP για την υποστήριξη δρομολόγησης ετικέτας που βασίζεται σε περιορισμούς μεταγωγής μονοπατιού (CR-LSPs). CR-LSD χρησιμοποιούνται επίσης σε εικονικά ιδιωτικά δίκτυα MPLS. Γενικά το CR-LDP είναι σχεδόν ίδιο με το βασικό LDP, στη δομή του πακέτου, αλλά περιέχει κάποια επιπλέον TLVs που είναι αναγκαία για την ρύθμιση περιορισμών στα μονοπάτια LSP. [13]
- Το RSVP χρησιμοποιείται επίσης για έλεγχο κυκλοφορίας(traffic engineering) και καθορισμό περιορισμών στις χρησιμοποιούμενες διαδρομές. Είναι λίγο πιο περίπλοκο από το LDP και προσφέρει βελτιωμένες δυνατότητες ελέγχου κυκλοφορίας που δεν είναι διαθέσιμες στην LDP σηματοδότηση. Το RSVP λειτουργεί με τη δημιουργία αμφίδρομων μονοπατιών ανάμεσα σε ένα ingress LER και ένα egress LER. Υπάρχει δυνατότητα καθορισμού απαιτήσεων εύρους ζώνης(bandwidth) του μονοπατιού LSP. Αφού ρυθμιστούν οι διαδρομές και ενεργοποιηθεί το πρωτόκολλο RSVP, ο δρομολογητής εισόδου στέλνει ένα "μήνυμα διαδρομής" προς το δρομολογητή εξόδου. Το μήνυμα διαδρομής περιέχει τις επιλεγμένες πληροφορίες σχετικά με τους πόρους που πρέπει να δεσμευτούν για το LSP που θα δημιουργηθεί. Όταν ο δρομολογητής εξόδου(egress LER) λάβει το μήνυμα διαδρομής, στέλνει ένα "μήνυμα κράτησης" πίσω προς το δρομολογητή εισόδου. Αυτό το μήνυμα κράτησης προωθείται από δρομολογητή σε δρομολογητή κατά μήκος της ίδιας διαδρομής που ακολούθησε το αρχικό μήνυμα (με αντίστροφη σειρά). Μόλις ο δρομολογητής εισόδου λάβει αυτό το μήνυμα κράτησης, έχει διαπιστωθεί ότι υπάρχει μονοπάτι RSVP που πληροί τις απαιτούμενες προϋποθέσεις. Όλα τα LSRs κατά μήκος της διαδρομής λαμβάνουν τα ίδια στοιχεία διαδρομής και μηνυμάτων κράτησης, στα οποία περιέχονται οι απαιτήσεις εύρους ζώνης. Αν δεν υπάρχει άλλο μονοπάτι(LSP) RSVP υψηλότερης προτεραιότητας που να έχει δεσμεύσει το εύρος ζώνης, και μπορεί να διατεθεί το ζητούμενο εύρος ζώνης, τότε οι δρομολογητές συμπεριλαμβάνονται ως κόμβοι του δημιουργούμενου LSP. Στην περίπτωση που κάποιος δρομολογητής δεν μπορεί να διαθέσει το απαιτούμενο εύρος ζώνης, δημιουργείται ένα μήνυμα δέσμευσης εύρους ζώνης με επιφυλάξεις. Τότε αναζητείται μια νέα διαδρομή που δεν περιλαμβάνει τον συγκεκριμένο δρομολογητή. Αν δεν μπορεί να βρεθεί καμία αποδεκτή διαδρομή, το μονοπάτι LSP δεν εγκαθιδρύεται. Το LSP παραμένει ενεργό για όσο διάστημα μένει ενεργό και το RSVP από το οποίο δημιουργήθηκε. Το RSVP επιτηρεί τη δραστηριότητα κατά μήκος της διαδρομής μέσω της συνεχιζόμενης μετάδοσης μηνυμάτων ελέγχου και λήψης απαντήσεων μεταξύ των κόμβων. Αν τα μηνύματα διακοπών για ένα μικρό χρονικό διάστημα μερικών λεπτών, η RSVP συνεδρία(session) τερματίζεται, και η διαδρομή LSP παύει να υφίσταται.

- Το BGP χρησιμοποιείται κυρίως στη δρομολόγηση και απόδοση ετικετών σε περιπτώσεις εικονικών δικτύων(VPNs). Παρέχει μεγάλη ευελιξία σε ένα δίκτυο MPLS, αφού παίζει πολύ σημαντικό ρόλο διαχωρίζοντας τις διαδικασίες ελέγχου και προώθησης. Χρησιμοποιώντας τις ετικέτες διατρέχει τις πληροφορίες προώθησης καθώς διαχειρίζεται διαφορετικές ιεραρχίες δρομολόγησης, προσδίδοντας ελευθερία στο δίκτυο, αφού κάθε τμήμα του δικτύου μεταδίδει μονάχα δεδομένα που χρειάζονται για εφαρμογές στις οποίες συμμετέχει. Έτσι, ένας ακραίος κόμβος(ingress/egress LER) που για παράδειγμα δεν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εικονικών δικτύων(VPNs), δεν αναλώνει τους διαθέσιμους πόρους του για πληροφορίες που αφορούν εικονικά δίκτυα. Σε ένα δίκτυο MPLS που χρησιμοποιείται για παροχή υπηρεσιών διαδικτύου και VPN επιπέδου 3(layer-3 VPN), οι πληροφορίες που διαχειρίζεται το BGP είναι ο πίνακας δρομολόγησης IP, τα στοιχεία δρομολόγησης IPv4 και IPv6 των χρηστών και πληροφορίες δρομολόγησης VPNv4 με τις αντίστοιχες ετικέτες VPN. Από τη στιγμή όμως που σε ένα δίκτυο MPLS επιτρέπεται η δρομολόγηση βάσει ετικετών, χωρίς την ανάγκη ελέγχου του πίνακα δρομολόγησης IP, πέρα από τους ακραίους κόμβους, γίνεται αντιληπτό πως το πρωτόκολλο BGP χρειάζεται να υφίσταται μονάχα στους δρομολογητές εισόδου και εξόδου(ingress/egress LERs). Το πρωτόκολλο δρομολόγησης BGP είναι πολύ αποδοτικό σε MPLS δίκτυα που προσφέρουν υπηρεσίες εικονικών γραμμών(VPs), καθώς διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τη διαχείρισή τους.

### 3.6 MPLS – Traffic Engineering (TE)

Τα συμβατικά IGP's χρησιμοποιούν τρόπους δρομολόγησης χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας (TE). Παραδείγματα αυτών είναι αλγόριθμοι δρομολόγησης βάσει κόστους απόστασης ανά γραμμή και πρωτεύουσας χρήσης του κοντινότερου δρόμου(SPF). Με αλγόριθμους διαχείρισης κυκλοφορίας (TE), μπορούν να εφαρμοστούν τόσο οι παραπάνω περιορισμοί, όσο και άλλοι πολύ σημαντικοί περιορισμοί για την αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου. Για παράδειγμα μπορεί να ζητηθεί η εύρεση της κοντινότερης διαδρομής η οποία συνάμα να μπορεί να διαθέσει και το απαιτούμενο εύρος ζώνης.

Ο όρος traffic engineering χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία ελέγχου της ροής δεδομένων μέσα από καθορισμένα μονοπάτια, τα οποία επιλέγονται με γνώμονα την εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του δικτύου(δρομολογητές, γραμμές). Ο μηχανισμός επιτρέπει την παρέμβαση του διαχειριστή του δικτύου στην κατανομή της ροής δεδομένων, όπως πραγματοποιείται από το πρωτόκολλο IGP, προσδίδοντας μεγαλύτερη αποδοτικότητα στη λειτουργία του δικτύου και καθιστώντας το πιο προβλέψιμο και διαχειρίσιμο σε μελέτες μεταβολής του μεταδιδόμενου όγκου πληροφορίας. [14]

Το TE είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε τοπολογίες δικτύων, όπου δημιουργούνται πολλαπλές διαδρομές μέσω πολλών διαφορετικών παράλληλων δρόμων. Τέτοια μορφή έχουν τα

περισσότερα σημερινά δίκτυα λόγω της απότομης εξάπλωσης των υπηρεσιών διαδικτύου, οι οποίες συνοδεύονται από αυξημένες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και ποιότητας υπηρεσιών. Σημαντικές παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν με χρήση TE είναι η δέσμευση πόρων και τα επίπεδα αποδεχόμενων λαθών.

Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν κατά κύριο λόγο το TE, είναι :

- Η επιλογή του κατάλληλου μονοπατιού
- Δρομολόγηση της κυκλοφορίας στην υπολογισμένη διαδρομή
- Συγκομιδή τοπολογικών πληροφοριών
- Διαχείριση της κυκλοφορίας

### 3.6.1 Επιλογή κατάλληλου μονοπατιού

Η τελική επιλογή του καταλληλότερου μονοπατιού προκύπτει ως αποτέλεσμα μιας διαδικασίας σύγκρισης του μήκους των μονοπατιών όπως γίνεται στο πρωτόκολλο IGP σε συνδυασμό με άλλους περιορισμούς που θέτονται από το διαχειριστή. Τέτοιοι περιορισμοί μπορεί να σχετίζονται με απαιτήσεις για : χαμηλή καθυστέρηση(delay), μικρή διακύμανση στην καθυστέρηση(jitter), μεγάλο εύρος ζώνης(bandwidth), υψηλός ρυθμός μετάδοσης(throughput), ή και άλλες παράμετροι. Γίνεται αντιληπτό ότι μέσω των αλγορίθμων επιλογής μονοπατιού ή βέλτιστη διαδρομή είναι πολύ πιθανό να μην ταυτίζεται με την κοντινότερη. Όπως επίσης σε περιπτώσεις μεγάλων δικτύων ακόμη και με τη βοήθεια αυτών των αλγορίθμων είναι πολύ δύσκολο να επιλεγεί μια διαδρομή, αφού το φόρτο εργασίας και το πλήθος των χρηστών είναι τόσο μεγάλο που καθιστούν το δίκτυο πολύ δύσκολο σε προβλέψεις.

### 3.6.2 Δρομολόγηση της κυκλοφορίας στην υπολογισμένη διαδρομή

Η δρομολόγηση των πακέτων γίνεται από την πηγή στον προορισμό μέσω του επιλεγμένου μονοπατιού, το οποίο προέκυψε από τους αλγοριθμικούς υπολογισμούς που λαμβάνουν ως παραμέτρους τους περιορισμούς που τέθηκαν. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή δρομολόγηση συνήθως χρησιμοποιούνται πίνακες προώθησης.

### 3.6.3 Συγκομιδή τοπολογικών πληροφοριών

Για τη λήψη τοπολογικών πληροφοριών είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός μηχανισμού που ενημερώνει τους κόμβους του δικτύου σχετικά με την κατάσταση των γραμμών αλλά και των υπόλοιπων γειτονικών κόμβων. Με τη βοήθεια αυτού του μηχανισμού, οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να χαρτογραφήσουν την τοπολογία του δικτύου. Είναι κρίσιμης σημασίας η ταχύτατη πληροφόρηση των στοιχείων του δικτύου σε περιπτώσεις σφαλμάτων ή ακόμα και απώλειας στοιχείου, ώστε να μπορεί το πρόβλημα να επιλυθεί γρήγορα.

### 3.6.4 Διαχείριση της κυκλοφορίας

Η διαχείριση της κυκλοφορίας(traffic management) αφορά κυρίως τον έλεγχο της ποιότητας των αποσταλλόμενων δεδομένων. Επιτηρεί την διαδρομή σύνδεσης και αν αυτή συνεχίζει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις που είχαν τεθεί για την αρχική εγκαθίδρυση του μονοπατιού για την αποστολή των δεδομένων.

### 3.6.5 Αλγόριθμοι δρομολόγησης (TE)

#### 3.6.5.1 CBR

Ο μηχανισμός του TE είναι πολύ αποτελεσματικός στην περίπτωση που εφαρμόζεται σε δίκτυο MPLS, αφού βοηθάει στην βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσιών και την αποδοτικότερη χρήση όλων των πόρων που διαθέτει το δίκτυο. Ένας από τους κυριότερους μηχανισμούς δρομολόγησης για TE, ονομάζεται "δρομολόγηση βάσει περιορισμών"(CBR). Εφαρμόζεται σε δίκτυα όπου είναι δυνατή η μετάδοση μέσω πολλών διαδρομών, μεταξύ των οποίων πρέπει να επιλεγεί η βέλτιστη. Λαμβάνει υπόψιν παραμέτρους όπως είναι η τοπολογία του δικτύου και το εύρος ζώνης και κάνοντας χρήση μηχανισμών δρομολόγησης IP, όπως είναι οι OSPF και IS-IS, υπολογίζει με ακρίβεια την κοντινότερη διαδρομή δια μέσου του δικτύου, ώστε τα πακέτα να μεταδοθούν από το σημείο εισόδου στο σημείο εξόδου με τη μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα και το μικρότερο δυνατό κόστος. Με χρήση αλγορίθμων επιλογής πρώτα του κοντινότερου μονοπατιού βάσει των περιορισμών (CSPF) ελέγχονται πληροφορίες απαραίτητες για την μέτρηση των διαθέσιμων πόρων των επιμέρους τμημάτων του δικτύου. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την εφαρμογή του αλγορίθμου σε συνδυασμό με ένα σύνολο IP διευθύνσεων που υποδεικνύουν το επόμενο βήμα (next hop) , δημιουργούν ένα μονοπάτι LSP ανάμεσα στα δύο άκρα που επιθυμείται να συνδεθούν.

#### 3.6.5.2 RSVP

Σε προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε η διαδικασία σηματοδοσίας που χρησιμοποιεί το RSVP. Κάποιες πληροφορίες πρέπει να προστεθούν για να είναι πλήρης η επεξήγηση λειτουργίας του αλγορίθμου. Αρχικά, ο επικεφαλής δρομολογητής, δηλαδή ο δρομολογητής εισόδου, επικοινωνεί με όλους τους υπόλοιπους δρομολογητές του δικτύου με χρήση της RSVP σηματοδοσίας, ζητώντας ή επιβεβαιώνοντας πληροφορίες σχετικά με τους διαθέσιμους πόρους, ώστε να εγκριθεί η εγκαθίδρυση μιας διαδρομής. Το RSVP καταλαμβάνει τους αναγκαίους πόρους σε κάθε δρομολογητή LSR που ανήκει στο μονοπάτι που ορίζει ο επικεφαλής δρομολογητής και αντιστοιχίζει ετικέτες στα πακέτα που μεταφέρονται μέσω του LSP. Για την ενεργοποίηση του RSVP σε περιβάλλον MPLS χρησιμοποιούνται κάποιες απαραίτητες επεκτάσεις. Αυτές είναι :

- Η αίτηση για ετικέτα, η οποία χρησιμοποιείται για την χαρτογράφηση ετικετών(labels) στο LSP.

- Η δέσμευση αριθμών για τη δημιουργία ετικετών, που πραγματοποιείται από τον επικεφαλής δρομολογητή προς όλους τους υπόλοιπους.
- Ο καθορισμός συγκεκριμένης διαδρομής, που επιβεβαιώνεται και πραγματοποιείται μέσω των μηνυμάτων μονοπατιών.
- Η καταγραφή διαδρομής, δηλώνει τους κόμβους που θα συμμετέχουν στην πραγματική διαδρομή του LSP.
- Ο ορισμός ιδιοτήτων συνεδρίας, που είναι απαραίτητος για τον καθορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων συνεδρίας(session).

Ένα ή και περισσότερα από τα παραπάνω μηνύματα μπορεί να χρησιμοποιούνται κατά την εγκατάσταση μιας διαδρομής LSP, ώστε να καθοριστεί η σημασία του κάθε μηνύματος αλλά και η σημασία του. [15]

### 3.7 MPLS VPN

Μια ικανότητα που χαρακτηρίζει την τεχνολογία MPLS είναι η δυνατότητα παροχής υπηρεσιών μέσω εικονικών ιδιωτικών δικτύων (VPN) στα στρώματα 2 και 3 του μοντέλου OSI. Τα εικονικά ιδιωτικά δίκτυα (VPNs) χρησιμοποιούνται από πελάτες που επιθυμούν διαχωρισμό της κίνησής τους από την κίνηση των υπόλοιπων πελατών. Αποτελούν μια πιο οικονομική λύση για τα πραγματικά ιδιωτικά δίκτυα, τα οποία απαιτούσαν την εγκατάσταση νέων γραμμών ανάμεσα στα δύο άκρα που επιθυμείται η διασύνδεση. Τέτοιου είδους δίκτυα χρησιμοποιούνταν κυρίως από τράπεζες, αφού υπήρχε ανάγκη να συνδεθούν πολλά υποκαταστήματα σε ένα ενιαίο σύστημα με μεγάλη αξιοπιστία και ασφάλεια. Για να μην μπορεί λοιπόν κάποιος τρίτος να υποκλέψει πληροφορίες ή να εισέλθει στο δίκτυο ενώ δε θα έπρεπε, χρησιμοποιούνται τα ιδιωτικά δίκτυα. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα, ο πάροχος υπηρεσιών διαδικτύου(ISP) που σύνδεε την επιχείρηση με τον υπόλοιπο κόσμο έξω από το ιδιωτικό δίκτυο, δεν γνώριζε την εσωτερική αρχιτεκτονική του ιδιωτικού δικτύου της επιχείρησης. Με αυτό τον τρόπο οι εταιρίες με ιδιωτικές γραμμές είχαν την βέλτιστη δυνατή ασφάλεια, αφού για να παραβιάσει κανείς το δίκτυο τους θα έπρεπε να βρίσκεται μέσα στα γραφεία της εταιρίας. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα υποδίκτυο με μία διεπαφή μέσω της οποίας υπάρχει επικοινωνία με το παγκόσμιο δίκτυο (internet).

Για να εισέλθει ένας εξωτερικός χρήστης στο ιδιωτικό δίκτυο θα πρέπει να δώσει κάποια στοιχεία που επαληθεύουν την ταυτότητα του, αλλά η κίνηση μέσα στο ιδιωτικό δίκτυο πραγματοποιείται χωρίς έλεγχο ή ανάγκη για ταυτοποίηση. Φυσικά, εγκαταστάσεις ιδιωτικών γραμμών έχουν πολύ μεγάλο κόστος κατασκευής και λειτουργίας, αλλά σε περιπτώσεις μεγάλου μεγέθους επιχειρήσεων με πολλά υποκαταστήματα, όπου ανταλλάσσονται ευαίσθητα προσωπικά δεδομένα, τέτοιου είδους επενδύσεις ήταν απαραίτητες στο παρελθόν. Πλέον προσφέρονται μέσω των παρόχων υπηρεσιών (ISPs) λύσεις εικονικών δικτύων που δεσμεύουν και κατανέμουν εικονικές γραμμές, γραμμές δηλαδή, οι οποίες δεν υφίστανται στην πραγματικότητα, αλλά είναι τμήματα άλλων γραμμών. Μια πραγματική γραμμή μπορεί να

περιέχει πολλές εικονικές, ανάλογα με τον τρόπο που θα κάνει το διαχωρισμό ο διαχειριστής του δικτύου και οι οποίες δεν θα παρεμβάλλονται η μια με την άλλη. Πέρα από τα εικονικά δίκτυα, οι πελάτες μπορούν να επιλέξουν να συνδεθούν μέσω μιας συμβατικής διεπαφής απευθείας με το διαδίκτυο. Στην περίπτωση αυτή η μόνη προστασία έναντι σε απειλές είναι οι κωδικοί πρόσβασης που χρησιμοποιούνται από το χρήστη. Μπορεί κανείς εύκολα να αντιληφθεί για ποιο λόγο οι εταιρίες που διαχειρίζονται ευαίσθητα δεδομένα, δεν χρησιμοποιούν αυτό τον τρόπο σύνδεσης, παρά το γεγονός ότι έχει το ελάχιστο κόστος και πολλές φορές έχει πολύ μικρότερη καθυστέρηση σε σχέση με τα εικονικά ιδιωτικά δίκτυα.

Το MPLS μέσω των εικονικών ιδιωτικών δικτύων 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> επιπέδου δίνει τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών υψηλής αξιοπιστίας σε πολύ προσιτές τιμές. Ο πάροχος υπηρεσιών δίνει σε κάθε ιδιωτικό δίκτυο VPN ένα μοναδικό κωδικό με τον οποίο γίνεται η αναγνώριση της διαδρομής (RD - Route Distinguisher). Οι δρομολογητές έχουν πίνακες δρομολόγησης με ειδικές διευθύνσεις VPN-IP, οι οποίες δημιουργούνται συνδυάζοντας τον αναγνωριστή διαδρομής με την IP διεύθυνση του τελικού χρήστη. Δεδομένου ότι κάθε χρήστης έχει μοναδική IP διεύθυνση, γίνεται αντιληπτό ότι και οι διευθύνσεις VPN-IP θα είναι μοναδικές. Σε αντιστοιχία με ένα απλό MPLS δίκτυο, τα ιδιωτικά δίκτυα MPLS έχουν μια βασική αρχιτεκτονική. Βασικά στοιχεία είναι:

- Το άκρο διασύνδεσης του πελάτη (CE – Customer Edge) : είναι οι δρομολογητές που χρησιμοποιούνται και διαχειρίζονται από τους πελάτες ώστε να είναι δυνατή η σύνδεση του στο ιδιωτικό δίκτυο του παρόχου.
- Το άκρο διασύνδεσης του παρόχου (PE – Provider Edge) : αυτοί οι δρομολογητές λειτουργούν αντίστοιχα με τους LER σε ένα απλό δίκτυο MPLS, δηλαδή αποτελούν τα σημεία εισόδου και εξόδου του δικτύου του παρόχου υπηρεσιών, ενώ ταυτόχρονα είναι υπεύθυνοι για τον καθορισμό των διαδρομών που ακολουθούν τα πακέτα, ενημερώνοντας τους πίνακες δρομολόγησης κάθε VPN δικτύου.
- Δρομολογητές του δικτύου κορμού (P - Provider) : είναι δρομολογητές που λειτουργούν όμοια με τους LSR ενός απλού δικτύου MPLS. Δουλεία τους είναι η υποδοχή των πακέτων και η ταχύτερη δυνατή προώθηση στη επόμενο βήμα (hop), εκτελώντας προώθηση βασισμένη σε MPLS LSPs και όχι βάσει IP δρομολόγησης. Οι P δρομολογητές χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο IGP ώστε να γνωρίζουν του ανανεωμένους πίνακες δρομολόγησης του παροχέα.

Τα παραπάνω δομικά στοιχεία χρησιμοποιούνται σε όλες τις μορφές εικονικών ιδιωτικών δικτύων, ανεξάρτητα με το αν υλοποιούνται στο επίπεδο 2 (layer 2 VPN) ή στο επίπεδο 3 (layer 3 VPN). [16]

### Layer 2 VPN

Τα εικονικά ιδιωτικά δίκτυα του επιπέδου 2 (data link layer) έχουν κύρια εφαρμογή ως δίκτυα απομακρυσμένης πρόσβασης. Δίνουν την δυνατότητα σε χρήστες εκτός του ιδιωτικού δικτύου

μιας επιχείρησης να συνδεθούν και να ανταλλάξουν πληροφορίες. Το δίκτυο λειτουργεί μεταδίδοντας πλαίσια του επιπέδου 2 πάνω από MPLS, παρόλο που η λογική του δε στηρίζεται υποχρεωτικά στην ύπαρξη του MPLS, είναι δηλαδή ανεξάρτητη από την τεχνολογία.

### Layer 3 VPN

Τα εικονικά ιδιωτικά δίκτυα που λειτουργούν στο επίπεδο 3 (network layer) είναι ευρύτερα διαδεδομένα λόγω της διαλειτουργικότητας με άλλα πρωτόκολλα του ίδιου επιπέδου που χρησιμοποιούνται σε πολύ μεγάλο βαθμό, όπως είναι το IP. Κάθε εικονικό ιδιωτικό δίκτυο (VPN) του επιπέδου 3 έχει το δικό του χώρο διευθύνσεων. Για να αποφευχθεί τυχούσα ανεπιθύμητη σύγχυση με άλλα VPN, το κάθε δίκτυο χρησιμοποιεί δικό του εικονικό πίνακα δρομολόγησης και προώθησης (VRF) σε κάθε δρομολογητή και ο οποίος είναι διαφορετικός με τα υπόλοιπα εικονικά ιδιωτικά δίκτυα (NPNs) αλλά και τον οικουμενικό πίνακα δρομολόγησης (global routing table).

### 3.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του MPLS

Τα δίκτυα MPLS χαρακτηρίζονται κυρίως από την δυνατότητα διαβάθμισης των παρεχόμενων υπηρεσιών και την παροχή υψηλής αξιοπιστίας υπηρεσιών. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα μιας εγκατάστασης MPLS δικτύου είναι :

- Η ποιότητα υπηρεσιών (QoS) : με τη συνεχή αύξηση των απαιτήσεων από τα δίκτυα κορμού και την ανάγκη εξυπηρέτησης πολλών διαφορετικών ειδών υπηρεσιών με μειωμένες ή αυξημένες απαιτήσεις, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός μηχανισμού που θα αναλαμβάνει τον έλεγχο και τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών τόσο από την πλευρά του χρήστη αλλά και συνολικά για το δίκτυο. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους, όπως είναι ο έλεγχος ροής δεδομένων (TE) ή ο διαχωρισμός των εφαρμογών σε επίπεδα κρισιμότητας για καλύτερη διαχείριση. [12]
- Η προσαρμοστικότητα : το MPLS ως τεχνολογία δεν θέτει περιορισμούς ως προς τη συνδεσιμότητα του. Μπορεί να λειτουργήσει με όλες τις ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες (IP, ATM, Ethernet) χωρίς κανένα πρόβλημα, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο ευελιξία στο διαχειριστή του δικτύου. Η διαλειτουργικότητα του, είναι ένας από τους λόγους που βρίσκεται στην πρώτη θέση ως λύση τεχνολογίας διασύνδεσης του δικτύου κορμού των περισσότερων παροχών υπηρεσιών.
- Η βελτιωμένη απόδοση κατά την προώθηση πακέτων στο δίκτυο : ο μηχανισμός διαχείρισης και προώθησης των πακέτων από τους δρομολογητές ενός MPLS δικτύου, βοηθάει στην ταχύτατη διεκπεραίωση των ενεργειών που απαιτούνται τόσο για την αποστολή των σημάτων εγκαθίδρυσης επικοινωνίας μεταξύ δύο χρηστών όσο και για μετάδοση των πακέτων που περιέχουν την πληροφορία. [11]
- Επιτρέπει την επεκτασιμότητα του δικτύου : με τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας ο διαχειριστής δεν χρειάζεται να λαμβάνει πολλές και ειδικές παραμέτρους υπόψιν του



κατά την επέκταση του υπάρχοντος δικτύου λόγω της προσαρμοστικότητας που παρουσιάζει η τεχνολογία.

Τα περισσότερα στοιχεία για την συγκεκριμένη τεχνολογία είναι πολύ ενθαρρυντικά. Παρά το γεγονός αυτό υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα που οφείλεται να αναφερθούν. Αυτά είναι :

- Έλλειψη ευφυίας : το MPLS δεν μπορεί να εντοπίσει από μόνο του τις βέλτιστες διαδρομές, αφού το πρωτόκολλο BGP που χρησιμοποιεί τις αναμιγνύει μαζί με τις υπόλοιπες, μη ιδανικές. Αποτέλεσμα είναι να δημιουργούνται πολλαπλές διαδρομές που οδηγούν σε μια έξοδο. Δεν υπάρχει ένα τέλειο πρωτόκολλο που να επιλέγει την καλύτερη διαδρομή, κυρίως διότι οι παράμετροι που καθορίζουν την καλύτερη διαδρομή μπορεί κάθε φορά να διαφέρουν. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι το traffic engineering, με το οποίο ορίζονται από το διαχειριστή οι διαδρομές που θα χρησιμοποιούνται.
- Αντίθετα με πολλά άλλα πρωτόκολλα το MPLS δεν είναι αυτοματοποιημένο : το μόνο που κάνουν οι δρομολογητές ενός MPLS δικτύου, είναι απλά να αλλάζουν ετικέτες και να προωθούν τα πακέτα όπως ορίζεται από το LSP. Η κατασκευή όμως του πλέγματος των LSP tunnels αφήνεται πλήρως στον διαχειριστή. Γίνεται αντιληπτό πως αυτό αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία και είναι επικίνδυνο να ξεχαστεί κάτι. Κάποιες εταιρίες προσφέρουν λύσεις αυτόματης δημιουργίας πλέγματος βασισμένες σε αποδοτικούς αλγορίθμους, αλλά τα αποτελέσματα ακόμη δεν είναι πολύ ικανοποιητικά.
- Ένα LSP δεν μπορεί να ταριχευθεί σε μικρότερα τμήματα : τα LSPs είναι ενιαία και δεν είναι δυνατή η κατάτμηση τους. Αν λοιπόν για παράδειγμα υποθεθεί ότι υπάρχουν διαθέσιμα δύο κυκλώματα των 10G και επιθυμείται η προώθηση τριών LSPs των 6Gbps, τότε θα εξυπηρετηθούν μονάχα τα 2 από τα 3 LSPs αφού το τρίτο δεν θα είναι δυνατό να μοιραστεί σε δύο κομμάτια.

Γενικά, όπως όλες οι τεχνολογίες, το MPLS έχει κάποια θετικά στοιχεία και κάποια αρνητικά. Δουλειά των μηχανικών είναι η εκτίμηση της κατάστασης σε κάθε περίπτωση και η σωστή χρήση της τεχνολογίας, ώστε τα πλεονεκτήματα που δίνει να είναι περισσότερα, ενώ παράλληλα τα μειονεκτήματα να αντιμετωπίζονται με διάφορες τεχνικές.

## Κεφάλαιο 4 : Το πρωτόκολλο WiMAX

### 4.1 Εισαγωγή – Ιστορικά στοιχεία

Το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) είναι ένας οργανισμός που συγκροτήθηκε το 1963 με κύριο σκοπό την ανάπτυξη προτύπων και τη διατήρηση και προσαρμογή λειτουργιών μέσω του Συνδέσμου προτυποποίησης IEEE (IEEE-SA). Το IEEE 802 αναφέρεται σε μια οικογένεια προτύπων που ασχολούνται με τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα και είναι ειδικά σχεδιασμένα για δίκτυα που μεταφέρουν πακέτα μεταβλητού μεγέθους. Το IEEE 802.16 αποτελείται από μια σειρά ασύρματων ευρυζωνικών προτύπων γραμμένα από την IEEE το 1999 σε μια προσπάθεια να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες για ανάπτυξη προτύπων για ευρυζωνικά ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα. Παρόλο που η οικογένεια προτύπων 802.16 ονομάζεται επίσημα WirelessMAN από την IEEE, έχει εδραιωθεί στην αγορά με το όνομα WiMAX από την επίσημη ομάδα του WiMAX Forum.

Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις των προτύπων WiMAX, όπως είναι τα : IEEE 802.16-2001, IEEE 802.16-2004, IEEE 802.16e-2005, IEEE 802.16-2009, 802.16p-2012, 802.16n-2013 και 802.16.1a-2013. Το IEEE 802.16-2004 είναι γνωστό ως σταθερό(Fixed) WiMAX και το IEEE 802.16e-2005 είναι γνωστό ως κινητό(Mobile) WiMAX. Το 802.16m είναι μια αναβαθμισμένη έκδοση του 802.16-2009 και είναι γνωστό ως αναβαθμισμένο WiMAX(WiMAX advanced), το οποίο αποτελεί υποψήφια λύση για παροχή υπηρεσιών σε 4G δίκτυα και ανταγωνίζεται κυρίως με το πρότυπο LTE Advanced. Τόσο τα σταθερά όσο και τα κινητά δίκτυα WiMAX χρησιμοποιούνται για την μετάδοση δεδομένων μέσω ευρυζωνικών συνδέσεων. Δίκτυα fixed WiMAX εξυπηρετούν συνδρομητές με τερματικά που βρίσκονται σε σταθερή θέση, ενώ τα δίκτυα Mobile WiMAX δυνατότητα εξυπηρέτησης κινούμενων χρηστών. Τα δίκτυα με σταθερούς χρήστες μπορούν να προβλεφθούν και να σχεδιαστούν με μεγαλύτερη ευκολία, σε σύγκριση με δίκτυα που εξυπηρετούν κινητούς χρήστες για τους οποίους δεν μπορεί να γίνει εύκολη πρόβλεψη των πιθανών κινήσεων τους ώστε να αναλυθούν με ακρίβεια. [17]

Η τεχνολογία WiMAX λειτουργεί σε συχνότητες από 2 έως 66 Gigahertz (GHz). Το λειτουργικό αυτό εύρος χωρίζεται σε δύο υποπεριοχές συχνοτήτων, αυτή με συχνότητες 2 έως 11 GHz και μία ακόμα με συχνότητες 10 έως 66 GHz. Η χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων υποστηρίζει ζεύξεις οι οποίες δεν έχουν οπτική επαφή(NLOS), ενώ ζεύξεις με οπτική επαφή (LOS) υποστηρίζονται στην άνω ζώνη συχνοτήτων. Επειδή η διάδοση διαφέρει κατά πολύ ανάμεσα σε LOS και NLOS ζεύξεις, κρίθηκε απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός προτύπου που θα υποστηρίζει τόσο το φυσικό(physical) επίπεδο όσο και το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης (MAC). Έτσι, από την έκδοση 802.16-2004 του προτύπου και έπειτα προβλέπεται η υποστήριξη αυτών των δύο επιπέδων στο μοντέλο OSI.

Το πρότυπο IEEE 802.16, το οποίο περιλαμβάνει προδιαγραφές για τα στρώματα MAC και PHY, αναπτύχθηκε για υπηρεσίες διαδικτύου μέσω ασύρματων μητροπολιτικών

δικτύων(WMAN), ως εναλλακτική λύση στα συμβατικά ενσύρματα δίκτυα, όπως το DSL. Το 802.16 υποστηρίζει δύο τύπους συνδέσεων : συνδέσεις σημείου προς πολλά σημεία(PMP) και συνδέσεις πλέγματος (mesh).

Ένα από τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν το WiMAX στο φυσικό(PHY) επίπεδο είναι η χρήση ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM), η οποία αποτελεί μια άκρως αποδοτική τεχνική διαμόρφωσης. Το πρότυπο 802.16 υποστηρίζει 2 τεχνικές OFDM διαμόρφωσης : την OFDM και την OFDMA. Και οι δύο αυτές τεχνολογίες επιτρέπουν στους υποφορείς (subcarriers) να διαμορφώνουν το σήμα προσαρμοστικά (QPSK, 8PSQ, 16-QAM, 64-QAM) ανάλογα με την απόσταση και το θόρυβο της ζεύξης. Η OFDMA τεχνική έχει επίσης ικανότητα κλιμάκωσης που παρέχει ακόμα υψηλότερη απόδοση και οικονομία εύρους ζώνης.

Το επίπεδο MAC του 802.16 είχε αρχικά σχεδιαστεί για εφαρμογές ευρυζωνικής ασύρματης σύνδεσης σημείου προς πολλαπλά σημεία (PMP) , αλλά με τις τροποποιήσεις του 802.16a και 802.16d που ακολούθησαν, χρησιμοποιείται και σε δίκτυα πλέγματος. Η χρήση της OFDM τεχνικής διαμόρφωσης υιοθετήθηκε από το 802.16a, γεγονός που παρείχε μεγαλύτερη φασματική απόδοση και μείωση των παρεμβολών. Στην έκδοση 802.16b του προτύπου καλύπτονται οι περισσότερες από τις πτυχές που αφορούν την εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσιών(QoS). [18] Στην έκδοση 802.16e εισήχθησαν οι κλιμακώσεις του OFDMA στο πρότυπο, ενώ το ίδιο έτος αναθεωρήθηκε η έκδοση 802.16-2004 και αντικατέστησε προηγούμενες εκδόσεις ολοκληρώνοντας το πρότυπο όσον αφορά την σύνδεση σταθερών χρηστών. Το 802.16e ήταν η έκδοση που υποστήριζε κινητούς χρήστες. Σε αυτή την έκδοση με κάποιες προσθήκες, δόθηκε η δυνατότητα υποστήριξης των κινητών επικοινωνιών σε ταχύτητες κίνησης οχημάτων.

Αργότερα παρουσιάστηκε μια άλλη τεχνολογία γνωστή ως softswitch που μπορεί να παρακάμψει τους διακόπτες PSTN. Είναι γνωστό όμως ότι το 802.16 έχει NLOS εμβέλεια που κυμαίνεται από 4 έως 6 μίλια, ανάλογα με την πυκνότητα του χώρου από εμπόδια. Ο συνδυασμός της τεχνολογίας softswitch και του 802.16 ως λύση ασύρματης μετάδοσης τελευταίου μιλίου δημιούργησε μια υποσχόμενη εναλλακτική των PSTN δικτύων για φωνητικές υπηρεσίες. Αν ληφθεί υπόψιν η ικανότητα του προτύπου 802.16 για μετάδοση της τάξης των 70 Mbps σε αποστάσεις πάνω από 30 μίλια για ζεύξης σημείου προς σημείο(Point-to-point), γίνεται αντιληπτό αμέσως ότι το WiMAX μπορεί να χρησιμεύσει ως μια εναλλακτική σε δίκτυα κορμού. Ο συνδυασμός απόδοσης, απαιτούμενης ισχύος, εύρους ζώνης και ευελιξίας δίνει στο 802.16 κάποια πλεονεκτήματα έναντι ανταγωνιστικών τεχνολογιών, όπως το 802.11 και το 3G για το οποίο θα γίνει αναφορά στο κεφάλαιο 5.

Το WiMAX Forum ιδρύθηκε τον Ιούνιο του 2001 με στόχο τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας μεταξύ προϊόντων διαφορετικών προμηθευτών. Αυτό σε συνδυασμό με την ομάδα εργασίας 802.16 της IEEE και κάποιους ακόμη, βοήθησαν στη διάδοση του WiMAX τραβώντας το ενδιαφέρον διαφόρων κατασκευαστών. [19]

## 4.2 Το πρότυπο 802.16(WiMAX)

Το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) είναι μια τεχνολογία που λειτουργεί στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων και παρέχει ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση όπως προβλέπετε από το πρότυπο IEEE 802.16. Θεωρητικά μπορεί να υποστηρίξει μετάδοση δεδομένων ακόμη και σε αποστάσεις των 50 χιλιομέτρων και με ταχύτητες μετάδοσης μέχρι 70Mbps. Το WiMAX μπορεί να λειτουργεί ως γέφυρα για τη διασύνδεση Ψηφιακών Γραμμών(DSL) και UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Υποστηρίζει, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, συνδέσεις σημείου προς πολλαπλά σημεία (PMP). Η βασική ιδέα που οδήγησε και στη δημιουργία του είναι η αντικατάσταση κάποιων ευρυζωνικών καλωδιακών δικτύων, όπως το DSL, μια δράση που θα μείωνε κατά πολύ το κόστος συντήρησης και θα επέτρεπε μεγαλύτερη ευελιξία στο σύστημα. Το WiMAX έχει καθιερωθεί πλέον ως μια ονομασία που αναφέρεται σε ένα σύνολο πολλών εκδόσεων του προτύπου 802.16 της IEEE. [20]

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικότερα στοιχεία που χαρακτηρίζουν κάθε μια από τις εκδόσεις του προτύπου.

- ❖ **802.16** : Εγκρίθηκε το 2001 από το WiMAX Forum και την IEEE και αποτελεί το πρώτο από τη σειρά των προτύπων για το 802.16. Λειτουργούσε σε ζώνη συχνοτήτων από 10GHz έως 66GHz και προέβλεπε LOS ζεύξεις. Είχε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και ευρεία κάλυψη. Βασικό αρνητικό χαρακτηριστικό του προτύπου ήταν η αδυναμία λειτουργίας σε NLOS περιβάλλον με πολλά εμπόδια.
- ❖ **802.16c** : Εγκρίθηκε το 2002 επίσημα από την IEEE 802 και αποτελεί ένα συμπλήρωμα του προτύπου IEEE 802.16. Το πρότυπο ασχολείται με τη συμβατότητα των συσκευών στην ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 10GHz και 66GHz, ενώ κύριο μέλημα είναι η επίτευξη λειτουργίας σε τέτοια επίπεδα συχνοτήτων.
- ❖ **802.16a** : Ισχύει από τον Ιανουάριο του 2003 και λειτουργεί στη περιοχή συχνοτήτων των 2GHz έως 11GHz για NLOS ζεύξεις και 10GHz έως 66GHz για LOS ζεύξεις. Η κάτω ζώνη (2-11GHz) αποτελεί μια πολύ καλή λύση για σύνδεση μικρών αποστάσεων, ενώ η άνω ζώνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί άνετα και σε μεγάλες αποστάσεις. Το πρότυπο αυτό προσφέρει ταχύτητες έως 70Mbps λαμβάνοντας υπόψιν ένα εύρος ζώνης καναλιού της τάξης των 20MHz. Η θεωρητική εμβέλεια κάλυψης είναι στα 50km, όπως ήταν και στην πρώτη έκδοση του προτύπου.
- ❖ **802.16d** : Το πρότυπο επικυρώθηκε στις 24 Ιουνίου του 2004 και παρουσιάστηκε ως βελτίωση των προτύπων IEEE 802.16a και 802.16. Επικεντρώνεται κυρίως στη επίτευξη της ασύρματης ζεύξης. Είναι γνωστό ως 802.16-2004,λειτουργεί στη ζώνη 2GHz έως 11GHz και προβλέπει μετάδοση πληροφορίας για κινούμενους χρήστες, αλλά είναι η απόδοση είναι εξαιρετικά χαμηλή. Έχει θεωρητικά επίπεδα για διάδοση σε NLOS περιβάλλον με ταχύτητες 70Mbps και μέγιστο εύρος 50km.
- ❖ **802.16e** : Αυτή η έκδοση του προτύπου IEEE 802.16 είναι γνωστή και ως mobile Wireless MAN. Επιτρέπει σε χρήστες κινητών συσκευών να συνδεθούν με σταθμούς

βάσης και να απολαμβάνουν υπηρεσίες διαδικτύου. Υποστηρίζει κινητικότητα χρηστών σε ταχύτητες έως και 120 km/h για τη μετάδοση δεδομένων χωρίς σφάλματα, ενώ θεωρητική μέγιστη απόδοση ρυθμού μετάδοσης είναι τα 15Mbps. Το πρότυπο αυτό επιτρέπει την επικάλυψη μεταξύ περιοχών και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ σταθερών και κινητών συνδέσεων στο δίκτυο κορμού. Δίνει, τέλος, τη δυνατότητα σε χρήστες κινητών συσκευών να μεταβαίνουν αυτόματα από τον ένα σταθμό στον άλλο χωρίς απώλεια σύνδεσης.

- ❖ **802.16f** : Ορίζει τον τρόπο που θα επιτυγχάνεται ασύρματη ευρυζωνική σύνδεση τόσο μεταξύ του σταθμού βάσης(BS) και σταθερών χρηστών, όσο και με κινούμενους χρήστες(SS). Το πρότυπο παρουσιάζει ένα μοντέλο ασύρματης σύνδεσης, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται διαχείριση του δικτύου και των τερματικών χρηστών, αλλά και των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και της ποιότητας υπηρεσιών(QoS) μεταξύ αυτών. Το σύστημα διαχείρισης βασίζεται σε πρωτόκολλα που επιτρέπουν την απομακρυσμένη διαχείριση συσκευών του δικτύου, γεγονός που είναι αρνητικό από πλευρά ασφαλείας και θετικό από πλευρά ευελιξίας και εξοικονόμησης πόρων.
- ❖ **802.16g** : είναι σχεδιασμένο να αντιμετωπίσει προβλήματα που εμφανίζονται στις διαδικασίες διαχείρισης και τον έλεγχο των διεπαφών, ώστε να επιτυγχάνεται η διαλειτουργικότητα των εμπορικών προϊόντων προσωπικής χρήσης και των υπόλοιπων στοιχείων του δικτύου. Δίνει επίσης κάποιες βελτιώσεις σχετικά με τον έλεγχο της κινητικότητας και την αποτελεσματικότερη διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων.
- ❖ **802.16m** : Ισχύει από το 2009 και αποτελεί μια επιτυχημένη προσπάθεια συνδυασμού του 802.16-2004 ,που χρησιμοποιείται για σταθερούς χρήστες, με το 802.16e, που χρησιμοποιείται για κινούμενους χρήστες, με στόχο να εξασφαλιστεί η συμβατότητα μεταξύ των δύο συστημάτων. Οι θεωρητικές ταχύτητες που προσφέρονται από αυτήν την έκδοση φτάνουν τα 100Mbps για κινούμενους χρήστες και 1Gbps όταν ο συνδρομητής είναι σταθερός. Το 802.16m μπορεί να λειτουργήσει στην ζώνη συχνοτήτων των 6GHz, ενώ παράλληλα έχει δυνατότητα χρήσης της τεχνολογίας πολλών εισόδων - πολλών εξόδων(MIMO), αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία της ζεύξης και μειώνοντας το απαιτούμενο εύρος ζώνης.

#### 4.3 Αρχιτεκτονική δικτύου WiMAX

Τα βασικότερα στοιχεία σε μια τοπολογία δικτύου WiMAX είναι ο σταθμός βάσης(BS) και ο τερματικός σταθμός ή συσκευή χρήστη(SS). Είναι απαραίτητη η ύπαρξη τουλάχιστον ενός σταθμού βάσης, ενώ μπορούν να εξυπηρετούνται από αυτόν ταυτόχρονα πολλές διαφορετικές τερματικές συσκευές. Διακρίνονται δύο είδη τοπολογιών : σημείο προς πολλά σημεία(PMP) και τοπολογίες πλέγματος(mesh). Σε τοπολογίες σημείο προς πολλαπλά σημεία, το δίκτυο λειτουργεί αντίστοιχα με το γνωστό και ευρέως διαδεδομένο δίκτυο WLAN 802.11. Υπάρχει δηλαδή ένας σταθμός βάσης με τον οποίο επικοινωνούν όλες οι συσκευές χρηστών και προσπαθούν να δεσμεύσουν εύρος ζώνης από το σταθμό βάσης για να συνδεθούν και να είναι σε

θέση να στείλουν και να λάβουν δεδομένα. Πράγματι αυτή η τοπολογία φαίνεται εκ πρώτης όψεως πανομοιότυπη με την τοπολογία δικτύων του 802.11. Η ειδοποιός διαφορά ωστόσο έγκειται στο γεγονός ότι το 802.16 παρέχει πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια κάλυψης σε σχέση με το 802.11, δίνοντάς της ένα σοβαρό πλεονέκτημα έναντι των ανταγωνιστικών πρωτοκόλλων. Η δεύτερη τοπολογία σε ένα δίκτυο WiMAX είναι η τοπολογία πλέγματος. Σε αυτή κάθε σταθμός (είτε βάσης είτε τερματικός) είναι και ένας κόμβος και για την επικοινωνία μεταξύ των σταθμών δεν είναι αναγκαία η μεσολάβηση του σταθμού βάσης. Με αυτό τον τρόπο μπορεί ένα δίκτυο να διαχειρίζεται μεγάλο όγκο δεδομένα πολύ αποτελεσματικά αφού δε χρειάζεται όλα τα δεδομένα να περάσουν από κάθε κόμβο του δικτύου για να φτάσουν στο προορισμό τους και έτσι αποσυμφορίζεται το δίκτυο. Η αποσυμφόρηση επιτυγχάνεται και με τη δημιουργία πλέγματος σταθμών βάσης, οι οποίοι μοιράζονται το φόρτο εργασίας για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Η συγκεκριμένη τοπολογία είναι ιδιαίτερα εξυπηρετική σε περιπτώσεις στις οποίες δεν υπάρχουν οι οικονομικοί πόροι για την εγκατάσταση πολλών σταθμών βάσης ή οι ζεύξεις με κάποιους τερματικούς σταθμούς γίνονται σε περιβάλλον NLoS. Τότε βάσει του πρωτοκόλλου και σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, οι σταθμοί που αδυνατούν να επικοινωνήσουν απευθείας με ένα συγκεκριμένο σταθμό βάσης, χρησιμοποιούν κάποιο ενδιάμεσο κόμβο(σταθμό βάσης ή συσκευή χρήστη), ο οποίος μπορεί να συνδεθεί με τον επιθυμητό σταθμό, και έτσι μέσω αυτού του ενδιάμεσου κόμβου, να μεταδώσει δεδομένα προς το προορισμό. Η μετάδοση δεδομένων πραγματοποιείται τόσο από τους σταθμούς βάσης προς τους τερματικούς σταθμούς, ζεύξη που ονομάζεται καθοδική (downlink), όσο και από τις συσκευές των χρηστών προς τους σταθμούς βάσης, και σε αυτή την περίπτωση η ζεύξη ονομάζεται ανοδική (uplink).

#### 4.4 Στοιβά πρωτοκόλλων WiMAX

##### 4.4.1 Μοντέλο OSI

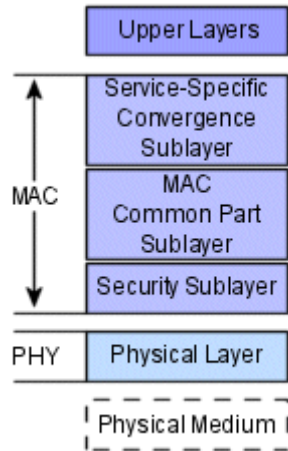
Το Μοντέλο OSI αναπτύχθηκε από το Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO) το 1978. Ο οργανισμός επέλεξε να δημιουργήσει ένα μοντέλο επτά στρωμάτων. Το μοντέλο OSI χαρακτηρίζει ένα πλαίσιο δικτύωσης στο οποίο τα πρωτόκολλα μπορούν να υπάγονται σε ένα από τα επτά στρώματα. Ο έλεγχος περνά από το ένα στρώμα(layer) στο επόμενο του, σε ένα σταθμός που λειτουργεί με την αρχιτεκτονική του μοντέλου OSI, αρχίζοντας από το επίπεδο εφαρμογών και συνεχίζοντας προς τα κάτω μέχρι να φτάσει στο κατώτερο στρώμα. Από εκεί μέσω ενός καναλιού γίνεται μετάδοση στον επόμενο σταθμό όπου εκτελείται η αντίστροφη διαδικασία ελέγχου, μέχρι να φτάσει στο επίπεδο εφαρμογών. Τα επτά στρώματα του μοντέλου OSI μπορούν να χωριστούν σε δύο υποομάδες: αυτή των εφαρμογών και μια ακόμη της μεταφοράς. Η ομάδα εφαρμογών ενσωματώνει τα στρώματα εφαρμογής, παρουσίασης και συνεδρίας, ενώ η ομάδα μεταφοράς ενσωματώνει τα στρώματα μεταφοράς, δικτύου, σύνδεσης δεδομένων και το φυσικό στρώμα, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Στρώματα μοντέλου OSI	Ομάδες επιπέδων
Εφαρμογής(application)	Ομάδα Εφαρμογών(application)
Παρουσίασης(presentation)	
Συνεδρίας(session)	
Μεταφοράς(transport)	Ομάδα Μεταφοράς(Transport)
Δικτύου(network)	
Δεδομένων(data link)	
Φυσικό(physical)	

*Πίνακας 4. 1 Ομάδες Επιπέδων Μοντέλου OSI*

Το Μοντέλο OSI λειτουργεί με ιεραρχικό τρόπο, αναθέτοντας καθήκοντα σε κάθε ένα από τα επτά στρώματα. Κάθε στρώμα είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των καθηκόντων που του έχουν ανατεθεί και τη μεταφορά των ολοκληρωμένων εργασιών στο επόμενο στρώμα για περαιτέρω επεξεργασία. Ένα πολύ μεγάλο πλήθος πρωτοκόλλων σχεδιάζονται με βάση το μηχανισμό εργασίας του μοντέλου OSI, το οποίο δεν ασκεί ελέγχους στο τρόπο δικτύωσης, γεγονός που το κάνει να μην είναι δεσμευτικό ως προς αυτόν. Δίνει μονάχα ένα θεωρητικό πλαίσιο για να μπορούν να κατανοηθούν και να αναλυθούν καλύτερα οι πολύπλοκες λειτουργίες που επιτελούνται σε ένα δίκτυο.

Οι υπηρεσίες και τα πρωτόκολλα που ορίζονται στο πρότυπο IEEE 802 αφορούν τα δύο χαμηλότερα στρώματα (Data Link και physical) του μοντέλου OSI των επτά στρωμάτων. Το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων(data link layer) διακρίνεται σε δύο υποεπίπεδα που ονομάζονται : επίπεδο Ελέγχου Λογικής Ζεύξης (LLC) και επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC). Το επίπεδο MAC χωρίζεται με τη σειρά του σε τρία υποεπίπεδα, το υποεπίπεδο σύγκλισης ειδικών υπηρεσιών(CS) που υποστηρίζει τη μετατροπή των δεδομένων του εξωτερικού δικτύου, το κοινό τμήμα MAC (CPS), όπου εκτελούνται βασικές λειτουργίες του επιπέδου και το υποεπίπεδο ασφαλείας, το οποίο παρέχει δυνατότητα ελέγχου ταυτότητας και ασφαλούς ανταλλαγής κωδικών λέξεων κλειδιών και κρυπτογράφησης. Για το PHY layer υπάρχουν αρκετά χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται ανάλογα με το εύρος της συχνότητας και το είδος της εφαρμογής. [17]



Εικόνα 4. 1 Στοιβή πρωτοκόλλων του προτύπου IEEE 802.16

#### 4.4.2 Physical Layer

Το φυσικό στρώμα είναι το χαμηλότερο από τα στρώματα του μοντέλου OSI. Ασχολείται με τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων σε μορφή σήματος από μια συσκευή του δικτύου. Σε αυτό περιλαμβάνονται ηλεκτρικές, οπτικές, μηχανικές και λειτουργικές διασυνδέσεις με το φυσικό μέσο μετάδοσης. Σε αυτό ελέγχονται επίσης ο τρόπος μετάδοσης και η μορφή της τοπολογίας του δικτύου(π.χ. μορφή αστέρα, μορφή δακτυλίου και μορφή πλέγματος).

Είθισται η προδιαγραφή του φυσικού στρώματος για ηλεκτρομαγνητικά κύματα συχνοτήτων 10 έως 66GHz να ονομάζεται WirelessMAN μονού φορέα (SC) υποστηριζόμενο με διπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDD) ή διπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDD). Χρησιμοποιείται για διάδοση σε LOS περιβάλλον, όπου μπορεί να φτάσει σε μεγάλες αποστάσεις (αρκετών χιλιομέτρων), είτε ακτινοβολώντας(για κεραία εκπομπής), είτε λαμβάνοντας(για κεραία λήψης) μια δέσμη με τη βοήθεια μιας ειδικά σχεδιασμένης κεραίας δέσμης. Για την υποστήριξη διάδοσης σε NLOS περιβάλλον στη τη ζώνη των 2 έως 11GHz, κρίθηκε αναγκαία η εισαγωγή τριών νέων προδιαγραφών για το φυσικό επίπεδο.

- WirelessMAN-Sca : χρησιμοποιεί ένα φορέα για λήψη ή αποστολή διαμορφωμένου σήματος που μεταδίδεται μέσω αέρα (εφαρμόζεται στη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 2 και 11GHz).
- WirelessMAN-OFDM : Ένα σύστημα ορθογωνικής πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας που αποτελείται από 256 φορείς. Ταυτόχρονη πρόσβαση πολλών διαφορετικών τερματικών σταθμών(SS) επιτυγχάνεται με σχήμα πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (TDMA).
- WirelessMAN-OFDMA : Ένα σύστημα που αποτελείται από 2048 φορείς και διαμόρφωση OFDM. Ένα υποσύνολο των φορέων έχει αποδοθεί σε ένα δέκτη ώστε να μπορεί να παρέχεται πολλαπλή πρόσβαση, και κατά συνέπεια αδιάκοπη παροχή υπηρεσιών.



Η διαφορά μεταξύ του WirelessMAN-SCa και του WirelessMAN-OFDM είναι ότι το OFDM παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην επίδραση απωλειών λόγω πολλαπλών διαδρομών. Αυτό συμβαίνει διότι επιτρέπει σε γειτονικούς υποφορείς (subcarriers) σταθμών να επικαλύπτονται, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερη αποδοτικότητα διαχείρισης του εύρους ζώνης. Αντίστοιχα, οι διαφορές μεταξύ του OFDM και OFDMA είναι μπορούν να διακριθούν σε δύο τμήματα : διαφορές στο χρόνο και διαφορές στη συχνότητα. Η συνεργασία μεταξύ των δύο αυτών παραμέτρων επιτρέπει την πρόσβαση από πολλά σημεία με την κατανομή της πληροφορίας στα υποκανάλια των δεκτών. Το OFDM εφαρμόζεται για διάδοση σε NLOS περιβάλλοντα, λόγω της απλότητας της διαδικασίας εξισορρόπησης που εμφανίζει, τη χρήση πολλαπλών φέροντων σημάτων και τη φυσική του ανοσία σε διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών. Το WirelessMAN-OFDM είναι πιο δημοφιλές στην αγορά των κατασκευαστών εξαιτίας του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) και της λιγότερο αυστηρής απαίτησης για συγχρονισμό συχνότητας σε σύγκριση με WirelessMAN-OFDMA. Ωστόσο, μετά την είσοδο του WirelessMAN-OFDMA στην αγορά, οι καταναλωτές φάνηκε να το προτιμούν, λόγω της απόδοσης σε εύρους ζώνης. Λειτουργεί με τη διανομή υποδιαύλων σε ομάδες υποφορέων και την αντιστοίχιση τους σε κάθε χρήστη, έτσι ώστε να παρέχεται η καλύτερη δυνατή απόδοση και η μείωση των παρεμβολών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά διάδοσης και την τοποθεσία του κάθε χρήστη.

Άλλα χαρακτηριστικά του φυσικού στρώματος είναι :

- συστήματα προσαρμοστικών κεραιών (AAS) : εγκαθίστανται στα άκρα του δέκτη και του πομπό με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού. Αυτό οφείλεται στον σχεδιασμό της δέσμης εστίασης των κεραιών βάσης προς τους τερματικούς σταθμούς, προκειμένου να επιτυγχάνεται επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων στο ίδιο κελί. Οι προσαρμοστικές κεραιές μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της απαιτούμενης εκπεμπόμενης ισχύος και αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου.
- Προσαρμοστική διαμόρφωση : Υπάρχουν πολλά διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης τόσο και για την ανοδική (uplink) όσο και για την καθοδική (downlink) ζεύξη. Κάποια από αυτά είναι : διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (BPSK, QPSK) ή ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους (16QAM, 64QAM και 256QAM), που συνδυάζονται με διαφορετικούς ρυθμούς κωδικοποίησης (2/3 , 3/4, 3/5). Παρέχει ένα ευρύ φάσμα επιλογών σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που μεταβάλλονται ανάλογα με τις συνθήκες διάδοσης του καναλιού.
- χωροχρονική κωδικοποίηση : εφαρμόζεται σε καθοδικές ζεύξεις για την παροχή χωρικής διακριτότητας μεταδιδόμενου σήματος. Η τεχνική στηρίζεται στην ύπαρξη δύο κεραιών εκπομπής στο σταθμό βάσης και μια κεραία λήψης σε κάθε τερματικό σταθμό(χρήστη).

#### 4.4.2.1 Δομή πλαισίου

Τα υποπλαίσια καθοδικής και ανοδικής ζεύξης, τα οποίες συνθέτουν ένα πλαίσιο, μεταδίδονται με τη χρήση τεχνικών TDD και FDD. Στην FDD τεχνική, η καθοδική και η

ανοδική ζεύξη χρησιμοποιούν διαφορετικές κεντρικές συχνότητες, ενώ στην TDD τεχνική, οι δύο ζεύξεις(uplink και downlink) μοιράζονται την ίδια συχνότητα, αλλά μεταδίδονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η FDD τεχνική χρησιμοποιείται συνήθως σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2ης και 3ης γενιάς. Το WiMAX υποστηρίζει full-duplex FDD και half-duplex FDD. Η διαφορά είναι ότι σε full-duplex FDD μια τερματική συσκευή χρήστη μπορεί να μεταδώσει και να λάβει ταυτόχρονα, ενώ σε half-duplex FDD μπορεί μόνο να μεταδίδει ή να λαμβάνει σε δεδομένο χρονικό διάστημα. Η TDD τεχνική απαιτεί μόνο ένα κανάλι για τη μετάδοση των υποπλαισίων προς την κάτω και την άνω ζεύξη σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές, με αποτέλεσμα να εμφανίζει μεγαλύτερη φασματική απόδοση σε σχέση με την FDD. Μπορεί επίσης να ρυθμιστεί η αναλογία κατερχόμενης(downlink) προς ανερχόμενης(uplink) ζεύξης, ενώ παράλληλα παρουσιάζει ευελιξία στο χειρισμό, τόσο στην συμμετρική όσο και στην ασύμμετρη ευρυζωνική κυκλοφορία. [17]

#### 4.4.2.2 Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση

Το φυσικό επίπεδο του WiMAX υποστηρίζει προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση(AMC) για τη ρύθμιση του σχήματος διαμόρφωσης σήματος (SMC), ανάλογα με το λόγο σήματος προς θόρυβο(SNR) της ασύρματης ζεύξης. Όταν οι συνθήκες του διαύλου το επιτρέπουν, χρησιμοποιείται το καλύτερο δυνατό σχήμα διαμόρφωσης, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο το ρυθμό μετάδοσης. Όταν ο λόγος SNR μειώνεται, λόγω κακών συνθηκών διαύλου, το σχήμα διαμόρφωσης αλλάζει σε ένα με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης, το οποίο όμως διατηρεί τη σταθερότητα και την ποιότητα της σύνδεσης. Η AMC αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό στο WiMAX για τη διατήρηση της ποιότητας μετάδοσης. Παράμετροι μετάδοσης, όπως το σχήμα διαμόρφωσης, η κωδικοποίηση του καναλιού και η διόρθωση λάθους κατά την προώθηση(FEC), μπορούν να αλλάξουν σε κάθε τερματικό χρήστη(SS), ενώ επιτρέπει στους σταθμούς βάσης (BS) να μειώσουν το ρυθμό μετάδοσης προς όφελος της εμβέλειας κάλυψης.

#### 4.4.3 MAC Layer

Το επίπεδο MAC υποστηρίζει τόσο LOS όσο και NLOS εφαρμογές με χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης TDMA. Αυτή αναθέτει στους τερματικούς χρήστες χρονικά περιθώρια πρόσβασης στο ανοδικό κανάλι(uplink channel) βασισμένη σε ένα μηχανισμό ζήτησης και εδραίωσης. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής δεσμεύονται πόροι και καθορίζονται παράμετροι σχετικές με την ποιότητα υπηρεσιών(QoS). Το επίπεδο MAC σχεδιάστηκε από την έκδοση 802.16-2004 να υποστηρίζει κάθε υπάρχον και επερχόμενο πρωτόκολλο ανώτερου επιπέδου.

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο τμήμα του κεφαλαίου, το επίπεδο χωρίζεται σε τρία υποεπίπεδα, τα οποία είναι : το υποεπίπεδο σύγκλισης ειδικών υπηρεσιών(CS),το κοινό τμήμα MAC (CPS),και το υποεπίπεδο ασφαλείας(PS).

##### 4.4.3.1 Υποεπίπεδο σύγκλισης ειδικών υπηρεσιών(CS)

Το υποεπίπεδο σύγκλισης ειδικών υπηρεσιών και οργανώνει μονάδες δεδομένων υπηρεσιών(SDUs) στην κατάλληλη σύνδεση MAC χρησιμοποιώντας αναγνωριστικά

σύνδεσης(CID), ώστε να δεσμεύσει ή να ενεργοποιήσει πόρους για τη ρύθμιση της QoS και του αποδιδόμενου εύρους ζώνης. Το υποεπίπεδο υποστηρίζει δύο εφαρμογές, ATM και διαχείριση πακέτων ειδικών υπηρεσιών, όπως πακέτα IPv4, IPv6 και Ethernet). Επιπλέον υπάρχει δυνατότητα συμπίεσης και ανακατασκευής της επικεφαλίδας των δεδομένων των πακέτων(PHS).

#### 4.4.3.2 Κοινό τμήμα MAC (CPS)

Αυτό το υπόστρωμα είναι αρμόδιο για την διαχείριση των κόμβων του δικτύου και των συνδέσεων τους, την κατανομή του εύρους ζώνης στους αιτούντες, την προετοιμασία για την ένταξη νέων τερματικών συσκευών στο δίκτυο και την ποιότητα παροχής υπηρεσιών QoS.

Η διεύθυνση MAC μήκους 48bit αποτελεί το αναγνωριστικό σε δίκτυα PMP και πλέγματος. Το παραπάνω όμως ισχύει μόνο κατά την αρχική σύνδεση, κατά την οποία ελέγχεται η ταυτότητα του χρήστη. Η διεύθυνση έπειτα αντικαθίσταται με μία άλλη μήκους 16bit και εγκαθιδρύεται σύνδεση μεταξύ σταθμού συνδρομητή(SS) και σταθμού βάσης(BS) στην οποία έχει πραγματοποιηθεί η ταυτοποίηση. Κατά τη σύνδεση των συνδρομητικών σταθμών(SS) μπορεί να επιλεγεί το επίπεδο QoS που απαιτείται από την εφαρμογή. Υπάρχουν τρία διαφορετικά επίπεδα QoS. Το πρώτο αφορά επείγουσα μηνύματα, το δεύτερο λιγότερο κρίσιμα μηνύματα και παρουσιάζει μεγαλύτερη ελαστικότητα στην χρονική καθυστέρηση και το τρίτο την ανεκτικότητα καθυστέρησης σε υπηρεσίες όπως DHCP ή SNMP.

#### 4.4.3.3 Υποεπίπεδο ασφαλείας(PS)

Αυτό το στρώμα είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει στους συνδρομητές ασφαλή κρυπτογραφημένη σύνδεση μεταξύ SS και BS για τη μετάδοση δεδομένων. Η αρχιτεκτονική ασφαλείας του επιπέδου περιλαμβάνει δύο πρωτόκολλα. Ένα πρωτόκολλο για την κρυπτογράφηση των δεδομένων και άλλο ένα πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού(PKM). Το PKM είναι υπεύθυνο για την ασφαλή ανταλλαγή κλειδιού μεταξύ SS και BS. Τα ψηφιακά πιστοποιητικά χρησιμοποιούνται για τη γνωστοποίηση του δημόσιου κλειδιού και την ανταλλαγή πληροφοριών προκειμένου να είναι επιτυχής η RSA κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση. Το RSA κλειδί (ιδιωτικό και δημόσιο) δημιουργείται είτε από τον κατασκευαστή (πιστοποιητικά X.509) ή από τον συνδρομητικό σταθμό(SS), ακολουθώντας έναν αλγόριθμο δημιουργίας ζευγών δημόσιου και ιδιωτικού κλειδιού. Ο συνδρομητής(SS) χρησιμοποιεί το PKM προκειμένου να μπορέσει να μοιραστεί τα στοιχεία του(δημόσιο κλειδί) με το σταθμό βάσης(BS).

Η διαδικασία ταυτοποίησης χρηστών μπορεί να πραγματοποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα, επιτρέποντας σε νέους χρήστες να συνδεθούν με το δίκτυο. Κάθε SS που επιθυμεί να πιστοποιηθεί για να συνδεθεί με ένα BS, στέλνει το ψηφιακό του πιστοποιητικό, που αποτελείται από τη διεύθυνση MAC με το δημόσιο κλειδί. Ο BS στέλνει προς τον ενδιαφερόμενο SS ένα ειδικό κλειδί (Authorization-Key, AK) που σε συνδυασμό με το δημόσιο κλειδί του SS τα κρυπτογραφημένα μηνύματα που αποστέλλονται μεταξύ των δύο μπορούν να διαβαστούν. Έτσι, ο SS μπορεί να κρυπτογραφήσει τις πληροφορίες βάσει του AK και συνάμα αυτές να είναι

προσβάσιμες από τον BS. Η κρυπτογράφηση των δεδομένων επιτυγχάνεται είτε με το πρότυπο κρυπτογράφησης δεδομένων (DES) , είτε με το πρότυπο προηγμένης κρυπτογράφησης (AES).

#### 4.5 WiMAX QoS

Ο όρος QoS αναφέρεται στο σύνολο των παραμέτρων που καθορίζουν τις απαιτήσεις και το είδος υπηρεσιών σε ένα δίκτυο. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης, καθυστέρηση, δέσμευση εύρους ζώνης και μεταβάλλονται ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και του χρήστη.

Προσφέρεται δυνατότητα διαβάθμισης των υπηρεσιών σε συγκεκριμένους τύπους(ToS), όπου ουσιαστικά γίνεται αντιστοίχιση των εφαρμογών με κάποια βαρύτητα. Η διαβάθμιση βοηθάει στην αποδοτικότερη κατανομή των πόρων του συστήματος, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της συνολικής εμπειρίας του χρήστη. [21]

Από την έκδοση IEEE 802.16e του προτύπου, υπάρχουν πέντε βασικοί τύποι υπηρεσιών(ToS), μεταξύ των οποίων όμως μπορούν να παρεμβληθούν θεωρητικά και άλλοι, απλά καθορίζοντας συγκεκριμένες απαιτήσεις των παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Μια συσκευή WiMAX που έχει πιστοποιηθεί από το WiMAX Forum είναι σε θέση να υποστηρίξει ταυτόχρονα και τους πέντε βασικούς τύπους υπηρεσιών.

##### 4.5.1 Τύποι Υπηρεσιών(ToS)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι υπηρεσιών και δίνονται κάποια σημαντικά στοιχεία για τον κάθε ένα από αυτούς.

- Υπηρεσίες αυτόκλητης χορήγησης (UGS) : χρησιμοποιείται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου που απαιτούν σταθερό ρυθμό μετάδοσης σε τακτά χρονικά διαστήματα και εγγυημένη υψηλή διεκπεραιωτική ικανότητα(throughput), μικρή καθυστέρηση(delay) και μικρή μεταβλητότητα καθυστέρησης(jitter). Η πληροφορία οργανώνεται σε πακέτα δεδομένων σταθερού μήκους και έπειτα αποστέλλεται μέσω του διαύλου επικοινωνίας. Λόγω των αυστηρών προδιαγραφών που χαρακτηρίζουν τις εφαρμογές πραγματικού χρόνου και σε μια προσπάθεια να μειωθεί κατά το δυνατόν το μέγεθος της επικεφαλίδας των πακέτων, σε αυτό τον τύπο υπηρεσιών δεν ανταλλάσσονται μηνύματα αιτήσεων από το συνδρομητή προς το σταθμό βάσης, αλλά εξυπηρετείται άμεσα.
- Υπηρεσίες μετάδοσης πραγματικού χρόνου(rtPS) : ο συγκεκριμένος τύπος χρησιμοποιείται επίσης για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Διαφοροποιείται με τον προηγούμενο τύπο στο γεγονός ότι τα πακέτα που αποστέλλονται είναι μεταβλητού μήκους. Ο συνδρομητικός σταθμός(SS) κάνει αίτηση κάθε φορά προς τον σταθμό βάσης, ώστε να δεσμευτεί για αυτόν ένα εύρος ζώνης και παράλληλα πληροφορεί τον σταθμό βάσης σχετικά με το μέγεθος που θα έχουν τα πακέτα που πρόκειται να στείλει. Όταν τελειώσει η αποστολή των πακέτων, δηλαδή όταν τελειώσει η συνεδρία(session), ο

σταθμός βάσης αποδεσμεύει το εύρος ζώνης και το διαθέτει σε άλλους χρήστες, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα, από πλευράς δικτύου, σε σχέση με τον τύπο UGS, στον οποίο το εύρος ζώνης δεσμεύεται συνεχώς για ένα χρήστη. Η μεταβλητότητα του μεγέθους των πακέτων αποτελεί άλλο ένα πλεονέκτημα αυτού του τύπου, καθώς δεν χρειάζεται να συμπληρωθεί κάποιο συγκεκριμένο μήκος για να σταλούν τα δεδομένα.

- Υπηρεσίες μετάδοσης μη πραγματικού χρόνου(nrtPS) : αυτός ο τύπος προτιμάται σε εφαρμογές που δεν έχουν απαιτήσεις μικρής καθυστέρησης, παρά μόνο υψηλής διεκπεραιωτικής ικανότητας, και αυτό μόνο όταν επιθυμείτε η αποστολή δεδομένων. Το σχήμα λειτουργίας σε αυτό τον τύπο στηρίζεται στην αποστολή ερωτήσεων από τον σταθμό βάσης(BS), αρχικά προς κάθε συνδρομητικό σταθμό(SS). Ο SS απαντάει στο ερώτημα με τις ανάγκες δέσμευσης εύρους ζώνης για την αποστολή των πακέτων, ο σταθμός βάσης λαμβάνει τα στοιχεία απαιτήσεων και κατανέμει το εύρος ζώνης μέχρι το πέρας της συνεδρίας οπότε και ελευθερώνεται ξανά. Αν ένας SS δεν απαντήσει σε πάνω από ένα αριθμό ερωτήσεων, τότε τοποθετείται από τον BS σε μια λίστα με άλλους μη αποκρινόμενους SS, και δεν αποστέλλεται ξανά προσωπική ερώτηση από τον BS. Ο BS αποστέλλει ερώτημα προς ολόκληρη τη λίστα των ανενεργών SS, όπου πλέον υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ των σταθμών προκειμένου να συνδεθούν και αποστείλουν δεδομένα.
- Υπηρεσίες ενισχυμένης μετάδοσης πραγματικού χρόνου(ErtPS) : σχεδιάστηκε και συμπεριλήφθηκε στη έκδοση 802.16e του προτύπου της IEEE. Χαρακτηρίζεται από μεταβλητό μέγεθος πακέτου και εξυπηρετεί εφαρμογές πραγματικού χρόνου, αλλά περιοδικής μορφής. Δηλαδή, να μην χρειάζεται εγγυημένα χαμηλές τιμές delay και jitter και υψηλό throughput, αλλά μονάχα όταν μεταδίδει ή δέχεται. Είναι ιδανικό για εφαρμογές που εκτελούνται κατά παραγγελία(π.χ. Voice on demand), στις οποίες υπάρχουν νεκρά διαστήματα στα οποία δε χρειάζεται να παραμένει δεσμευμένο το εύρος ζώνης, όπως επίσης δεν χρειάζεται να είναι σταθερό το εύρος ζώνης που δεσμεύεται λόγω της μεταβλητότητας των πακέτων.
- Υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας (BE) : σε υπηρεσίες τέτοιου τύπου δεν υπάρχει καμία εγγύηση από το δίκτυο προς τους χρήστες. Όλοι οι χρήστες που εκτελούν εφαρμογές χαρακτηριζόμενες από υπηρεσίες αυτού του τύπου(π.χ. Web surfing) συναγωνίζονται για να χρησιμοποιήσουν τους πόρους του δικτύου, που έχουν μείνει ελεύθεροι μετά την εξυπηρέτηση όλων των προηγούμενων τύπων. Πρόκειται στην ουσία για εφαρμογές που δεν έχουν απαιτήσεις πραγματικού χρόνου, ούτε ενδιαφέρει (θεωρητικά) η χαμηλή διεκπεραιωτική ικανότητα. Το μόνο που ενδιαφέρει είναι κάποια στιγμή να πραγματοποιηθούν, άσχετα με το αν ή το πότε θα γίνει αυτό.

#### 4.6 Ασφάλεια δικτύων WiMAX

Με την πάροδο των ετών και την εμπειρία που αποκομίστηκε από προϋπάρχουσες ασύρματες τεχνολογίες, από την πρώτη κιόλας έκδοση του προτύπου WiMAX είχαν οριστεί παράμετροι που εξασφάλιζαν τον έλεγχο της κίνησης στο δίκτυο για την παροχή ασφαλών υπηρεσιών. Το πρωτόκολλο προβλέπει προστασία της ασύρματης ζεύξης, μέσω αμοιβαίων

ταυτοποιήσεων τόσο από πλευράς σταθμού βάσης όσο και από πλευράς συνδρομητικού σταθμού.

Κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων ασύρματης μετάδοσης και για την εισαγωγή των παραμέτρων ασφαλείας, οι μηχανικοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψιν τους μια σειρά πιθανών κινδύνων που, οφείλουν να εξαλείψουν. Οι κίνδυνοι αυτοί μπορεί να είναι είτε άμεσοι είτε έμμεσοι. [22] Μερικοί από αυτούς παρουσιάζονται παρακάτω :

- Παρεμβολή 3<sup>ης</sup> συσκευής μεταξύ σταθμού βάσης και συνδρομητικού σταθμού με στόχο την απόσπαση πληροφοριών από τα μεταδιδόμενα δεδομένα. Μια συσκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει αλγόριθμους που εξαπατούν τον σταθμό βάσης με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ως ο πραγματικός συνδρομητικός σταθμός. Έτσι αποκτά πρόσβαση και υποκλέπτει μεταδιδόμενα δεδομένα.
- Λήψη μηνυμάτων από ανεπιθύμητους προορισμούς σε περιπτώσεις που τα μηνύματα δεν είναι κρυπτογραφημένα. Αν δεν προβλέπεται κρυπτογράφηση των μηνυμάτων που κυκλοφορούν στο δίκτυο, οποιοσδήποτε επιθυμεί, μπορεί με τη χρήση ενός κατάλληλου δέκτη που λειτουργεί στη μίαντα συχνοτήτων που εκπέμπει ο BS και ο SS, να παρακολουθεί πλήρως την κίνηση μεταξύ των δύο συνομιλητών.
- Εισχώρηση κακόβουλων χρηστών στο δίκτυο. Αν υποτεθεί ότι δεν υπάρχει υποχρέωση πιστοποίησης των χρηστών για να συνδεθούν στο δίκτυο, τότε μπορούν ανώνυμοι χρήστες να εισέλθουν και να χρησιμοποιήσουν υπηρεσίες που υποστηρίζονται από το δίκτυο. Εμφανίζεται τότε ο κίνδυνος χρήσης της ζεύξης για κακόβουλο σκοπό από χρήστη που δεν μπορεί να εντοπιστεί.
- Κλοπή ταυτότητας νόμιμων χρηστών. Αν κατορθώσει ένας κακόβουλος χρήστης να αποκτήσει πρόσβαση στα στοιχεία του πραγματικού χρήστη, τότε μπορεί να τα εκμεταλλευτεί προκειμένου να συνδεθεί με πλήρη πρόσβαση στο δίκτυο και να κινηθεί με την κλεμμένη ταυτότητα, γεγονός πολύ επικίνδυνο για το νόμιμο χρήστη.
- Έκθεση δικτύου σε ιούς. Εφόσον είναι τόσο απλή η χορήγηση πρόσβασης, όταν δεν υπάρχει ασφάλεια, ο κακόβουλος χρήστης μπορεί να εκθέσει ολόκληρο το δίκτυο σε ιούς που μεταδίδονται ελεύθερα και χωρίς έλεγχο μεταξύ σταθμών βάσης και τερματικός σταθμών. Μπορεί έπειτα, με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων να χρησιμοποιήσει τους συνδρομητικούς σταθμούς που έχουν εκτεθεί για να εκτελέσει παράνομες ενέργειες, όπως επιθέσεις άρνησης υπηρεσιών(DoS).
- Καταστροφή της μεταδιδόμενης πληροφορίας. Μέσω μιας πηγής θορύβου παράγονται πολύ υψηλής ισχύος σήματα που υπερκαλύπτουν την πληροφορία που μεταδίδεται μέσω του διαύλου. Με αυτό τον τρόπο ο σηματοθορυβικός λόγος μειώνεται δραστικά, γεγονός που οδηγεί σε διακοπή της ζεύξης και κατά συνέπεια αδυναμία εξυπηρέτησης συγκεκριμένων συνδρομητών, λόγω υψηλού αριθμού λαθών.

Γνωρίζοντας του κινδύνους είναι δυνατόν με κατάλληλες τεχνικές να μειωθεί δραστικά η πιθανότητα έκθεσης των συνδέσεων του δικτύου σε ανεπιθύμητες επιθέσεις. Από όσα

αναφέρθηκαν έως τώρα, μπορεί κανείς να αντιληφθεί πως η μείωση αυτή επιτυγχάνεται με τη θωράκιση της επικοινωνίας BS και SS.

#### 4.7 Εφαρμογές του WiMAX

Βάσει όσων αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια αναρωτάται κανείς σχετικά με τις εφαρμογές στις οποίες γίνεται χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Είναι γεγονός πως η τεχνολογία ξεκίνησε ως λύση για παροχής υπηρεσιών υψηλής ποιότητας τελευταίου μιλίου, αλλά με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για τις δυνατότητες της, τα οποία είναι πολύ ενθαρρυντικά, και την υποστήριξη των κατασκευαστών τηλεπικοινωνιακών προϊόντων, συνεχώς ανοίγονται νέοι ορίζοντες και πεδία εφαρμογών.

Η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί :

- Για τη διασύνδεση χρηστών (λύσεις τελευταίου μιλίου). Είναι η ο λόγος για τον οποίο δημιουργήθηκε η τεχνολογία και μπορούν να διακριθούν δύο περιπτώσεις. Παροχή υπηρεσιών σε χρήστες με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο WiMAX ή σύνδεση χρηστών στο δίκτυο WiMAX με χρήση ειδικά σχεδιασμένων δρομολογητών WLAN/WiMAX. Είναι ευνόητο πως η πρώτη περίπτωση απαιτεί από τους χρήστες να έχουν στην κατοχή τους ειδικές συσκευές που θα υποστηρίζουν το πρωτόκολλο, ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία, ενώ στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται αλλαγή του συμβατικού δρομολογητή με ένα που θα έχει μια διεπαφή ανταλλαγής δεδομένων WLAN με τον χρήστη και προώθηση των δεδομένων με χρήση WiMAX στο σταθμό βάσης και το αντίστροφο για τη λήψη. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε τόσο η πρώτη όσο και η δεύτερη περίπτωση ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του δικτύου.
- Ως εναλλακτική λύση σύνδεσης του κορμού του δικτύου με στόχο τη μείωση του κόστους εγκατάστασης ή για την παράλληλη σύνδεση με καλωδιακές γραμμές προς αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου. Στην ελληνική επικράτεια και ειδικά σε περιοχές όπου δεν είναι συμφέρουσα η σύνδεση με καλωδιακές γραμμές, αφού πρόκειται να εξυπηρετηθούν πολύ λίγοι χρήστες, η εναλλακτική διασύνδεσης μέσω ζεύξης WiMAX είναι ιδανική. Οι σταθμοί βάσεις WiMAX έχουν θεωρητική εμβέλεια κάλυψης 50km(για LoS ζεύξεις), οπότε με την εγκατάσταση κάποιων σταθμών σε στρατηγικές θέσεις, είναι δυνατόν να εξυπηρετηθεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός χρηστών με το ελάχιστο κόστος επένδυσης. Σε δίκτυα πόλεων επίσης, η χρήση της τεχνολογίας θα εισαχθεί σίγουρα στο μέλλον αφού, όπως μπορεί να καταλάβει κανείς με μια απλή παρατήρηση και πρόβλεψη, το υπάρχον δίκτυο δεν θα είναι σε θέση να υποστηρίξει τη ραγδαία αύξηση των απαιτήσεων των υπηρεσιών και θα είναι αναγκαία η εγκατάσταση νέων τρόπων δικτύωσης ή αναβάθμιση των συμβατικών(π.χ. VDSL). Η εγκατάσταση όμως νέων γραμμών είναι αρκετά δύσκολη τόσο από πλευράς δυσκολίας πραγματοποίησης έργων και εύρεσης κατάλληλων χώρων, όσο και από πλευράς δυσaráρεσκείας των πολιτών που δημιουργεί σχεδόν πάντα “κωλύματα”. Από την άλλη, η εγκατάσταση κάποιων σταθμών

βάσης, συνοδευόμενων από τον απαραίτητο εξοπλισμό, είναι αρκετά εύκολη και γρήγορη στη υλοποίηση. Παρέχει δε ευελιξία στη διαχείριση των δεδομένων και τη μετάδοση από κόμβο σε κόμβο(όπου κόμβοι οι σταθμοί βάσης), χωρίς να απαιτείται να περάσουν από όλους τους κόμβους. Έτσι με τη δημιουργία ενός ιστού από σταθμούς βάσης στον κορμό του δικτύου, είναι δυνατή η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων σε μικρό χρονικό διάστημα και με υψηλή αξιοπιστία.

- Σε μεγάλου μεγέθους εγκαταστάσεις ενός φορέα ή εταιρίας (π.χ. πανεπιστημιούπολη, Πολυτεχνειούπολη, βιομηχανία). Στην ουσία το WiMAX, επειδή ακριβώς πλεονεκτεί στην εμβέλεια κάλυψης σε σχέση με άλλες τεχνολογίες WLAN, μπορεί να παρέχει αδιάληπτη σύνδεση χρηστών σε μεγάλους χώρους εγκαταστάσεων, χωρίς να απαιτείται η εγκατάσταση δρομολογητών σε πολλά διαφορετικά σημεία, όπως γίνεται σε άλλες τεχνολογίες. Παρέχει αυξημένη ασφάλεια και καλύτερης ποιότητας υπηρεσίες, ενώ απαλλάσσει τους χρήστες από την ανάγκη επανασύνδεσης κάθε φορά που αλλάζουν χώρο κάλυψης ενός δρομολογητή.
- Σε εφαρμογές με ειδικές απαιτήσεις (χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη του WiGRID). Το WiGRID είναι μια ιδανική ασύρματη ευρυζωνική τεχνολογία επικοινωνιών, ειδικά σχεδιασμένη για εφαρμογές που αφορούν τα έξυπνα δίκτυα. Χρησιμοποιείται ήδη σε διάφορες εγκαταστάσεις ενέργειας ανά τον κόσμο, και με ζεύξεις WiMAX προσφέρει λύσεις, τόσο δικτύου κορμού όσο και από άκρο σε άκρο. Οι υπεύθυνοι μηχανικοί μπορούν να επιλέξουν αν θα χρησιμοποιήσουν το ήδη υπάρχον δίκτυο μέσω ενός άλλου παρόχου υπηρεσιών, για τη ανταλλαγή δεδομένων ενεργειακού τύπου, ή την εγκατάσταση ιδιωτικού δικτύου με χρήση του WiGRID, ενός νέου συνδυαστικού πρωτοκόλλου βασισμένο στο πρωτόκολλο της IEEE 802.16 και το Ethernet. Το νέο αυτό πρωτόκολλο σχεδιάστηκε από μια ομάδα εργασίας, αποτελούμενη από μηχανικούς εταιριών που παρέχουν υπηρεσίες στο χώρο των τηλεπικοινωνιών και είναι μέλη του WiMAX Forum Smart Energy Working Group. Κύριος στόχος αυτής της ομάδας είναι η εξυπηρέτηση των ειδικών απαιτήσεων των έξυπνων ενεργειακών δικτύων, διασφαλίζοντας τη διαλειτουργικότητα με το πρωτόκολλο WiMAX. Το WiMAX Forum προσφέρει πιστοποίηση συσκευών που υπακούνε στα πρωτόκολλα WiMAX και WiGRID και συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του πρωτοκόλλου IEEE 802.16.1-2012, ώστε να διασφαλίζεται η διαλειτουργικότητα παγκοσμίως. Αξίζει να σημειωθεί ότι το WiMAX Forum είναι ιδρυτικό μέλος του Smart Grid Interoperability Panel (SGIP), ενός μη κερδοσκοπικού οργανισμού που έχει ως στόχο την ανάπτυξη μιας σειράς προτύπων που θα εναρμονίζουν και θα βελτιώνουν τη διαλειτουργικότητα συσκευών και συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε έξυπνα δίκτυα παγκοσμίως. [23]



## Κεφάλαιο 5 : Το πρωτόκολλο UMTS

### 5.1 Εισαγωγή

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G – third Generation) δημιουργήθηκαν για να υλοποιήσουν το στόχο μιας παγκόσμιας υποδομής, ικανής να υποστηρίξει υπάρχουσες αλλά και νεοεμφανιζόμενες υπηρεσίες. Τα νέα αυτά δίκτυα είναι σε θέση να προσαρμοστούν ανάλογα με το είδος της προσφερόμενης υπηρεσίας, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα λειτουργίας ή ασφαλείας. Για να επιτευχθεί αυτή η παροχή υπηρεσιών υψηλής αξιοπιστίας, κρίθηκε απαραίτητος ο διακριτός διαχωρισμός ανάμεσα στα επίπεδα του μοντέλου OSI. Πιο συγκεκριμένα, για να μπορούν να πραγματοποιούνται ξεχωριστά οι διεργασίες έπρεπε να γίνει διαχωρισμός των τεχνολογιών πρόσβασης, μεταφοράς, υπηρεσιών και εφαρμογών χρήστη. Για την αρχιτεκτονική δομή και τη λειτουργία των πρωτοκόλλων έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται μερικές διαφορετικές υλοποιήσεις, χωρίς όμως να παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στο τελικό αποτέλεσμα όσον αφορά την εμπειρία του χρήστη.

Από τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των δικτύων δεύτερης γενιάς (2G), οι τεματιικοί κόμβοι (συσκευές χρηστών) του συστήματος μπορούν να είναι τόσο σταθεροί όσο και κινούμενοι χωρίς να δημιουργούνται επιπλοκές ή και αδυναμίες κατά την εξυπηρέτησή τους. Η δυνατότητα κίνησης που παρέχεται στους χρήστες ανοίγει τους ορίζοντες σε ένα τεράστιο αριθμό νέων υπηρεσιών και εφαρμογών που μπορούν να προσφερθούν με στόχο την αύξηση της συνολικής εμπειρίας του κάθε χρήστη. Η κινητικότητα έχει βέβαια ως αποτέλεσμα και κάποια αρνητικά στοιχεία, όπως είναι η διαχείριση των συσκευών κατά τη μετακίνησή τους από την εμβέλεια ενός σταθμού βάσης σε ένα άλλο και η δημιουργία κατάλληλων τεχνικών και αλγορίθμων ώστε να πραγματοποιείται αυτή η μετακίνηση μεταξύ των δύο σταθμών (handover) χωρίς να εμφανίζονται προβλήματα, όπως τυχούσα διακοπή της κλήσης. [24]

Το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (Universal Mobile Telecommunications System - UMTS) είναι το σύστημα κινητών επικοινωνιών τρίτης Γενιάς που εδραιώθηκε ως η βέλτιστη επιλογή μεταξύ όλων των συστημάτων τρίτης γενιάς που έχουν παρουσιαστεί. Το UMTS στηρίζεται στην Ευρυζωνική Πολλαπλή Προσπέλαση Διαίρεσης Κώδικα (Wideband Code Division Multiple Access - W-CDMA) και ο κυριότερος λόγος που επικράτησε ως η καλύτερη λύση για την υλοποίηση συστημάτων τρίτης γενιάς, είναι ότι αποτελεί μετεξέλιξη του Παγκόσμιου Συστήματος για τις Κινητές Επικοινωνίες (Global System for Mobile Communications - GSM) που ήταν ήδη ευρέως διαδεδομένο. Στόχος είναι η πλήρης μετάβαση από το GSM στο UMTS, αξιοποιώντας τις υπάρχουσες υποδομές. Το UMTS ελέγχεται και προωθείται από τον οργανισμό Εταιρικής Συνεργασίας τρίτης Γενιάς (third Generation Partnership Project -3GPP) [25]. Ο οργανισμός αυτός επιβλέπει τις και προετοιμάζει το UMTS, ώστε να μπορεί να προταθεί ως λύση για συστήματα τέταρτης γενιάς. Για την ώρα υπάρχει μια νέα έκδοση των 3.5G που υλοποιείται με UMTS, αλλά οι μελέτες δείχνουν ότι για τα δίκτυα

τέταρτης γενιάς, θα προτιμηθεί μια άλλη τεχνολογία, το LTE (Long Term Evolution), στο οποίο δε θα γίνει ανάλυση στην παρούσα εργασία.

## 5.2 Ιστορικά Στοιχεία

Η βελτίωση της ταχύτητας και των ικανοτήτων των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε συνδυασμό με την παρουσία υπηρεσιών διαδικτύου και την συνεχή αύξηση των εφαρμογών που δημιουργούνται για να εξυπηρετήσουν τις απαιτήσεις των πελατών, οδηγεί στην ανάγκη βελτίωσης των υποδομών και των τεχνολογιών διασύνδεσης και μετάδοσης δεδομένων μέσω τηλεπικοινωνιακών διαύλων. Από την κατασκευή του πρώτου μηχανήματος που μετέδιδε τον ήχο διαμέσου του ηλεκτρισμού από τον Αμερικανό φυσικό Αλεξάντερ Γκράχαμ Μπελ το 1876, έγινε φανερό πως οι τηλεπικοινωνίες θα παίξουν πολύ σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων, ενώ έχουν γίνει πολλά βήματα ανάπτυξης μέχρι τις παρούσες ψηφιακές τεχνολογίες και αναμένεται να γίνουν ακόμη περισσότερα καθώς οι απαιτήσεις συνεχώς αυξάνονται. Πλέον γίνεται αναφορά σε ένα πακέτο υπηρεσιών με τον όρο ψηφιακή σύγκλιση, ο οποίος αφορά την συγχώνευση υπηρεσιών φωνής, βίντεο και μετάδοσης δεδομένων. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τα διάφορα στάδια από τα πρώτα συστήματα GSM με δίκτυα 2G μέχρι και τα 3G δίκτυα, ενώ στη συνέχεια γίνεται μια μικρή αναφορά στις γενιές δικτύων μέχρι και την τρίτη.



Εικόνα 5. 1 Ο δρόμος προς τα δίκτυα τρίτης γενιάς

- ❖ Δίκτυα πρώτης γενιάς (1G) : Εμφανίστηκαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Η γενιά αυτή υποστήριζε υπηρεσίες αναλογικής φωνής και βασικής κινητικότητας χρηστών (mobility), χωρίς όμως ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η ασυμβατότητα των συστημάτων και η περιορισμένη τους χωρητικότητα αποτελούσαν τα κύρια προβλήματα εκείνης της γενιάς. Τα κυρίαρχα συστήματα για την υλοποίηση δικτύων πρώτης γενιάς ήταν : το αμερικανικό AMPS(Advanced Mobile Phone System), το σκανδιναβικό NMT(Nordic Mobile Telephone), που ήταν το πρώτο σύστημα πρώτης γενιάς στον κόσμο, και το βρετανικό TACS(Total Access Communications System). Τα δίκτυα πρώτης γενιάς αποδίδουν ταχύτητες 2kbps.
- ❖ Δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G) : Το Παγκόσμιο Σύστημα για τις Κινητές Επικοινωνίες (Global System for Mobile Communications - GSM), που είναι γνωστό και ως τεχνολογία Δεύτερης Γενιάς (2G), είχε βασικό στόχο να λύσει το πρόβλημα της

ασυμβατότητας μεταξύ των συστημάτων. Η προτίμηση του από χώρες Ευρώπης και Ασίας το βοήθησε στο να εδραιωθεί ως ένα δυνατό παγκόσμιο πρότυπο (standard). Χρησιμοποιεί τεχνική χρονικής διαίρεσης (TDMA) ή τεχνική διαίρεσης κώδικα (CDMA) για την μετάδοση δεδομένων στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων. Τα συστήματα δεύτερης γενιάς έχουν ικανότητα αποστολής και λήψης δεδομένων με ταχύτητες μόλις 9.6 ή 14.4 kbps. Η ταχύτητες αυτές ήταν ικανοποιητικές για μετάδοση φωνής πολύ χαμηλής ποιότητας, αλλά επιβαρύνοντας το δίκτυο και με υπηρεσίες αποστολής μηνυμάτων κειμένου, έγινε φανερό ότι χρειαζόταν αναβάθμιση στα δίκτυα δεύτερης γενιάς. Αυτή ήρθε με την τεχνολογία Μεταγωγής Κυκλώματος Δεδομένων Υψηλής Ταχύτητας (High Speed Circuit Switched Data – HSCSD), η οποία λόγω του τρόπου λειτουργίας της επέτρεπε ταχύτητες δεδομένων μέχρι και 5 φορές μεγαλύτερες από τα απλά δίκτυα GSM. Ο μηχανισμός λειτουργούσε αθροίζοντας έναν αριθμό από GSM κανάλια για πετύχει τη μετάδοση σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Τα αρνητικά γίνονται άμεσα φανερά, καθώς αφενός αυξάνονται άμεσα οι απαιτούμενοι πόροι του συστήματος, αφού δεσμεύονται πολλά κανάλια και αφετέρου τα κανάλια που δεσμεύονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο από ένα χρήστη κάθε φορά. Έτσι το HSCSD μπορεί να κατάφερε να βελτιώσει κατά πολύ την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, αλλά σπαταλούσε το πολύτιμο εύρος ζώνης. [26]

- ❖ Δίκτυα ενδιάμεσα της γενιάς 2 και 3 (2.5G) : Αυτή η γενιά αποτελεί ένα μεταβατικό στάδιο μεταξύ της δεύτερης και τρίτης γενιάς δικτύων, αφού αναβαθμίζει τα συστήματα προκειμένου να επιτύχουν ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες, αλλά και πιο αποδοτικά όσον αφορά τη διαχείριση του φάσματος, μιας και το κόστος των δικαιωμάτων δέσμευσης κάποιας μπάντας συχνοτήτων είναι ιδιαίτερα υψηλό. Η τεχνική μετάδοσης δεδομένων στα δίκτυα 2.5G που γίνεται στη μπάντα των ραδιοσυχνοτήτων και πραγματοποιείται με τεχνική μεταγωγής πακέτου (packet switching) δεν έχει καμία σχέση με την τεχνική που χρησιμοποιείται σε δίκτυα δεύτερης γενιάς. Το πρότυπο που παρουσιάστηκε ως αναβάθμιση του GSM ονομάζεται GPRS (General Packet Radio Service) και αποτελεί το ενιαίο Ευρωπαϊκό πρότυπο για τη γενιά αυτή. Τονίζεται ο όρος αναβάθμιση και όχι αντικατάσταση, διότι το GPRS εφαρμόζει μια δομή μεταγωγής πακέτου πάνω στην υπάρχουσα δομή μεταγωγής κυκλώματος του GSM. Η δυνατότητα μεταγωγής πακέτου δίνει στους διαχειριστές των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων την ικανότητα ελέγχου δικτύων πακέτων. Η τεχνολογία GPRS παρέχει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που κυμαίνονται από 35kbps έως 171kbps.
- ❖ Δίκτυα ενδιάμεσα της γενιάς 2 και 3 (2.75G) : Μια ακόμη τεχνολογία αναβάθμισης του GSM, αντίστοιχη με το GPRS είναι το EDGE (Enhanced Data for Global Evolution). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί τεχνική διαίρεσης χρόνου TDMA (Time Division Multiple Access), λογικό κανάλι και φέρον εύρους ζώνης 200kHz, παρόμοια με τα δίκτυα GSM. Εξαιτίας αυτού καθίσταται δυνατό στα υπάρχοντα δίκτυα να παραμείνουν ανέπαφα και ταυτόχρονα να είναι σε θέση να εξυπηρετούν μεταδόσεις που βασίζονται στο σύστημα EDGE. Η επίσημη ονομασία του προτύπου EDGE είναι UWC-136. Τα συστήματα που

βασίζονται στην τεχνολογία EDGE επιτυγχάνουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 3 φορές ταχύτερους σε σχέση με το GPRS. Έχει δηλαδή ταχύτητες μετάδοσης από 120kbps έως 384kbps. Το EDGE αποτελεί μια οικονομική λύση που παρέχει υψηλές αποδόσεις σε ταχύτητες, γεγονός που το θέτει ως πρωταρχική επιλογή των παρόχων υπηρεσιών, οι οποίοι επιθυμούν να παρέχουν ικανοποιητικές υπηρεσίες στους πελάτες τους με το ελάχιστο δυνατό κεφάλαιο. Έτσι σε πολλές περιπτώσεις προτιμούν να εξυπηρετούν περιοχές κάλυψης με συστήματα EDGE, έναντι των νεότερων και πιο αποδοτικών τεχνολογιών τρίτης γενιάς, αφού αυτά έχουν μεγάλο κόστος αδειοδότησης χρήσης ραδιοφάσματος.

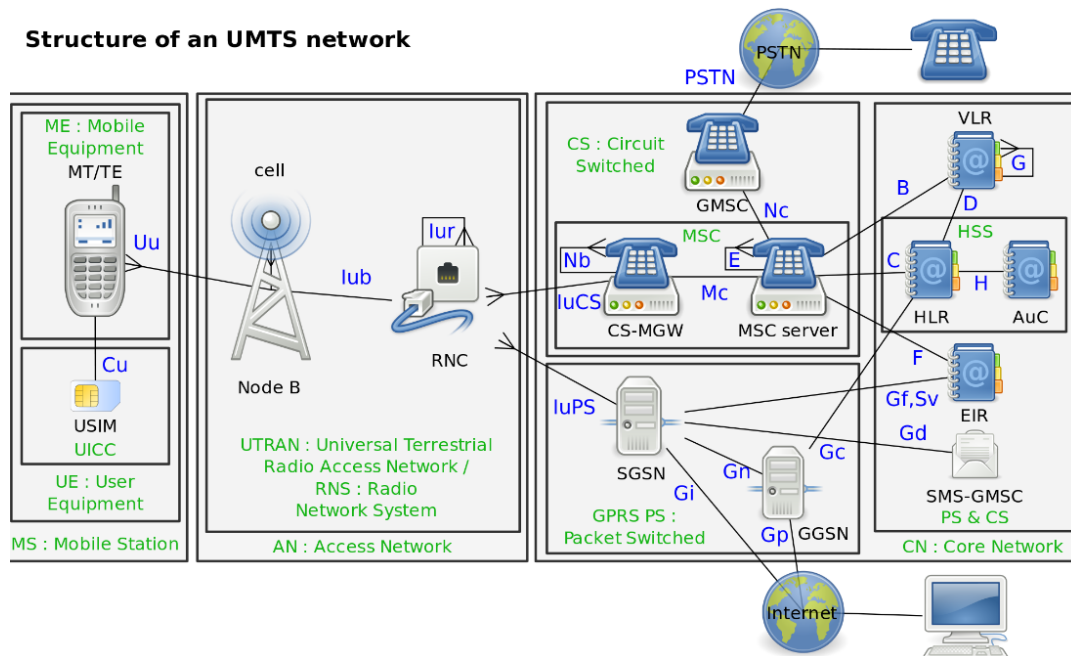
- ❖ Δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) : Τα δίκτυα τρίτης γενιάς προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με τις προηγούμενες γενεές. Εξάλλου για να θεωρηθεί μια συσκευή ως συσκευή τρίτης γενιάς απαιτείται να έχει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων πάνω από ένα όριο τουλάχιστον, πάντα σύμφωνα με τον ορισμό που έχει δώσει η διεθνής ένωση τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union - ITU). Το κατώτερο όριο μετάδοσης που πρέπει να έχει ένα τηλέφωνο για να θεωρείται συσκευή τρίτης γενιάς είναι τα 144kbps. Μεγάλο επίτευγμα αποτέλεσε η καθιέρωση ενός διεθνούς προτύπου για τα δίκτυα τρίτης γενιάς, του IMT-2000. Κάτω από το IMT-2000 έχουν αναπτυχθεί τρία διαφορετικά πρότυπα, τα οποία αποτελούν πλήρεις λύσεις για δίκτυα τρίτης γενιάς, που είναι : το W-CDMA, το CDMA2000 και το TD-SCDMA. Το W-CDMA (Wideband – Code Division Multiple Access), είναι η επίσημη ονομασία του πολύ γνωστού UMTS, που αποτελεί την πιο διαδεδομένη λύση για δίκτυα τρίτης γενιάς στην Ευρώπη και είναι αυτό που αντικαθιστά τα δίκτυα GSM. Στην άλλη πλευρά του ατλαντικού και πιο συγκεκριμένα στις ΗΠΑ, χρησιμοποιείται κυρίως το πρότυπο CDMA2000, το οποίο αναπτύχθηκε στα εργαστήρια της Qualcomm. Κατά καιρούς εμφανίζονται νέα πρότυπα, αλλά τα περισσότερα από αυτά δεν αποδεικνύονται καλύτερα από τα ήδη υπάρχοντα, οπότε στη συνέχεια εξαφανίζονται.

### 5.3 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Για να σχεδιαστεί σωστά ένα δίκτυο UMTS πρέπει αν ληφθούν υπόψιν τόσο τα δομικά στοιχεία που το αποτελούν, δηλαδή οι συσκευές των επιμέρους τομέων, όσο και οι λειτουργίες που πραγματοποιούνται οι οποίες ακολουθούν διαδικασίες που προβλέπουν τα πρωτόκολλα. Όταν πρόκειται για μοντελοποίηση των δομικών μονάδων, γίνεται αναφορά με την έννοια της περιοχής (domain), ενώ στη περίπτωση που γίνεται μοντελοποίηση των πρωτοκόλλων χρησιμοποιείται η έννοια του στρώματος (stratum). Η έννοια του στρώματος αφορά τη διαδικασία ομαδοποίησης πρωτοκόλλων για την παροχή υπηρεσιών από μία ή περισσότερες περιοχές.

Όσον αφορά τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα δίκτυο UMTS, διακρίνονται δύο υποκατηγορίες περιοχών : την περιοχή κύριας υποδομής του δικτύου (Infrastructure Domain)

και την περιοχή που περιλαμβάνει τις συσκευές των τελικών χρηστών (User Equipment Domain). Η περιοχή της κύριας υποδομής του δικτύου περιλαμβάνει τις περιοχές Δικτύου Πυρήνα (Core Network Domain) και Δικτύου Πρόσβασης (Access Network Domain). Το Δίκτυο Πρόσβασης σχετίζεται με την πρόσβαση των τερματικών χρηστών στο κύριο δίκτυο UMTS και είναι υπεύθυνο για τη σωστή διαχείριση των πόρων ώστε η πρόσβαση να είναι δυνατή στις υπηρεσίες. Η περιοχή της κύριας υποδομής του δικτύου (Infrastructure Domain) χωρίζεται στις δύο προαναφερθείσες περιοχές, με στόχο να επιτυγχάνεται διαχωρισμός και αποσυσχέτιση των λειτουργιών πρόσβασης από τις λειτουργίες μη πρόσβασης του κύριου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα η περιοχή δικτύου πρόσβασης διαχειρίζεται όλες τις λειτουργίες που απαιτούνται για τη σωστή διαχείριση μιας συσκευής που αιτείται την πρόσβαση στο δίκτυο, ενώ η περιοχή δικτύου πυρήνα ελέγχει πολλές διεργασίες του δικτύου, άσχετες με την τεχνολογία πρόσβασης. Με το διαχωρισμό αυτό και τη δυνατότητα εκτέλεσης λειτουργιών από διαφορετικά συστήματα και σε διαφορετικά στάδια, δίνεται η δυνατότητα σε δίκτυα πρόσβασης διαφορετικών τεχνολογιών να συνδέονται στην ίδια περιοχή του δικτύου πυρήνα χωρίς να δημιουργείται κάποια σύγκυση στο δίκτυο. Αντίστοιχα, διαφορετικοί τύποι δικτύων πυρήνα είναι σε θέση να συνδέονται στην ίδια περιοχή του δικτύου πρόσβασης χωρίς προβλήματα. Μια εικόνα της δομής που έχει ένα δίκτυο UMTS, συμπεριλαμβανομένων και των επιμέρους τμημάτων του, δίνεται παρακάτω.



Εικόνα 5. 2 Πλήρης Δομή Δικτύου UMTS

Το δίκτυο πυρήνα (Core Network - CN) αποτελείται από το τμήμα του δικτύου εξυπηρέτησης (Serving Network), του δικτύου μετάδοσης (Transit Network) και του κύριου δικτύου (Home Network). Το δίκτυο εξυπηρέτησης ασχολείται με το σύνολο των υπηρεσιών του δικτύου πυρήνα που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν ώστε να είναι δυνατή η σωστή εξυπηρέτηση των

χρηστών. Εξετίας αυτής της ανάγκης είναι φανερό ότι το δίκτυο εξυπηρέτησης είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο πρόσβασης, ώστε να είναι δυνατή η ανταλλαγή πληροφοριών. Σχετικά με το δίκτυο μετάδοσης αξίζει να σημειωθεί ότι είναι απαραίτητο για τον έλεγχο των διαδρομών που επιλέγονται για την επικοινωνία μεταξύ του δικτύου εξυπηρέτησης και κάποιου απομακρυσμένου σημείου. Η τρίτη περιοχή του δικτύου πυρήνα περιλαμβάνει λειτουργίες σχετικές με την ασφάλεια και την διαχείριση των συνδρομών. Οι λειτουργίες εκτελούνται για κάθε συνδρομητή που είναι συνδεδεμένος στο συγκεκριμένο δίκτυο ανεξάρτητα από το σημείο πρόσβασης χρήστη.

Στην περίπτωση που ελέγχεται η μοντελοποίηση του δικτύου από την πλευρά των πρωτοκόλλων, το UMTS δίκτυο αποτελείται από δύο στρώματα : το στρώμα πρόσβασης (Access Stratum) και το στρώμα μη πρόσβασης (Non-Access Stratum). Το πρώτο περιλαμβάνει το σύνολο των πρωτοκόλλων που εκτελούν διεργασίες ανάμεσα στο δίκτυο πρόσβασης και στον εξοπλισμό του χρήστη, οι οποίες αφορούν τη εγκαθίδρυση σύνδεσης του χρήστη με το δίκτυο και θα αναλυθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου, ενώ το δεύτερο στρώμα αποτελείται από τα πρωτόκολλα εκτέλεσης λειτουργιών ανάμεσα στον εξοπλισμό του χρήστη και στο δίκτυο πυρήνα.

### 5.3.1 Κυτταρική Δομή

Τα δίκτυα UMTS, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, αντικαθιστούν όλο και περισσότερα παλαιότερα δίκτυα GSM, διατηρώντας την ίδια βασική δομή. Τα συστήματα GSM στηρίχθηκαν σε μια λογική κατάτμησης του χώρου σε κυψέλες (κύτταρα ή κελιά (cells)), καθένα από τα οποία ελέγχεται από κάποιον σταθμό βάσης (base station). Οι χρήστες, σταθεροί ή κινούμενοι μπορούν να συνδεθούν με το δίκτυο μέσω των σταθμών βάσης, με την προϋπόθεση ότι βρίσκονται μέσα στα όρια που θέτει ένα κελί και υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι από το σύστημα. Ο καταλληλότερος σταθμός βάσης επιλέγεται με μια διαδικασία εντοπισμού (locating), ανάλογα με τις παραμέτρους που έχει θέσει ο διαχειριστής του δικτύου, που μπορεί να επιλέξει τη σύνδεση στον κοντινότερο σταθμό ή σε σταθμό με το μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Μια ακόμη διαδικασία που υπάρχει λόγω των κυψελών και πραγματοποιείται κατά τη μετακίνηση ενός χρήστη από μια κυψέλη σε κάποια από τις γειτονικές της, είναι η μεταγωγή (handover). Στο τομέα της μεταγωγής έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια έτσι ώστε να μη διακόπτεται η σύνδεση του χρήστη με το σταθμό βάσης καθώς πραγματοποιείται η μετακίνηση από τον ένα σταθμό στον άλλο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση περισσότερων της μίας κεραίας για τη μετάδοση δεδομένων από ένα χρήστη.

Παράμετροι όπως η εμβέλεια του κάθε σταθμού βάσης και η ισχύς εκπομπής των κεραιών του καθορίζονται από το σχεδιαστή του δικτύου και δεν επιτρέπεται να μεταβληθούν κατά πολύ όταν αρχίσει να λειτουργεί ο κάθε σταθμός. Για παράδειγμα, ανάλογα με τη ρύθμιση που γίνεται στην ισχύ εκπομπής της κεραίας, δημιουργούνται κελιά διαφορετικών μεγεθών, τα οποία δεν είναι συνετό να μεταβάλλονται κατά τη λειτουργία του συστήματος, καθώς είναι πολύ πιθανό να δημιουργείται επικάλυψη μεταξύ αυτών και κατά συνέπεια να παρουσιάζεται σύγχυση. Η εμβέλεια κάλυψης του σταθμού είναι παράμετρος που εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής της

κεραίας του σταθμού, την ισχύ λήψης και το κέρδος της κεραίας της συσκευής του χρήστη, αλλά και το γεωγραφικό ανάγλυφο του εδάφους που πραγματοποιείται η σύνδεση.

Όλες οι παραπάνω παράμετροι συμπεριλαμβάνονται σε ένα τύπο, γνωστό ως νόμο του Friis για τον ελεύθερο χώρο, ο οποίος βάσει κάποιων παραδοχών, δίνει τη λαμβανόμενη ισχύ σε κάποια απόσταση ως προς την ισχύ εκπομπής, για δεδομένη συχνότητα και γνωστά κέρδη κεραίων. [27]  
Ο τύπος δίνεται παρακάτω :

$$P_r = P_t G_r G_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \text{ όπου :}$$

$P_r$  : λαμβανόμενη ισχύς

$P_t$  : εκπεμπόμενη ισχύς

$G_r$  : κέρδος κεραίας λήψης

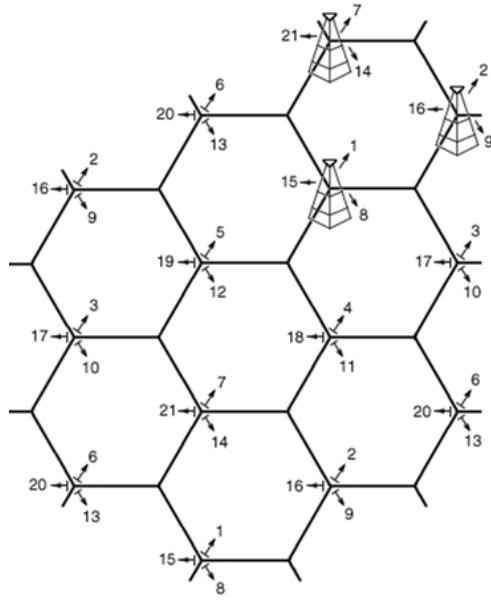
$G_t$  : κέρδος κεραίας εκπομπής

$\lambda$  : μήκος κύματος

$d$  : απόσταση

Με τη βοήθεια προγραμμάτων προσομοίωσης είναι δυνατόν να υπολογιστεί η απαιτούμενη ισχύς κάθε σταθμού βάσης αλλά και ο αριθμός των σταθμών βάσης, ώστε να εξυπηρετούνται οι χρήστες. Επειδή πολλές κεραίες σε σταθμούς βάσης είναι ισοτροπικές, η περιοχή κάλυψης γύρω από κάθε σταθμό έχει σχήμα κύκλου, το οποίο όμως είναι πολύ δύσκολο στη διαχείριση, καθώς αφήνει πολλά ακάλυπτα τμήματα ή δημιουργεί επικαλύψεις μεταξύ των κελιών. Για αυτό το λόγο καθιερώθηκε η χρήση κανονικών πολύγωνων (εξάγωνα) αντί για κύκλους, για την κατάτμηση των περιοχών κάλυψης. Εξαιτίας του σχήματος του οι περιοχές ονομάζονται κυψέλες ή κελιά.

Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται ισοτροπικές κεραίες αλλά κατευθυντικές στους σταθμούς βάσης, ο τρόπος κάλυψης των κελιών αλλάζει. Οι σταθμοί βάσης σε αυτή την περίπτωση δεν τοποθετείται στο κέντρο του κάθε κελιού, αλλά πάνω στις κορυφές του πολυγώνου, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5. 3 δίκτυο σταθμών βάσης με κατευθυντικές κεραίες

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο κάθε σταθμός βάσης έχει τρεις κατευθυντικές κεραίες, κάθε μία από τις οποίες καλύπτει μια περιοχή  $120^\circ$ . Με χρήση κατευθυντικών κεραιών καθίσταται ευκολότερος ο διαχωρισμός των περιοχών κάλυψης σε τομείς (sectors), ενώ γίνεται πολύ πιο εύκολη η διαχείριση και η μεταβολή των μεγεθών των κελιών. Οι πιο γνωστοί τύποι σταθμών βάσεων είναι αυτοί που χρησιμοποιούν ισοτροπικές κεραίες, κατευθυντικές κεραίες με κάλυψη  $120^\circ$  (3 sector base station) και κατευθυντικές κεραίες με κάλυψη  $60^\circ$  (6 sector base station). Η επιλογή σταθμών βάσης με 3 ή 6 κεραίες γίνεται κυρίως σε αστικά περιβάλλοντα, λόγω της ικανότητας να καταπολεμούν φαινόμενα διακαναλικής παρεμβολής (co-channel interference). Αντίθετα, σε περιβάλλοντα με λίγα εμπόδια, όπως στην ύπαιθρο, προτιμάται η υλοποίηση με σταθμούς βάσης που έχουν ισοτροπικές κεραίες.

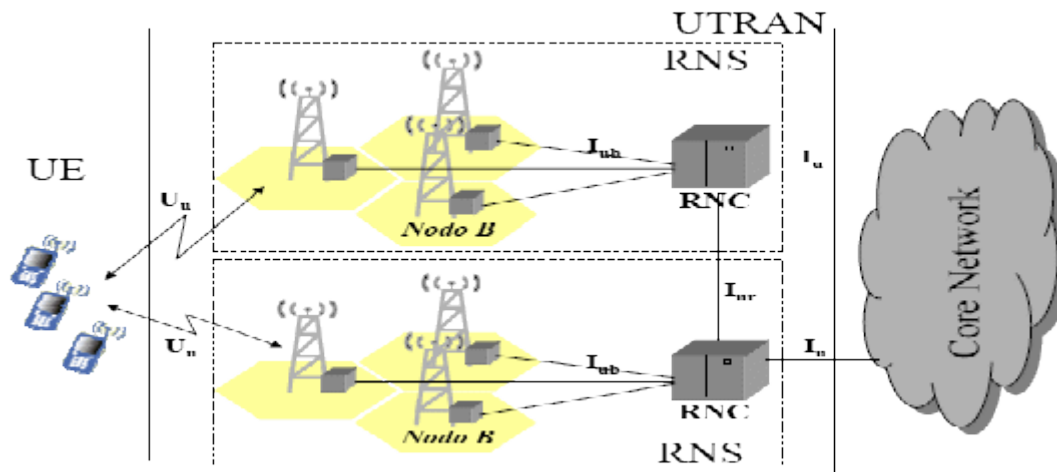
Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι μπορούν να δημιουργηθούν πολλά είδη κυψελών, διαφορετικών μεγεθών, ανάλογα με τις παραμέτρους που θα επιλεγθούν. Οι κυψέλες αυτές μπορεί να εξυπηρετούν περιοχές μεγέθους από μερικές δεκάδες μέτρα μέχρι και εκατοντάδες χιλιόμετρα.

### 5.3.2 Δίκτυο Επίγειας Ασύρματης Πρόσβασης UMTS (UTRAN)

Το UTRAN προκύπτει από τα αρχικά γράμματα των λέξεων της φράσης UMTS Terrestrial Radio Access Network που μεταφράζονται ως Δίκτυο Επίγειας Ασύρματης Πρόσβασης UMTS. Το δίκτυο UTRAN μεσολαβεί μεταξύ του εξοπλισμού του χρήστη και του κύριου δικτύου του συστήματος και συνδέεται με αυτά μέσω των διεπαφών Uu και Iu [βλ. Εικόνα 5.4]. Είναι υπεύθυνο για τη σωστή σύνδεση των χρηστών στο δίκτυο και διαχειρίζεται τους πόρους του ώστε να είναι δυνατή η εγκαθίδρυση διαδρόμου επικοινωνίας. Επιτελεί σημαντικές λειτουργίες όπως είναι η διαχείριση ασύρματων πόρων (RRM) και η διαχείριση μεταγωγής μεταξύ των σταθμών βάσης (handover management).



Το δίκτυο UTRAN αποτελείται από τους σταθμούς βάσης μέσω των οποίων συνδέονται οι χρήστες ασύρματα στο δίκτυο και οι οποίοι είναι γνωστοί ως Node B για συστήματα UMTS και από κόμβους ελέγχου ασύρματης πρόσβασης (RNC). Οι Node Bs συνδέονται με τις συσκευές των χρηστών μέσω της διεπαφής  $U_u$ , ενώ με τους ελεγκτές ασύρματης πρόσβασης μέσω της διεπαφής  $I_{ub}$ . Όταν ένας χρήστης εισέρχεται σε κελί που καλύπτεται από ένα σταθμό βάσης, μπορεί να αποστείλει ή να λάβει δεδομένα. Ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για τη λήψη και την αποστολή πληροφορίας σε όλη την έκταση της κυψέλης που διαχειρίζεται. Αυτό επιτυγχάνεται με την εγκαθίδρυση καναλιών επικοινωνίας WCDMA για την φυσική ζεύξη και τη μεταφορά πληροφοριών από το κανάλι μετάδοσης στο φυσικό κανάλι, ανάλογα με τις εντολές που δίνονται από τους κόμβους RNC. Τα δεδομένα που φτάνουν στο σταθμό βάσης προωθούνται στον ελεγκτή ασύρματης πρόσβασης που συνδέεται μαζί του, όπου γίνεται έλεγχος των πληροφοριών πριν προωθηθούν εκ νέου στο κυρίως σύστημα. Ένας ελεγκτής μπορεί να είναι συνδεδεμένος με περισσότερους του ενός σταθμούς βάσης. Το σύστημα που δημιουργείται σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται υποσύστημα ασύρματης πρόσβασης (RNS). Οι σταθμοί βάσης εκτελούν ελέγχους για παραμέτρους που αφορούν τις ασύρματες ζεύξεις. Συγκεκριμένα επιτηρούν τη στάθμη ισχύος, η οποία απαγορεύεται να υπερβεί κάποιο όριο, καθώς μπορεί να γίνει επικίνδυνο για την υγεία των χρηστών και επιβάλλονται πρόστιμα. Επίσης μετρούνται δείκτες που αφορούν την ποιότητα υπηρεσιών (QoS), ενώ η ζεύξη μπορεί να διακοπεί από το σταθμό βάσης σε περίπτωση παραβίασης των ορίων από τους δείκτες. Ο RNC ενός RNS υποσυστήματος με πολλούς σταθμούς βάσης, συλλέγει δεδομένα των μετρήσεων στάθμης ισχύος και ποιότητας υπηρεσιών από το σύνολο των σταθμών βάσης και προσαρμόζει τις τιμές τους ανάλογα με τις ανάγκες. Είναι αυτός που διαχειρίζεται την τηλεπικοινωνιακή κίνηση του συστήματος και είναι υπεύθυνος για την έγκριση των αιτήσεων σύνδεσης των χρηστών, τη δρομολόγηση των πακέτων προς το κύριο δίκτυο αλλά και τη μεταγωγή των χρηστών μεταξύ διαφορετικών RNSs. Τα διάφορα υποσυστήματα RNS που ανήκουν στο ίδιο δίκτυο UTRAN συνδέονται μεταξύ τους μέσω της ανοικτής διεπαφής  $I_{ur}$ , η οποία μεταφέρει τόσο μηνύματα σηματοδότησης όσο και πληροφορίες σχετικά με τα δεδομένα.



Εικόνα 5. 4 Δίκτυο UTRAN

### 5.3.3 Δίκτυο Κορμού (CN)

Το δίκτυο κορμού (Core Network - CN) του UMTS βρίσκεται ανάμεσα στο δίκτυο πρόσβασης του UTRAN και σε εξωτερικά δίκτυα, όπως είναι το διαδίκτυο και το τηλεφωνικό δίκτυο PSTN. Αποτελεί τη βασική πλατφόρμα όλων των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών που παρέχονται στους χρήστες του UMTS συστήματος. Υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου (PS) και μεταγωγής κυκλώματος (CS) είναι δύο βασικές υπηρεσίες επικοινωνίας που παρέχονται από το δίκτυο κορμού, πάνω στις οποίες βασίζονται πολλές άλλες χρήσιμες υπηρεσίες. Το CN είναι υπεύθυνο για σημαντικές λειτουργίες όπως είναι η ταυτοποίηση και ο εντοπισμός των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι και η δρομολόγηση των κλήσεων που υποβάλλονται στο δίκτυο.

Οι υπηρεσίες που βασίζονται στη μεταγωγή κυκλώματος είναι κυρίως υπηρεσίες σύνδεσης, οι οποίες απαιτούν δέσμευση πόρων του συστήματος από την εκκίνηση μέχρι και τη λήξη της παρεχόμενης υπηρεσίας. Τα συστήματα UMTS που βασίζονται στη μεταγωγή κυκλώματος δεν απαιτούν πολλά έξοδα εγκατάστασης καθώς η ίδια τεχνολογία χρησιμοποιούταν και από τα δίκτυα GSM, άρα ήταν ευκολότερη η μετάβαση σε δίκτυα UMTS με χρήση αυτής. Ένα σύστημα που λειτουργεί με μεταγωγή κυκλώματος αποτελείται από : το Κέντρο Μεταγωγής Κινητών Υπηρεσιών, το Διαβιβαστικό Κέντρο Μεταγωγής Κινητών Υπηρεσιών και τον Καταχωρητή Θέσης Επισκεπτών. [28]

Το Κέντρο Μεταγωγής Κινητών Υπηρεσιών (MSC) είναι ένας κόμβος μεταγωγής κυκλώματος που δρομολογεί τα δεδομένα μέσα στο δίκτυο UMTS. Είναι συνδεδεμένος με ένα ή περισσότερα RNCs και με τις βάσεις δεδομένων του δικτύου VLR (ή και HLR) και διαχειρίζεται την κινητικότητα των χρηστών που βασίζεται στη μεταγωγή κυκλώματος.

Το Διαβιβαστικό Κέντρο Μεταγωγής Κινητών Υπηρεσιών (GMSC) μεσολαβεί μεταξύ των κόμβων MSCs και εξωτερικών δικτύων όπως είναι το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο PSTN. Κινεί τις διαδικασίες λήψης πληροφοριών θέσης για τον εντοπισμό του σωστού συνδυασμού κόμβου MSC με μια βάση δεδομένων VLR για την εγκαθίδρυση ενός μονοπατιού τηλεφωνικής σύνδεσης μέσω του οποίου αποθηκεύονται δεδομένα σχετικά με τον συνδρομητή.

Ο Καταχωρητής Θέσης Επισκεπτών (VLR) αποτελεί τη βάση δεδομένων όπου βρίσκονται προσωρινά στοιχεία, απαραίτητα για την ταυτοποίηση, την ασφάλεια και την διαχείριση των συνδρομητών. Συνήθως κάθε κόμβος MSC είναι συνδεδεμένος με μία βάση VLR. Επειδή τα στοιχεία της βάσης VLR είναι προσωρινά, χρειάζεται η συχνή ενημέρωση της από μια άλλη βάση που ονομάζεται βάση HLR. Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των δύο βάσεων πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός κέντρου μεταγωγής κινητών υπηρεσιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βάση δεδομένων VLR υπήρχε αυτούσια και στα συστήματα GSM.

Το γεγονός ότι οι κόμβοι που λειτουργούν με τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος είναι είτε ίδιοι είτε παρόμοιοι με αυτούς προϋπάρχοντων συστημάτων όπως το GSM, προσδίδει στα συστήματα UMTS χαρακτηριστικά διαλειτουργικότητας που είναι πολύ σημαντικά.

Από την άλλη, υπηρεσίες που βασίζονται στην τεχνολογία μεταγωγής πακέτου (PS) διαφοροποιούνται σε αρκετούς τομείς με αυτές της μεταγωγής κυκλώματος (CS). Σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται η δέσμευση και διατήρηση πόρων για την αποστολή δεδομένων. Το σύνολο της πληροφορίας κομματιάζεται σε πακέτα, τα οποία δρομολογούνται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Συνεπώς, κάθε πακέτο μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικούς πόρους του συστήματος για να μεταβεί από την πηγή στον προορισμό του, προσδίδοντας με αυτό τον τρόπο ευελιξία στο δίκτυο. Ένα σύστημα που λειτουργεί με τεχνολογία μεταγωγής πακέτου αποτελείται από : τον Κόμβο Υποστήριξης GPRS εξυπηρέτησης και τον Κόμβο Υποστήριξης Πυλών GPRS.

Ο Κόμβος Υποστήριξης GPRS εξυπηρέτησης (SGSN) λειτουργεί αντίστοιχα με τον κόμβο MSC των συστημάτων που βασίζονται στη μεταγωγή κυκλώματος. Είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των RNCs που συνδέονται μαζί του, ενώ έχει πρόσβαση και στις βάσεις δεδομένων HLR, όπως γίνεται και με τους κόμβους MSC, από τις οποίες λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τα στοιχεία των χρηστών και τις περιόδους σύνδεσης. Ο κόμβος SGSN δρομολογεί όλα τα πακέτα που μεταδίδονται με τεχνολογία μεταγωγής πακέτου μέσα στο δίκτυο UMTS.

Όπως ο κόμβος SGSN λειτουργεί αντίστοιχα με τον MSC της τεχνολογίας μεταγωγής κυκλώματος έτσι και ο Κόμβος Υποστήριξης Πυλών GPRS (GGSN) λειτουργεί αντίστοιχα με τον GMSC. Είναι συνδεδεμένος τόσο με τον κόμβο SGSN από την πλευρά του δικτύου πρόσβασης, όσο και με εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής πακέτου, όπως είναι τα δίκτυα X.25 και το διαδίκτυο. Ο κόμβος GGSN λειτουργεί αμφίδρομα είτε ενθυλακώνοντας πακέτα που φτάνουν από εξωτερικά δίκτυα και προωθώντας τα στους κόμβους SGSN είτε εκτελώντας την αντίστροφη διαδικασία.

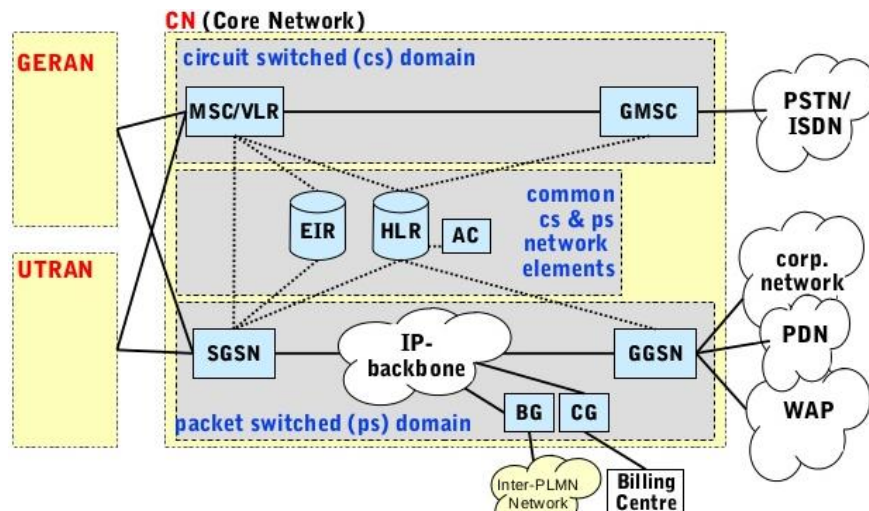
Ανεξάρτητα από την τεχνολογία μεταγωγής που επιλέγεται υπάρχουν δύο τύποι κόμβων που υπάρχουν σε κάθε σύστημα UMTS. Αυτοί είναι : ο Καταχωρητής Θέσης Συνδρομητών Δικτύου, το Κέντρο Πιστοποίησης και το Μητρώο Ταυτοποίησης Εξοπλισμού.

Ο Καταχωρητής Θέσης Συνδρομητών Δικτύου (HLR) είναι μια βάση δεδομένων που διατηρεί στη μνήμη της στοιχεία που αφορούν τους συνδρομητές, τα οποία όμως είναι σχετικά σταθερά. Κρατά δηλαδή στη μνήμη δεδομένα όπως είναι τα αναγνωριστικά του συνδρομητή και ο τύπος των υπηρεσιών που έχει δικαίωμα να χρησιμοποιήσει, αλλά δεν αποθηκεύει δεδομένα που αφορούν την κάθε περίοδο σύνδεσης του.

Το Κέντρο Πιστοποίησης (AuC) αποτελεί κόμβο κρίσιμης σημασίας για ένα δίκτυο UMTS, καθώς από αυτόν προκύπτουν σημαντικές πληροφορίες ασφαλείας. Ο κόμβος είναι άμεσα συνδεδεμένος με τη βάση δεδομένων HLR από την οποία τραβά τις απαραίτητες πληροφορίες για την πιστοποίηση κάθε χρήστη που ζητάει να συνδεθεί στο σύστημα. Είναι υπεύθυνος για την κρυπτογράφηση των πληροφοριών των συνδρομητών και την ανάθεση δημόσιων και ιδιωτικών κλειδιών αφού αυτή πραγματοποιηθεί. Ο κόμβος αυτός σε συνδυασμό με την βάση δεδομένων HLR γίνονται στόχοι επιθέσεων από κακόβουλους χρήστες, αφού διαχειρίζονται ευαίσθητα

προσωπικά δεδομένα των συνδρομητών και η βελτίωση της προστασίας τους έναντι κακόβουλων ενεργειών αποτελεί αντικείμενο συνεχούς έρευνας.

Το Κέντρο Ταυτοποίησης Εξοπλισμού (EIR) ελέγχει και αποφασίζει αν θα επιτρέψει ή θα απορρίψει τη σύνδεση εξοπλισμού χρήστη (UE) στο δίκτυο. Κάθε συσκευή χαρακτηρίζεται από ένα αριθμό που είναι γνωστός ως Διεθνής Ταυτότητα Εξοπλισμού Κινητής (International Mobile Equipment Identity). Ο αριθμός αυτός ελέγχεται από τον κόμβο EIR κατά τη σύνδεση του εξοπλισμού προκειμένου να τον πιστοποιήσει και να μπορεί να κάνει χρήση υπηρεσιών.



Εικόνα 5. 5 Τοπολογία Δικτύου Κορμού

Όλοι οι παραπάνω κόμβοι έχουν πολλές διαφορετικές παραλλαγές ανάλογα με τις επιθυμητές διεπαφές επικοινωνίας, που εξαρτώνται από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδέσεις ATM, SLIP ή ακόμα και Ethernet, ενώ η δυνατότητα μετάδοσης καθορίζεται και από τη χωρητικότητα των γραμμών. Στην εικόνα 5.5 παρουσιάζεται μια τοπολογία με όλα τα στοιχεία που βρίσκονται σε ένα δίκτυο κορμού (CN) ενός δικτύου UMTS.

### 5.3.4 Εξοπλισμός Χρήστη (UE)

Ο εξοπλισμός χρήστη (User Equipment - UE) αφορά το πλήρες σύστημα των κινητών συσκευών μαζί με την κάρτα USIM που χρησιμοποιούνται από τους συνδρομητές για να έχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί απλά ο όρο κινητή συσκευή, αλλά με τις δυνατότητες σε ταχύτητες και τις παροχές ενός δικτύου UMTS τρίτης γενιάς, ο χρήστης σταματά να έχει μόνο υπηρεσίες φωνής, μηνυμάτων και ισχνές υπηρεσίες διαδικτύου και έτσι η ονομασία κινητή συσκευή λαμβάνει πιο ελεύθερη ονομασία. Το σύστημα UE είναι το άκρο ενός δικτύου UMTS που επικοινωνεί με το χρήστη, κατά συνέπεια η ορθή λειτουργία του είναι πολύ σημαντική. Το UE συνδέεται με το δίκτυο πρόσβασης του UMTS μέσω της διεπαφής Uu, ενώ αξίζει να σημειωθεί πως κάθε συσκευή UE έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί ταυτόχρονα με περισσότερους του ενός σταθμού βάσης, χρησιμοποιώντας σε αυτή την περίπτωση τεχνολογίες

σύνδεσης πολλών εισόδων πολλών εξόδων (MIMO). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το UE αποτελείται από την κινητή συσκευή και την κάρτα USIM.

Η κάρτα USIM (Universal Subscriber Identity Module) ή Μονάδα Καθολικής Ταυτότητας Συνδρομητή είναι μια κάρτα αντίστοιχη με την κάρτα SIM που χρησιμοποιεί το δίκτυο GSM με τη διαφορά ότι παρέχει τάξης μεγαλύτερη χωρητικότητα (MB αντί για kB) και περιέχει πληροφορίες ταυτοποίησης για τη σύνδεση του χρήστη στο δίκτυο UMTS. Στη USIM υπάρχει αποθηκευμένος ο μοναδικός αριθμός της Διεθνούς Ταυτότητας Εξοπλισμού Κινητής, που ελέγχεται από τον κόμβο EIR κατά τη σύνδεση, αλλά και ο Διεθνής Αριθμός Κινητού Σταθμού ISDN, δηλαδή ο αριθμός τηλεφώνου που αναθέτει ο πάροχος υπηρεσιών στην κάρτα για να μπορεί να επικοινωνεί. Η κάρτα περιέχει επίσης πληροφορίες σχετικά με την προτιμώμενη γλώσσα, ενώ έχει στη μνήμη της και κάποια τηλέφωνο δημόσιας χρήσης.

Η κινητή συσκευή (ME) του χρήστη πρέπει να πληροί κάποιες προϋποθέσεις για να μπορεί να συνδεθεί σε δίκτυο τρίτης γενιάς. Όπως έχει υπωθεί μια συσκευή θεωρείται συσκευή 3G αν υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης πάνω από κάποιο όριο. Για να μπορεί μια κινητή συσκευή να το κάνει αυτό απαιτείται να έχει σχετικά προηγμένο εξοπλισμό στα ηλεκτρονικά της κυκλώματα. Η συσκευή οφείλει να διαθέτει κεραία έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιεί ασύρματη ζεύξη με το σταθμό βάσης του δικτύου. Θα πρέπει επίσης να είναι τεχνικά ικανή να διαχειριστεί το σύνολο των εφαρμογών που επιθυμεί να αποκτήσει πρόσβαση ο χρήστης. Η RF κεραία της συσκευής πρέπει να έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας προκειμένου να αυξάνεται η αυτονομία της συσκευής. Η κωδικοποίηση W-CDMA που χρησιμοποιείται στα δίκτυα UMTS απαιτεί τη χρήση γραμμικών ενισχυτών στο κύκλωμα της κεραίας γεγονός που δυσκολεύει τη μείωση την καταναλισκόμενης ενέργειας. Πιθανόν η υλοποίηση με μη γραμμικούς ενισχυτές, όπως γίνεται και σε συστήματα GSM, θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρεύματος που διαπερνά τον ενισχυτή και ως επακόλουθο θα μειωθεί και η ενέργεια που καταναλώνεται από το συνολικό σύστημα της κεραίας.

## 5.4 Πρωτόκολλα

Τα σύνολο των επιμέρους πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται από τις βαθμίδες ενός δικτύου UMTS, μπορούν να οργανωθούν σε ένα αρχιτεκτονικό μοντέλο που να τα περιέχει όλα σύμφωνα με την σειρά που πραγματοποιούνται. Ο διαχωρισμός σε ομάδες είναι δύσκολος αλλά με μια προσπάθεια μπορούν να μοιραστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το στρώμα στο οποίο λαμβάνουν χώρα. Τα τρία στρώματα είναι τα εξής : το στρώμα δικτύου μεταφοράς, το στρώμα ασυρμάτου δικτύου και το στρώμα δικτύου συστήματος. Παράλληλα με το διαχωρισμό των πρωτοκόλλων σε τρία στρώματα μπορεί να γίνει και διάκριση σε επίπεδο ελέγχου ή επίπεδο χρήστη. Τα πρωτόκολλα του επιπέδου ελέγχου αφορούν τις λειτουργίες ελέγχου, ενώ του επιπέδου χρήστη σχετίζονται με τις απαιτούμενες λειτουργίες για τη μετάδοση δεδομένων. Τα πρωτόκολλα κάθε στρώματος εκτελούν λειτουργίες σειριακά, ενώ η ιεραρχία των στρωμάτων ακολουθεί την αρχιτεκτονική του μοντέλου OSI. Έτσι πρωτόκολλα του στρώματος δικτύου

μεταφοράς, καθορίζουν τον τρόπο που μεταδίδονται τα πακέτα δεδομένων μέσα στο δίκτυο UMTS, ενώ τα πρωτόκολλα των υπόλοιπων δύο στρωμάτων εξασφαλίζουν διαλειτουργικότητα τεχνολογιών, τόσο μεταξύ του UE και του δικτύου πυρήνα μέσω του δικτύου πρόσβασης UTRAN, όσο και μεταξύ UE και του δικτύου μεταφοράς. Πέρα από τα πρωτόκολλα που λειτουργούν σε κάθε στρώμα είναι καλό να αντιληφθεί κανείς και τα πρωτόκολλα που αντιστοιχούν σε κάθε επίπεδο.

Το επίπεδο χρήστη περιλαμβάνει πρωτόκολλα που είναι αναγκαία για την αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων μεταξύ της συσκευής χρήστη και του δικτύου UMTS.

Ένα από τα πιο γνωστά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε αυτή το επίπεδο αφορά τη σύγκλιση των πακέτων δεδομένων. Το *PDPC*, όπως ονομάζεται, λειτουργεί ως μεταγλωττιστής και αυτό που κάνει είναι να μεταφράζει τα χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων υψηλότερων επιπέδων ώστε να γίνονται αντιληπτά από τα πρωτόκολλα του επιπέδου ασύρματης πρόσβασης. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να πραγματοποιηθεί κάποιου είδους ενημέρωση μεταξύ των πρωτοκόλλων διαφορετικών επιπέδων. Μεγάλο πλεονέκτημα αποτελεί η υποστήριξη οποιουδήποτε πρωτοκόλλου υψηλότερου επιπέδου, ενώ ο σχεδιασμός του προσδίδει τέτοια ευελιξία που του δίνει τη δυνατότητα να υποστηρίξει τόσο υπάρχουσα όσο και μελλοντικά πρωτόκολλα ανώτερων επιπέδων της ασύρματης πρόσβασης. Φυσικά στην εδραίωση του έπαιξε σημαντικότατο λόγο η υποστήριξη συγκεκριμένα του διαδικτυακού πρωτοκόλλου (IP), αλλά και η ικανότητα συμπίεσης των επικεφαλίδων των πακέτων, εξοικονομώντας έτσι πολύτιμους πόρους του δικτύου πρόσβασης. [29]

Όσον αφορά τη διαχείριση της κινητικότητας του χρήστη, τον εντοπισμό θέσης, την εποπτεία του συστήματος και την κρυπτογράφηση χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο διαχείρισης πλαισίων μέσω της διεπαφής Iu. Λειτουργεί είτε σε υποστηρικτική μορφή, όπου υποβοηθάει τον κεντρικό μηχανισμό διαχείρισης της συσκευής χρήστη επειδή απαιτούνται ειδικές λειτουργίες, είτε σε διαφανή μορφή, που χρησιμοποιείται στο τμήμα του δικτύου που εφαρμόζεται η τεχνική μεταγωγής πακέτου, στο οποίο δεν είναι απαραίτητη η επιβάρυνση των πακέτων με την προσθήκη επικεφαλίδας πριν προωθηθούν στο στρώμα του δικτύου μεταφοράς.

Για την ασφαλή και σωστή μεταφορά των πακέτων από τους κόμβους RNC του δίκτυο πρόσβασης UTRAN προς τους κόμβους SGSN του δικτύου πυρήνα αλλά και προς τους κόμβους GGSN, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο μεταφοράς μέσω διόδου GTP-U (GPRS Tunneling Protocol – User plane). Αυτό ενθυλακώνει τα πακέτα δεδομένων και τα δρομολογεί δια μέσω μοναδικών διαδρομών στο εσωτερικό του δικτύου UMTS. Διαχειρίζεται όλα τα πακέτα χωρίς να ελέγχει πολλές πληροφορίες σχετικά που τα πρωτόκολλα ανωτέρων επιπέδων, γεγονός που επιτρέπει στο δίκτυο να δρομολογεί πακέτα του δικτύου IP με πολλά διαφορετικά πακέτα δρομολόγησης.

Το επίπεδο ελέγχου περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα που είναι απαραίτητα για τον έλεγχο της σηματοδοσίας και τη διαχείριση των πόρων του δικτύου προς εξυπηρέτηση του συνόλου των

χρηστών, όποτε αυτοί αιτούνται σύνδεση προς το δίκτυο UMTS, αλλά και τον καθορισμό της διαδρομής που ακολουθείται για την μεταφορά δεδομένων από και προς κάθε συνδρομητή.

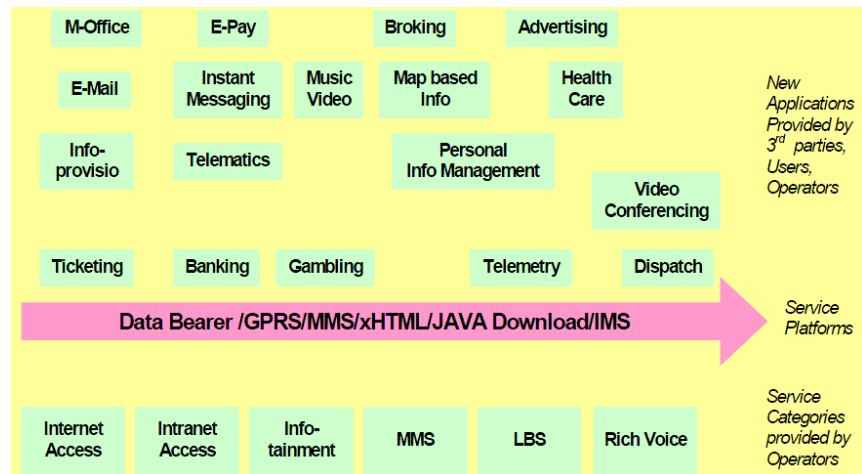
Το πρωτόκολλο ασύρματης πρόσβασης εφαρμογής δικτύου (RANAP) λειτουργεί βασισμένο στη διεπαφή Iu και είναι υπεύθυνο για λειτουργίες όπως ο γεωγραφικός εντοπισμός των τερματικών συσκευών των χρηστών, η εποπτεία του συστήματος για εμφάνιση εσφαλμένης λειτουργίας και η διαδικασία κρυπτογράφησης των δεδομένων. Αναλαμβάνει επίσης τη διαχείριση σηματοδοσίας μεταξύ του επιπέδου ασύρματης δικτύου και άλλων επιπέδων.

Ο έλεγχος σηματοδοσίας μεταξύ της τερματικής συσκευής του χρήστη και του κόμβου SGSN για την εγκαθίδρυση μιας συνεδρίας πραγματοποιείται βάσει του πρωτοκόλλου διαχείρισης κινητικότητας και συνόδου (GMM/SM). Το πρωτόκολλο προβλέπει μια σειρά ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των δύο κόμβων, όπου γίνεται η πιστοποίηση του χρήστη και η ενεργοποίηση στη πρόσβαση εγκεκριμένων υπηρεσιών.

Το αντίστοιχο πρωτόκολλο του GTP-U του επιπέδου χρήστη, στο επίπεδο ελέγχου είναι το GTP-CP. Το πρωτόκολλο μεταφοράς μέσω τούνελ χρησιμοποιείται για τον έλεγχο μετάδοσης δεδομένων και διασύνδεσης στους κόμβους του δικτύου πυρήνα που υποστηρίζουν μεταγωγή πακέτου. Το πρωτόκολλο διαχειρίζεται τους διαδρόμους που δημιουργούνται για την μετάδοση δεδομένων μεταξύ των κόμβων του δικτύου πυρήνα, ενεργοποιώντας ή απενεργοποιώντας τους πόρους, ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος.

## 5.5 Υπηρεσίες UMTS

Οι ταχύτητες και η υψηλή ποιότητα υπηρεσιών που παρέχουν τα δίκτυα UMTS έχουν δημιουργήσει μια αγορά που βασίζεται σε τελικούς χρήστες, παρόχους υπηρεσιών και δημιουργούς εφαρμογών και κειμένου. Υπενθυμίζεται ότι κάθε συσκευή ικανή να λάβει και αποστείλει με ταχύτητες μεγαλύτερες των 144kbps θεωρείται συσκευή τρίτης γενιάς. Σε τέτοιες ταχύτητες μπορούν να μεταδοθούν δεδομένα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη πρόοδο της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, ανοίγει το δρόμο για παροχή υπηρεσιών που έως τότε ήταν διαθέσιμες μόνο μέσω καλωδιακών συνδέσεων. Το σύνολο των υπηρεσιών μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τις απαιτήσεις σε καθυστέρηση(delay), ταχύτητα μετάδοσης(throughput) και δέσμευση πόρων. Οι κλάσεις υπηρεσιών (CoS) που μπορεί να ανήκει μια υπηρεσία είναι : υπηρεσίες ομιλίας (Conversational), υπηρεσίες συνεχούς ροής (streaming), διαδραστικές υπηρεσίες(interactive) και υπηρεσίες παρασκήνιου(background). Κάποιες από τις βασικότερες υπηρεσίες που παρέχονται από την εμφάνιση των δικτύων τρίτης γενιάς και έπειτα παρουσιάζονται στην εικόνα 5.6.



Εικόνα 5. 6 Υπηρεσίες παρεχόμενες από δίκτυα 3G

Μπορούν να διακριθούν υπηρεσίες μεταξύ χρηστών, διαφήμισης, μεταξύ συσκευών, ψυχαγωγίας, επαγγελματικές και πρόσβασης σε πληροφορία. [29]

- Οι υπηρεσίες μεταξύ χρηστών υποστηρίζονταν και από παλιότερα δίκτυα (GSM) με τη διαφορά ότι με τα δίκτυα 3G είναι δυνατή η επικοινωνία όχι μόνο με φωνή ή γραπτό μήνυμα, αλλά και ζωντανή ροή βίντεο, παρέχοντας στους χρήστες εξαιρετική εμπειρία επικοινωνίας.
- Η διαφήμιση μέσω κινητών συσκευών είναι μια υπηρεσία(προς τις επιχειρήσεις) που έχει ήδη αναπτυχθεί πάρα πολύ. Η χρήση συσκευών τρίτης ή μεγαλύτερης γενιάς αποκτά όλο και μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά ηλεκτρονικών συσκευών και οι προοπτικές κερδών από την συγκεκριμένη υπηρεσία είναι τεράστιες.
- Υπηρεσίες μεταξύ συσκευών, όπως είναι το πολύ γνωστό internet of things, αποτελούν αυτή τη στιγμή ένα ραγδαία αναπτυσσόμενο και συνάμα πολλά υποσχόμενο τομέα, όπου δεν θα απαιτείται η παρουσία ανθρώπου για την μεταφορά και επεξεργασία δεδομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα υπηρεσιών τέτοιας μορφής αποτελεί η τηλεμετρία σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι υπηρεσίες ψυχαγωγίες παρουσιάζονται με πολλές και διαφορετικές μορφές σε συσκευές τρίτης γενιάς. Από εφαρμογές ψηφιακών παιχνιδιών μέχρι και εφαρμογές μουσικής και ζωντανής ροής τη στιγμή που ζητούνται, οι επιλογές για τους χρήστες είναι πάρα πολλές.
- Στις επιχειρηματικές υπηρεσίες κατατάσσονται υπηρεσίες εγκατάστασης ιδιωτικών δικτύων, υπηρεσίες τηλεδιάσκεψης, fax και ηλεκτρονικό ταχυδρομείο. Είναι αντιληπτό ότι οι περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές μπορούν να θεωρηθούν και υπηρεσίες μεταξύ χρηστών.
- Οι υπηρεσίες πρόσβασης σε πληροφορία αφορούν την δυνατότητα των χρηστών να έχουν πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων, στο διαδίκτυο και σε εφαρμογές ενημέρωσης.



Οι υπηρεσίες που παρέχονται με τα δίκτυα 3G βελτιώνονται και αυξάνονται συνεχώς, ενώ με τα νέα δίκτυα 3.5G και 4G και την αύξηση των ταχυτήτων που επιτυγχάνουν, αναμένεται να αυξηθούν κατά πολύ οι παρεχόμενες υπηρεσίες και η ποιότητα των ήδη υπάρχοντων με στόχο την βελτίωση της συνολικής εμπειρίας των χρηστών.

## Κεφάλαιο 6 : Το Λογισμικό Riverbed Modeler

### 6.1 Εισαγωγή

Η εφαρμογή Modeler της Riverbed [30] παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον σχεδιασμού δικτύων επικοινωνιών και κατανεμημένων συστημάτων. Τόσο η συμπεριφορά όσο και η επίδοση των σχεδιασμένων σε αυτό μοντέλων μπορούν να αναλυθούν εκτελώντας προσομοιώσεις διακριτών γεγονότων (discrete event simulations). Το πρόγραμμα ενσωματώνει εργαλεία για όλες τις φάσεις της μελέτης μιας προσομοίωσης, περιλαμβάνοντας σχεδιασμό μοντέλων, προσομοίωση, συλλογή και ανάλυση στοιχείων, ενώ παράλληλα επιτρέπει στο σχεδιαστή μηχανικό να επέμβει κατά τη σχεδίαση και ανάλυση ποικιλοτρόπως.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά του προγράμματος που το καθιστούν ως μια από τις καλύτερες επιλογές για την σχεδίαση και προσομοίωση τηλεπικοινωνιακών δικτύων είναι : ο εξειδικευμένος σχεδιασμός του για συστήματα επικοινωνιών, η ιεραρχική δομή του, η γραφική αναπαράσταση, η παροχή εργαλείων ανάλυσης αποτελεσμάτων, υψηλή ταχύτητα προσομοίωσης, η δυνατότητα ελέγχου σφαλμάτων του κώδικα, η δυνατότητα οπτικής προσομοίωσης (animation) και η ικανότητα διασύνδεσης με άλλα προγράμματα(HLA).

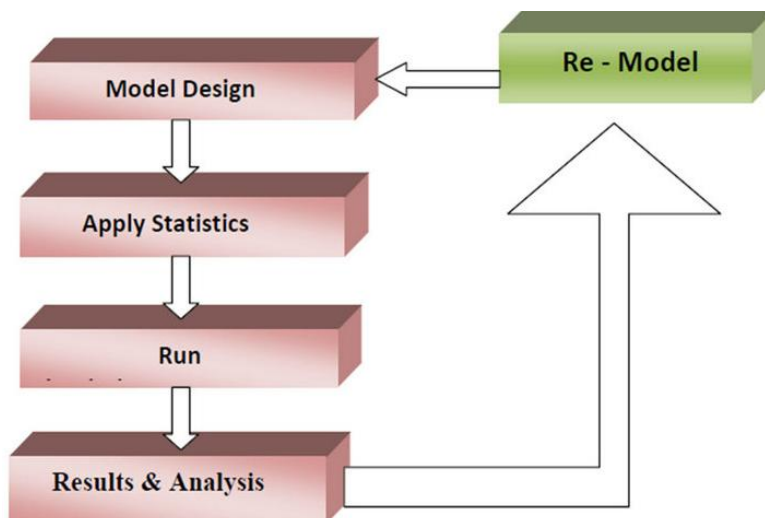
- Το πρόγραμμα Riverbed Modeler είναι εξειδικευμένο για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση συστημάτων επικοινωνίας. Είναι εξοπλισμένο με μια τεράστια βιβλιοθήκη εμπορικών και όχι συσκευών που σε συνδυασμό με τον τεράστιο αριθμό πρωτοκόλλων που υποστηρίζει, επιτρέπει στους χρήστες του να μοντελοποιήσουν και να προσομοιώσουν πολύ εύκολα περίπλοκα συστήματα.
- Η σχεδίαση του που βασίζεται σε ιεραρχική δομή, που είναι ίδια με τη δομή ενός πραγματικού δικτύου, κάνοντας με αυτό τον τρόπο ευκολότερη την υιοθέτηση του τρόπου λειτουργίας του από τηλεπικοινωνιακούς μηχανικούς.
- Η γραφική αναπαράσταση όλων των δυνατών κόμβων ενός δικτύου και η επεξήγηση που υπάρχει για τον τρόπο λειτουργίας και τις ιδιαιτερότητες του κάθε «αντικειμένου-κόμβου», βοηθάει τους χρήστες να κατανοήσουν και να χρησιμοποιήσουν τους σωστούς κόμβους ανάλογα με την εφαρμογή.
- Το πρόγραμμα παρέχει μια μεγάλη προσχεδιασμένη λίστα επιλογών για τα δεδομένα που επιθυμείται να συλλεχθούν, ενώ παράλληλα επιτρέπει στους χρήστες να ορίσουν παραμέτρους που ενδιαφέρουν για κάθε εφαρμογή και να συλλέξουν πληροφορίες σχετικά με αυτές.
- Εξαιτίας του ιεραρχικού σχεδιασμού και της δυνατότητας προσομοίωσης διακριτών γεγονότων εν παραλλήλω με ταυτόχρονη εκτέλεση πολλαπλών νημάτων (multi-threading), επιτυγχάνεται υψηλότερη ταχύτητα προσομοίωσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μπορεί να γίνει προσομοίωση αρκετών εκατομμύριων συμβάντων που αφορούν λειτουργία πραγματικού δικτύου για διάστημα μίας ημέρας σε μόλις 10 λεπτά της ώρας.

- Επειδή το πρόγραμμα παρέχει μια πλατφόρμα που βασίζεται σε μια παραλλαγή της γλώσσας προγραμματισμού C/C++ (proto-C), ένα τηλεπικοινωνιακός μηχανικός που έχει παράλληλα γνώσεις προγραμματισμούς, μπορεί να εισάγει δικό του κώδικα και να εξάγει πληροφορίες ειδικού ενδιαφέροντος. Σε περιπτώσεις όμως που επιθυμείται ο έλεγχος της εκτέλεσης του κώδικα, το πρόγραμμα προσφέρει λύσεις εντοπισμού και προτείνει διορθώσεις σφαλμάτων (debugger).
- Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, υπάρχει δυνατότητα οπτικής απεικόνισης μεταβολής της κίνησης, τόσο στο επίπεδο των κόμβων του δικτύου (προβολή κινούμενων χρηστών σε εφαρμογές ασύρματων ζεύξεων) όσο και στο επίπεδο της κίνησης πακέτων μεταξύ των κόμβων.
- Η ικανότητα διασύνδεσης και ανταλλαγής δεδομένων σε ζωντανό χρόνο με άλλα προγράμματα, που επιτυγχάνεται είτε με χρήση της μονάδας αρχιτεκτονικής υψηλού επιπέδου(HLA), είτε με επίκληση δεδομένων από το πρόγραμμα μέσω της μονάδας Esys. Και οι δύο επιλογές προσφέρονται από το Riverbed Modeler και επιτρέπουν τη διασύνδεση τόσο με άλλα προγράμματα προσομοίωσης ή υπολογιστικά πακέτα (π.χ. Matlab), όσο και με πραγματικές συσκευές, όπως δρομολογητές και υπολογιστές. [31]

## 6.2 Αρχιτεκτονική Riverbed Modeler

Το λογισμικό αποτελείται από έναν σύνολο εργαλείων, κάθε ένα από τα οποία εστιάζει σε συγκεκριμένες πλευρές της λειτουργίας ενός δικτύου και των υποστρωμάτων αυτού. Αυτά τα εργαλεία μπορούν να μοιραστούν σε τέσσερις μεγάλες ομάδες ανάλογα με τη φάση που βρίσκεται ο σχεδιασμός και η προσομοίωση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Οι φάσεις αυτές είναι : η φάση προσδιορισμού (Specification) του τοπολογικού μοντέλου, του καθορισμού των παραμέτρων και την επιλογή των στατιστικών προς συλλογή, της προσομοίωσης και συλλογής δεδομένων (Simulation and Data collection) και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων (Analysis).

Οι λειτουργίες εφαρμόζονται υποχρεωτικά με τη σειρά που αναφέρθηκε παραπάνω. Σχηματίζουν έναν κυκλικό διάγραμμα ροής, επιστρέφοντας σε αναπροσδιορισμό μετά το πέρας της ανάλυσης. Ο προσδιορισμός διαιρείται σε δύο μέρη : στον αρχικό προσδιορισμό και τον επαναπροσδιορισμό, με μόνο τον τελευταίο να ανήκει στον κύκλο ροής εργασίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.1.



Εικόνα 6. 1 Διάγραμμα ροής εργασίας του προγράμματος

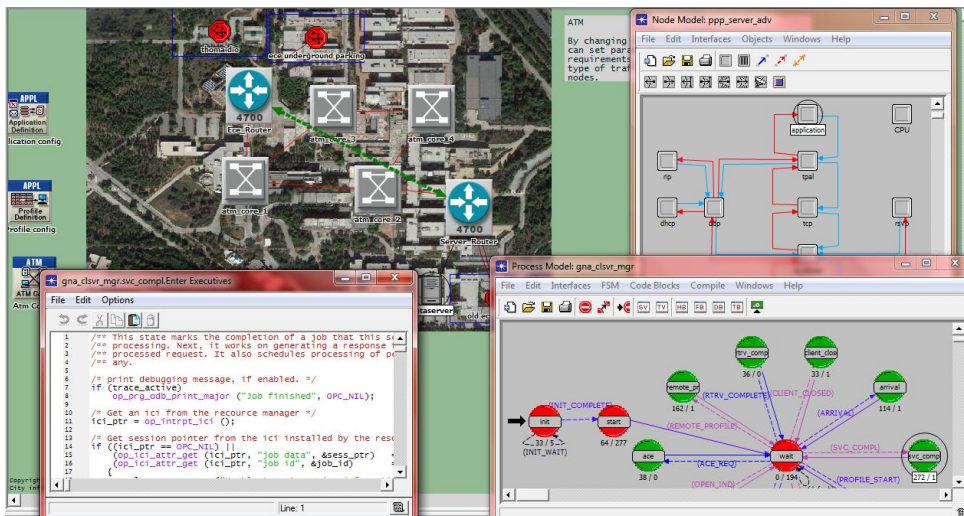
### 6.3 Συντάκτες (Editors)

Ο προσδιορισμός των μοντέλων είναι η στοιχειώδης εργασία της σχεδίασης μιας παρουσίασης του συστήματος που πρόκειται να μελετηθεί. Το πρόγραμμα υποστηρίζει την επαναχρησιμοποίηση των δημιουργούμενων μοντέλων πολλές φορές στο ίδιο δίκτυο. Τα «αντικείμενα-κόμβοι» που έχουν σχεδιασθεί μπορούν να αποθηκευτούν σε κατάλληλους καταλόγους, έτσι ώστε να πραγματοποιείται εύκολα και γρήγορα η αναζήτησή τους. Τα βασικά μοντέλα παρέχονται στο βασικό περιβάλλον του προγράμματος και μπορούν να καλύψουν ένα τεράστιο φάσμα εφαρμογών.

Το πρόγραμμα επιτρέπει τον προσδιορισμό μοντέλων από ένα σύνολο συντακτών που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά και τη συμπεριφορά ενός συστήματος. Επειδή είναι βασισμένο σε μια σειρά συντακτών που απευθύνονται σε διάφορες λειτουργίες ενός συστήματος, το Riverbed Modeler είναι ικανό να προσφέρει συγκεκριμένες δυνατότητες επιλογής σε θέματα που παρουσιάζονται στα δίκτυα επικοινωνιών και τα καταναμεημένα υπολογιστικά συστήματα. Οι συντάκτες αυτοί διαμοιράζουν την απαιτούμενη πληροφορία που συντάσσει το μοντελοποιημένο σύστημα με τρόπο υψηλής συνάφειας που ανταποκρίνεται σε πραγματικά συστήματα. Έτσι, οι συντάκτες Σχεδίου (Project), Κόμβου (Node), Διεργασίας (Process), Μοντέλου ζεύξης (Link Model), Μορφής Πακέτου (Packet Format), Πληροφοριών Ελέγχου Διασύνδεσης (Interface Control Information), Μοντέλου Κεραίας (Antenna Pattern) και Καμπύλης Διαμόρφωσης (Modulation Curve), είναι οργανωμένοι με ιεραρχικό τρόπο. Ο βασικός προσδιορισμός ενός μοντέλου που υλοποιείται στο συντάκτη Σχεδίου βασίζεται σε στοιχεία-κόμβους που ορίζονται στο συντάκτη Κόμβου και αυτός με τη σειρά του χρησιμοποιεί μοντέλα που είναι ορισμένα στο συντάκτη Διεργασιών. Οι υπόλοιποι συντάκτες χρησιμοποιούνται, επιπρόσθετα, για τον καθορισμό διαφόρων μοντέλων δεδομένων και ιδιαίτερων εφαρμογών. [32] Οι σημαντικότεροι συντάκτες και οι εργασίες που επιτελούνται σε αυτούς παρουσιάζονται παρακάτω :

- *Συντάκτης Σχεδίου* : Αποτελεί την βασική μονάδα σχεδιασμού και προσομοίωσης για μοντέλα δικτύων. Το σχεδιαζόμενο μοντέλο κατασκευάζεται από υποδίκτυα (subnets) μέσα στα οποία υπάρχουν κόμβοι. Ο συντάκτης αυτός περιλαμβάνει επίσης δυνατότητες προσομοίωσης και ανάλυσης, αλλά δεν μπορεί να λειτουργήσει χωρίς δεδομένα από τους υπόλοιπους συντάκτες.
- *Συντάκτης Κόμβων* : Χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό μοντέλων κόμβων. Τα μοντέλα αυτά είναι αντικείμενα ενός μοντέλου δικτύου. Κάθε κόμβος συντάσσεται από ένα σύνολο αλληλοεπιδρώντων στοιχείων από μοντέλα διεργασιών.
- *Συντάκτης Διεργασίας* : Αποτελεί την καρδιά όλου του συστήματος, αφού σε αυτή τη μονάδα σχεδιασμού βασίζεται η ορθή λειτουργία όλου του δικτύου. Τα μοντέλα διεργασιών ελέγχουν τη συμπεριφορά των στοιχείων, ενώ παρέχουν τη δυνατότητα μεταβολής και ελέγχου πολλών επιθυμητών παραμέτρων.
- *Συντάκτης Μοντέλου Ζεύξης* : Δημιουργεί, επεξεργάζεται (edits), και προβάλλει μοντέλα συνδέσεων μεταξύ των κόμβων. Ορίζονται παράμετροι, όπως οι απώλειες ανά χιλιόμετρο σε dB και η υποστηριζόμενη ταχύτητα μετάδοσης.
- *Συντάκτης Μορφής Πακέτου* : Επιτρέπει τη δημιουργία μοντέλων πακέτων διαφόρων μορφών. Η μορφή του πακέτου μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με την εφαρμογή. Μέσω αυτής μπορούν να οριστούν διαφορετικές παράμετροι, όπως είναι η δομή του πακέτου σε τμήματα και επικεφαλίδες (header), ενώ ταυτόχρονα προβλέπει τον τρόπο που διατάσσεται η αποθηκευμένη πληροφορία σε αυτό.
- *Συντάκτης Πληροφοριών Ελέγχου Διασύνδεσης* : Είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία, την επεξεργασία και την προβολή των διαφόρων μορφών των πληροφοριών ελέγχου διασύνδεσης. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία ελέγχου μεταξύ διεργασιών.
- *Συντάκτης Μοντέλου Κεραίας* : Δημιουργεί, επεξεργάζεται και προβάλλει μοντέλα κεραίων ειδικών εφαρμογών για τους πομπούς και τους δέκτες.
- *Συντάκτης Καμπύλης Διαμόρφωσης* : Δημιουργεί, επεξεργάζεται και προβάλλει καμπύλες διαμόρφωσης για τους πομπούς.

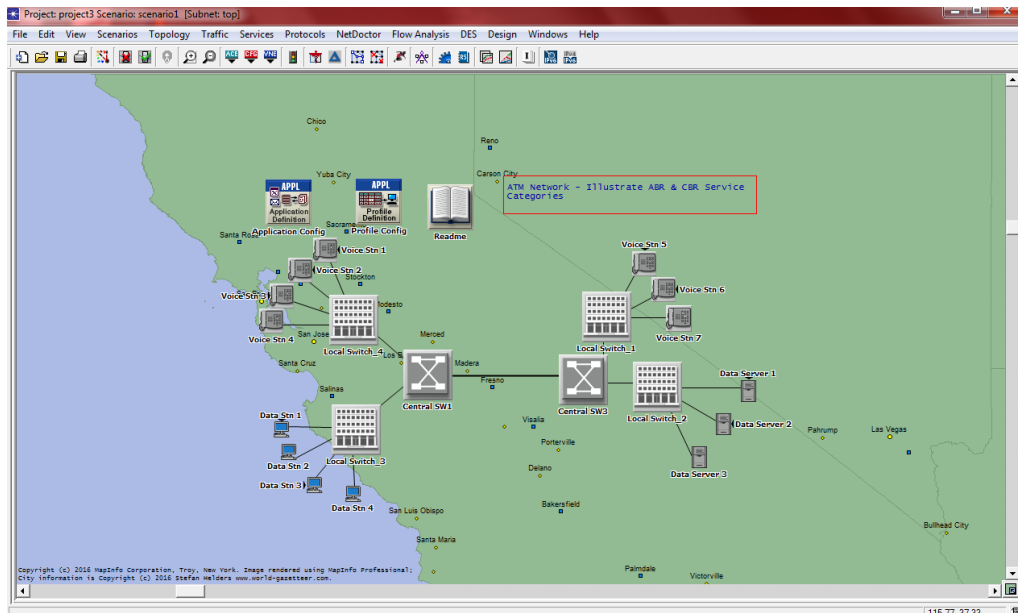
Το Riverbed Modeler αναπαριστά με γραφικό τρόπο μοντέλα όλων των συντακτών διευκολύνοντας την πλοήγηση και βελτιώνοντας της συνολική εμπειρία του χρήστη. Κάθε μοντέλο ιεραρχείται στους επιμέρους συντάκτες με μοναδική ονομασία, ενώ συνοδεύεται από επιπρόσθετη βιβλιογραφία που αφορά τη λειτουργία του. Κάθε συντάκτης έχει τα δικά του σετ αντικειμένων και λειτουργιών που είναι κατάλληλο για το σκοπό στον οποίο επικεντρώνεται. Για παράδειγμα, ο συντάκτης Σχεδίου χρησιμοποιεί αντικείμενα κόμβων και συνδέσεων, ο συντάκτης Κόμβου περιέχει επεξεργαστές, ουρές, πομπούς, δέκτες και διεπαφή σύνδεσης με εξωτερική πηγή δεδομένων (Esys), ενώ ο συντάκτης Διεργασιών βασίζεται στη θεωρία αυτομάτων, τα οποία αποτελούνται από ένα σύνολο καταστάσεων (States) και μεταβάσεων (transitions). Ως αποτέλεσμα, τα διαγράμματα εργασίας που δημιουργούνται σε κάθε συντάκτη έχουν μια ξεχωριστή εμφάνιση[Εικόνα 6.2].



Εικόνα 6. 2 Οι 3 συντάκτες Project, Node και Process

### 6.3.1 Συντάκτης Σχεδίου (Project editor)

Ο συντάκτης σχεδίου χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της τοπολογίας ενός δικτύου επικοινωνιών. Οι οντότητες επικοινωνίας καλούνται κόμβοι, ενώ οι ιδιαίτερες δυνατότητες του κάθε κόμβου καθορίζονται από το σχεδιασμό των μοντέλων τους. Τα μοντέλα αυτά κατασκευάζονται με τη βοήθεια του συντάκτη κόμβου. Μέσα στο ίδιο μοντέλο δικτύου μπορεί να υπάρχουν πολλοί κόμβοι που βασίζονται στο ίδιο μοντέλο κόμβου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο όρος «στιγμιότυπο κόμβου» (node instance), έτσι ώστε να γίνεται αναφορά σε κάθε ξεχωριστό κόμβο, ανεξάρτητα αν χαρακτηρίζεται με μεγάλη ομοιότητα με κάποιον άλλο κόμβο του δικτύου. Όταν ο όρος κόμβος χρησιμοποιείται του πεδίου δικτύου, μπορεί να θεωρηθεί ότι αναφέρεται σε ένα στιγμιότυπο κόμβου, παρά στο μοντέλο του κόμβου.



Εικόνα 6. 3 Αναπαράσταση ενός δικτύου ATM μέσω του συντάκτη σχεδίου

Το μοντέλο ενός δικτύου μπορεί να κάνει χρήση πολλών διαφορετικών μοντέλων κόμβων. Το πρόγραμμα δε θέτει περιορισμούς στους τύπους των μοντέλων που μπορούν να συνυπάρξουν σε ένα δίκτυο επικοινωνιών, ενώ υιοθετεί μια ανοικτή προσέγγιση σύμφωνα με την οποία οι σχεδιαστές μπορούν να αναπτύξουν τη δική τους βιβλιοθήκη από μοντέλα κόμβων που θα χρησιμοποιηθούν ως δομικές μονάδες για μοντέλα δικτύων. Επιπρόσθετα, δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των κόμβων που μπορεί να περιέχει ένα δίκτυο.

Ο συντάκτης Σχεδίου μπορεί να λάβει δεδομένα σχετικά με το γεωγραφικό πλαίσιο για την ανάπτυξη των μοντέλων δικτύου. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παραπάνω ικανότητα όταν πρόκειται να μελετηθούν δίκτυα ασύρματης μετάδοσης, στα οποία η γεωγραφική θέση των κόμβων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα που λαμβάνονται. Μπορούν να επιλεγούν περιοχές στον κόσμο ή χάρτες χωρών ή ακόμη και χάρτες δρόμων, ευρωπαϊκών ή εθνικών δικτύων για τα στοιχεία δικτύων ευρείας περιοχής (wide area networks). Υπάρχει επίσης, δυνατότητα καθορισμού περιοχών με συγκεκριμένες διαστάσεις για χρήση σε εφαρμογές που αφορούν τοπικά δίκτυα (local area networks). Σύμφωνα με τα δεδομένα που ορίζονται για το δίκτυο αλλά και τους χάρτες εδάφους (terrain maps) που μπορεί να έχουν φορτωθεί στο πρόγραμμα, καθίσταται δυνατός ο αυτόματος υπολογισμός της καθυστέρησης επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων.

Για την υλοποίηση μοντέλων δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο είδη κόμβων, όσον αφορά την κινητικότητα. Το ένα είναι ο σταθερός κόμβος επικοινωνίας (fixed Communication Node) ένα το άλλο είδος είναι ο κινούμενος. Οι κόμβοι σταθερού τύπου προστίθενται στο συντάκτη σχεδίου σε συγκεκριμένες θέσεις, αλλά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης οι θέσεις αυτές δεν μπορούν να μεταβληθούν. Το Riverbed Modeler επιτρέπει στα δίκτυα να περιέχουν σταθερούς κόμβους, αλλά και κινητούς (mobile) και δορυφορικούς (satellite) κόμβους. Στους κινητούς κόμβους μπορούν να οριστούν προκαθορισμένες τροχιές, που προσδιορίζουν τις κινήσεις που εκτελεί ένα κόμβος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης. Στους δορυφορικούς κόμβους μπορούν επίσης να ανατεθούν τροχιές οι οποίες ορίζουν την κίνηση τους.

Οι περισσότεροι κόμβοι προϋποθέτουν την εγκαθίδρυση επικοινωνίας με κάποιον ή με ένα σύνολο από άλλους κόμβους για να μπορούν να λειτουργήσουν σωστά και να δώσουν αποτελέσματα για ένα μοντέλο δικτύου. Για την διασύνδεση μεταξύ των επιμέρους κόμβων, παρέχεται από το πρόγραμμα μια πληρέστατη βιβλιοθήκη με τύπους συνδέσεων που αναπαριστούν τις προδιαγραφές πρωτοκόλλων, τις επιδόσεις σε ταχύτητες, αλλά και το υλικό κατασκευής ζευκτών που κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται ευρέως ανά τον κόσμο. Υπάρχουν συνδέσεις μονόδρομης (simplex) και αμφίδρομης (duplex) επικοινωνίας σημείου-προς-σημείο (point-to-point) για τη σύνδεση κόμβων σε ζευγάρια αλλά και με χρήση διαύλου δεδομένων (bus link) για να είναι εφικτή η μετάδοση δεδομένων παράλληλα σε μεγάλες ομάδες από σταθερούς κόμβους. Το πρόγραμμα είναι σχεδιασμένο, ώστε να επιτρέπει σε κινητούς και δορυφορικούς κόμβους να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω συνδέσεων στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων (radio links). Ενώ ο δίαυλος και οι σημείου-προς-σημείο συνδέσεις

μοντελοποιούνται ως αντικείμενα από τον αντίστοιχο συντάκτη, οι ασύρματες ζεύξεις υπολογίζονται δυναμικά βασισμένες σε χαρακτηριστικά των κόμβων επικοινωνίας και του γενικότερου σχεδιασμού της τοπολογίας. Κάθε τύπος ζεύξης μπορεί να υλοποιηθεί με τις επιθυμητές παραμέτρους.

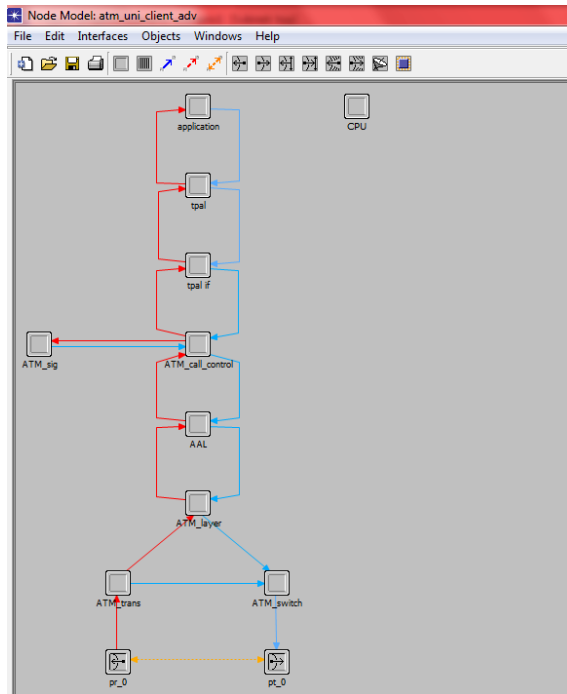
Για τη μείωση της πολυπλοκότητας και για την απλοποίηση της ανάθεσης διευθύνσεων κόμβων του δικτύου, πολλά μεγάλα δίκτυα υποδιαιρούνται σε υποδίκτυα (subnetwork), με στόχο να καθίσταται ευκολότερα διαχειρίσιμη τη τοπολογία. Το υποδίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων που λαμβάνονται υπόψιν και στο μεγαλύτερο δίκτυο. Το πρόγραμμα παρέχει σταθερά, κινητά και δορυφορικά υποδίκτυα για τη βελτίωση των μοντέλων δικτύου που μπορούν να συνδεθούν με διάφορους τύπους ζεύξεων επικοινωνίας, που εξαρτώνται από τον τύπο του υποδικτύου. Το μεγαλύτερο δίκτυο μπορεί περιέχει, τόσο κόμβους όσο και υποδίκτυα. Υπάρχει δυνατότητα να σχηματίσει δίκτυο από υποδίκτυα, που με τη σειρά τους σχηματίζονται από άλλα υποδίκτυα, και ούτω καθεξής. Στο τέλος αυτής της ιεραρχίας, το υποδίκτυο στο χαμηλότερο επίπεδο αποτελείται μόνο από κόμβους και συνδέσεις, από όπου μεταδίδονται δεδομένα προς τα δίκτυα των ανωτέρων επιπέδων.

### 6.3.2 Συντάκτης Κόμβου (Node editor)

Ο συντάκτης κόμβου παρέχει εργαλεία για το σχεδιασμό συσκευών επικοινωνίας που μπορούν να αναπτυχθούν και να διασυνδεθούν στο επίπεδο δικτύου. Ανεξάρτητα με το είδος της συσκευής, το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται τα πάντα ως κόμβους. Οι κόμβοι στον πραγματικό κόσμο μπορούν να ανταποκρίνονται σε διάφορους τύπους εξοπλισμού υπολογισμού και επικοινωνίας όπως δρομολογητές, γέφυρες, σταθμοί εργασίας, τερματικά, μεταγωγείς, βάσεις δεδομένων και εξυπηρετητές.

Τα μοντέλα κόμβου κατασκευάζονται στον συντάκτη Κόμβου και αποτελούνται από διάφορα δομικά στοιχεία (modules). Στα στοιχεία αυτά ορίζονται παράμετροι του κόμβου, ενώ με τον συνδυασμό πολλών στοιχείων μπορεί να οριστεί η πλήρης λειτουργική συμπεριφορά του κόμβου. Τα δομικά στοιχεία μπορεί να λάβουν, επίσης, ειδική μορφή, όπως : γεννήτριες μηνυμάτων, επεξεργαστές, στοιχείο εισαγωγής εξωτερικών δεδομένων(Esys module) και διάφορους πομπούς και δέκτες που επιτρέπουν σε έναν κόμβο να συμμετέχει σε ζεύξεις επικοινωνίας στο επίπεδο του Δικτύου. Οι επεξεργαστές (processors) και οι ουρές (queues), είναι προγραμματιζόμενα και η συμπεριφορά τους ορίζεται από ένα μοντέλο διεργασίας που τους αντιστοιχεί. Τα μοντέλα διεργασίας συντίθενται από τον συντάκτη Διεργασίας. Μια αναπαράσταση του εσωτερικού ενός κόμβου που βασίζεται στο πρωτόκολλο ATM, δίνεται στην εικόνα 6.4.





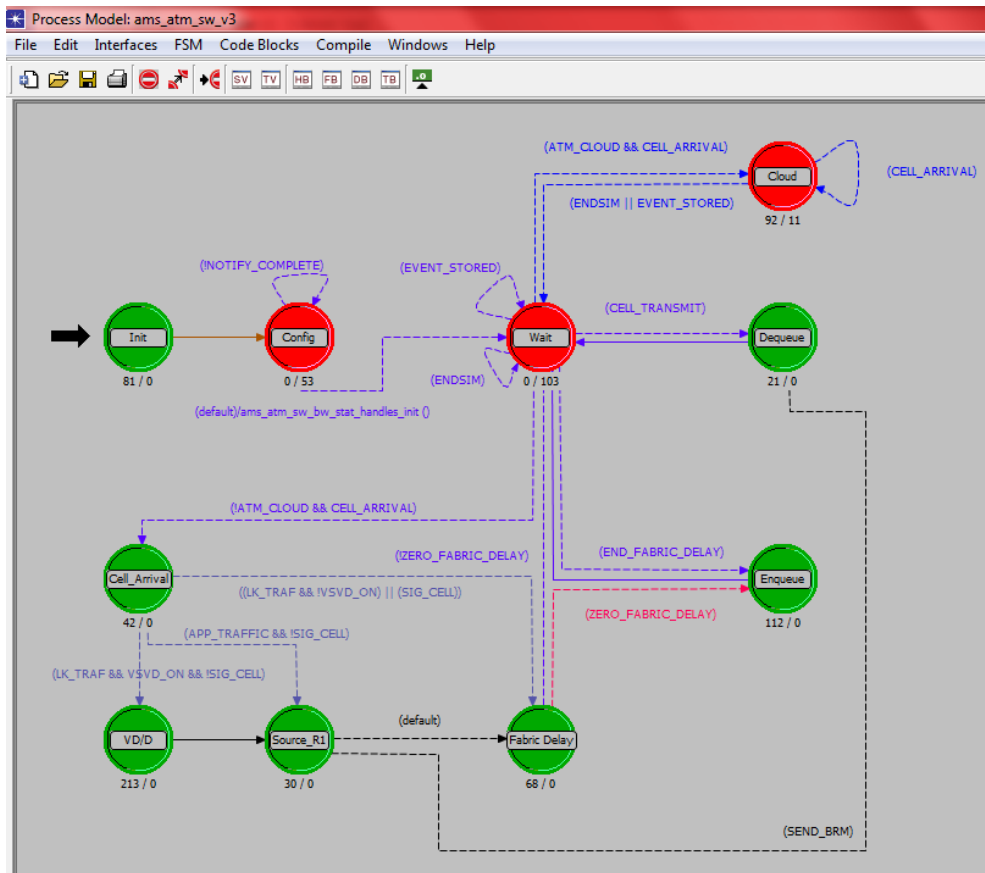
Εικόνα 6. 4 Εσωτερική δομή ενός κόμβου ATM.

Ένα μοντέλο κόμβου μπορεί να αποτελείται από ένα σύνολο στοιχείων πολλών διαφορετικών τύπων. Για την αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων του κόμβου χρησιμοποιούνται 3 είδη σύνδεσης. Οι συνδέσεις μπορεί να εκφράζουν ροή πακέτου (packet stream), ροή στατιστικών δεδομένων (statistic wires) και λογικές συσχετίσεις (logical associations). Οι συνδέσεις ροής πακέτου επιτρέπουν στα πακέτα που δημιουργούνται να μεταβιβάζονται από το ένα στοιχείο στο άλλο για περαιτέρω επεξεργασία. Η ροή στατιστικών δεδομένων αποστέλλει σήματα με στατιστικές πληροφορίες ή πληροφορίες ελέγχου μεταξύ στοιχείων και χρησιμοποιούνται όταν ένα στοιχείο επιθυμεί να ελέγξει τις επιδόσεις ή την κατάσταση ενός άλλου. Η λογική συσχέτιση προσδιορίζει μια σύνδεση μεταξύ στοιχείων και ορίζει ένα λογικό δεσμό μεταξύ τους. Συσχετίσεις αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται μεταξύ πομπών και δεκτών, ώστε να δηλωθεί ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως ζεύγος όταν ο κόμβος συμμετέχει σε μια ζεύξη στο πεδίο Δικτύου.

### 6.3.3 Συντάκτης Διεργασίας (Process editor)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην παράγραφο για τον συντάκτη Κόμβου, τα περισσότερα από τα δομικά στοιχεία που τους αποτελούν, όπως οι επεξεργαστές και οι ουρές είναι προγραμματιζόμενα από το χρήστη. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία αποτελείται με τη σειρά του από ένα σύνολο διεργασιών, οι οποίες συντίθενται και δίνουν στα στοιχεία ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Μια διεργασία μπορεί με πολλούς τρόπους να θεωρηθεί όμοια με ένα ανεξάρτητο πρόγραμμα λογισμικού που βρίσκεται υπό εκτέλεση ή να ληφθεί υπόψιν ως ένα κομμάτι κώδικα, μια συνάρτηση, ενός μεγαλύτερου προγράμματος, που καλείται από μια κεντρική συνάρτηση. Υπάρχουν δυνατότητες αντίστοιχες με αυτές μια κοινής

προγραμματιζόμενης εφαρμογής, όπως αποθήκευση και αναφορά στη μνήμη. Οι διεργασίες βασίζονται σε μοντέλα διεργασιών που καθορίζονται στο συντάκτη Διεργασίας. Η σχέση μεταξύ του μοντέλου διεργασίας και της διεργασίας είναι όμοια με τη σχέση μεταξύ ενός προγράμματος και μιας συγκεκριμένης συνεδρίας του προγράμματος, που εκτελείται ως μια στοιχειώδης λειτουργία. Όπως οι κόμβοι που χρησιμοποιούνται στο συντάκτη Σχεδίου, είναι στιγμιότυπα των μοντέλων τους που προσδιορίζονται στο συντάκτη Κόμβου, έτσι και οι διεργασίες που εκτελούνται σε μια ουρά ή σε ένα επεξεργαστή είναι στιγμιότυπα συγκεκριμένων μοντέλων διεργασίας. Στην εικόνα 6.5 παρουσιάζεται η εσωτερική δομή υλοποίησης του μοντέλου μεταγωγής ATM, στον συντάκτη διεργασίας.



Εικόνα 6. 5 Μοντέλο διεργασιών για την υλοποίηση της μεταγωγής ATM.

Η σύνθεση διεργασιών στο Riverbed Modeler μπορεί να πραγματοποιηθεί ορίζοντας ομάδες διεργασιών. Μια ομάδα διεργασιών αποτελείται από πολλαπλές διεργασίες που εκτελούνται στον ίδιο εξυπηρετητή ή ουρά με μια συγκεκριμένη σειρά. Όταν αρχίζει η προσομοίωση του τηλεπικοινωνιακού μοντέλου, κάθε στοιχείο έχει μια διεργασία, από την οποία εκκινεί πάντα η διαδικασία που διατρέχει τον κώδικα. Αυτή η διεργασία είναι γνωστή ως ρίζα (root process) ή αρχική κατάσταση (initial state), όπως ορίζεται από τη θεωρία αυτομάτων. Αυτή η διεργασία καλεί άλλες διεργασίες που με τη σειρά τους μπορούν να καλέσουν περισσότερες και ούτω καθεξής. Όταν μια διεργασία δημιουργεί μια άλλη, αναφέρεται ως «πατέρας» της νέας

διεργασίας, ενώ η νέα διεργασία ονομάζεται το παιδί της διεργασίας που τη δημιούργησε. Για την πρόσβαση μέσω κώδικα στα στοιχεία των διεργασιών πατέρα-παιδιού, χρησιμοποιούνται οι εντολές `op_topo_child()` και `op_topo_parent()` για αναφορά από τη διεργασία-παιδί προς το δημιουργό του. Διεργασίες που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αναφέρονται ως δυναμικές διεργασίες. Το πρόγραμμα δε θέτει περιορισμούς στον αριθμό των διεργασιών που μπορούν να δημιουργηθούν σε ένα συγκεκριμένο στοιχείο, παρόλα αυτά δεν αποτελεί συνετή πρακτική η δημιουργία μεγάλου αριθμού διεργασιών καθώς αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η πολυπλοκότητα και ο χρόνος προσομοίωσης, όταν η σχεδίαση και ο διαμοιρασμός των εργασιών δεν γίνεται σωστά. Διεργασίες μπορούν να δημιουργούνται και να καταστρέφονται σύμφωνα με δυναμικές συνθήκες που αναλύονται από τη λογική των διεργασιών υπό εκτέλεση.

Μόνο μια διεργασία μπορεί να εκτελείται ανά πάσα στιγμή, ενώ θεωρείται ότι βρίσκεται υπό εκτέλεση όταν προχωράει σε νέες εντολές που είναι μέρος του μοντέλου της. Όταν η διεργασία αρχίζει την εκτέλεση της αναφέρεται ως κληθείσα (*invoked*) και μπορεί να καλέσει μια άλλη διεργασία που ανήκει στην ίδια ομάδα προς εκτέλεση. Όταν η δευτερεύουσα διεργασία ολοκληρωθεί, ο δείκτης προσομοίωσης επιστρέφει στην προηγούμενη με μια ένδειξη επιτυχούς ή αποτυχημένης εκτέλεσης. Η διεργασία που έκανε την κλήση συνεχίζει την εκτέλεση από το σημείο που είχε μείνει, με έναν τρόπο όμοιο με τη διαδικασία κλήσης σε μια γλώσσα προγραμματισμού χαμηλού επιπέδου, όπως η C.

Οι διεργασίες είναι σχεδιασμένες για να ανταποκρίνονται σε παρεμβάσεις (*interrupts*) και κλήσεις (*invokes*). Οι παρεμβάσεις είναι γεγονότα που κατευθύνονται προς μια διεργασία και απαιτούν από αυτή να ακολουθήσει κάποια διαδικασία. Μπορεί να δημιουργούνται από την ίδια τη διεργασία για τον εαυτό της ή από διεργασία-γονέα προς κατώτερες της. Οι παρεμβάσεις αναφέρονται σε γεγονότα όπως άφιξη μηνυμάτων, μηδενισμός μετρητών, απελευθέρωση πόρων ή αλλαγή κατάστασης στοιχείων. Αν μια διεργασία κληθεί εξαιτίας μιας παρέμβασης, μπορεί να καλέσει άλλες διεργασίες της ίδιας ομάδας και αυτές με τη σειρά τους μπορούν να καλέσουν άλλες διεργασίες, ενώ η επεξεργασία μιας παρέμβασης ολοκληρώνεται όταν περατωθεί η πρώτη διεργασία που κλήθηκε.

Ο συντάκτης Διεργασίας εκφράζει μοντέλα διεργασιών σε μια γλώσσα που ονομάζεται Proto-C, η οποία σχεδιάστηκε ειδικά για να παρέχει υποστήριξη στο σχεδιασμό πρωτοκόλλων και αλγορίθμων. Η Proto-C βασίζεται σε ένα συνδυασμό από διαγράμματα μεταβάσεων κατάστασης (*state transition diagrams-STDs*) που ακολουθούν τη θεωρία αυτομάτων και συγκεκριμένα των μηχανών πεπερασμένης κατάστασης (*finite state machine*), από μια βιβλιοθήκη εντολών υψηλού επιπέδου, που είναι γνωστές ως διαδικασίες πυρήνα (*Kernel Procedures*) και τις γλώσσες προγραμματισμού C και C++. Τα διαγράμματα μετάβασης καταστάσεων (*STDs*) ενός μοντέλου διεργασίας καθορίζουν ένα σετ από βασικές καταστάσεις στις οποίες η διεργασία μπορεί να εισχωρήσει και, για κάθε κατάσταση, τις συνθήκες που θα προκαλέσουν μια διεργασία να μετακινηθεί σε μια άλλη κατάσταση. Η συνθήκη που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μια συγκεκριμένη αλλαγή κατάστασης, καλούνται συνθήκες μετάβασης. Οι μεταβάσεις εικονίζονται

ως διακεκομμένες ή συνεχείς γραμμές, ανάλογα με το αν υπάρχει συνθήκη μετάβασης ή όχι, στην εικόνα 6.5.

Η Proto-C, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σχεδιάστηκε για τη μοντελοποίηση πρωτοκόλλων και αλγορίθμων. Είναι εμπλουτισμένη με μια εκτενή βιβλιοθήκη από εντολές διαδικασιών πυρήνα (Kernel Procedures) που καλούνται κατά την εκτέλεση των εφαρμογών. Οι διαδικασίες αυτές είναι ομαδοποιημένες ανάλογα με τις λειτουργίες που εκτελούν.

Ορίζονται δύο διαφορετικοί τύποι καταστάσεων, οι εξαναγκασμένες (forced) και οι μη εξαναγκασμένες (unforced), που διαφέρουν στον τρόπο εκτέλεσης τους. Στα διαγράμματα, οι εξαναγκασμένες καταστάσεις παριστάνονται γραφικά ως πράσινοι κύκλοι και εκτελούνται είτε πραγματοποιηθεί μια συνθήκη είτε όχι, και οι μη εξαναγκασμένες σχεδιάζονται ως κόκκινοι κύκλοι και εκτελούνται μόνο αν ικανοποιείται κάποια συνθήκη, όταν υπάρχει. Οι ενέργειες σε μια κατάσταση καλούνται στελέχη (executives) και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες : στα στελέχη εισόδου (enter executives) και τα στελέχη εξόδου (exit executives). Όπως υποδεικνύουν τα ονόματα, τα στελέχη εισόδου μιας κατάστασης εκτελούνται όταν μια διεργασία εισέρχεται στην κατάσταση και τα στελέχη εξόδου, όταν η διεργασία την εγκαταλείπει.

Οι μη εξαναγκασμένες καταστάσεις επιτρέπουν μια παύση μεταξύ των εκτελέσεων εισόδου και αυτών της εξόδου και έτσι μπορούν να μοντελοποιήσουν πραγματικές καταστάσεις ενός συστήματος. Όταν μια διεργασία ολοκληρώσει τις εκτελέσεις εισόδου μιας μη εξαναγκασμένης κατάστασης, μπλοκάρεται και επιστρέφει τον έλεγχο στο προηγούμενο πλαίσιο εφαρμογής που την κάλεσε. Αντίθετα, οι εξαναγκασμένες καταστάσεις δεν επιτρέπουν στη διεργασία να περιμένει. Οι εκτελέσεις εξόδου εκτελούνται από μια διεργασία αμέσως μετά την ολοκλήρωση των εκτελέσεων εισόδου. Συνήθως, χρησιμοποιούνται για το γραφικό διαχωρισμό λειτουργιών ή για τις αποφάσεις της ροής ελέγχου που είναι κοινές σε πολλές μη εξαναγκασμένες καταστάσεις.

#### 6.4 Παράλληλη προσομοίωση Riverbed Modeler και Matlab

Τα βασικά χαρακτηριστικά του προγράμματος Riverbed Modeler παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Ένα ιδιαίτερο προτέρημα της εφαρμογής, το οποίο πρόκειται να αξιοποιηθεί στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι η δυνατότητα διασύνδεσης του προγράμματος με πραγματικές συσκευές ή άλλα υπολογιστικά πακέτα και τη διενέργεια παράλληλης προσομοίωσης μεταξύ των δύο εφαρμογών.

Το πρόγραμμα Riverbed Modeler αποτελεί ίσως τη βέλτιστη εμπορική επιλογή, όταν πρόκειται να μελετηθεί ο σχεδιασμός και η υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών μοντέλων. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα από την προσομοίωση μιας μελέτης τέτοιου τύπου έχουν μεγάλη συνάφεια με αυτά που θα προέκυπταν σε ένα πραγματικό σύστημα, λόγω της λεπτομερούς ακρίβειας κατά τη σχεδίαση του μοντέλου που παρέχεται από το πρόγραμμα.

Όταν πρόκειται, όμως, να μελετηθεί ένα σύστημα που πέρα από το τηλεπικοινωνιακό μοντέλο, ενδιαφέρουν και άλλες πτυχές του συστήματος, τότε το πρόγραμμα Riverbed Modeler δεν επαρκεί για τον πλήρη προσδιορισμό του συστήματος. Είναι προφανές ότι δεν μπορούν να προβλεφθούν και να κατασκευαστούν από την εταιρία, αντίστοιχες βιβλιοθήκες για όλες τις δυνατές εφαρμογές που μπορούν να έχουν τα τηλεπικοινωνιακά μοντέλα σε άλλους τομείς έρευνας, ώστε να καλυφθούν και αυτοί μέσα από μια ενιαία εφαρμογή. Αντ' αυτού παρέχεται η δυνατότητα διασύνδεσης του προγράμματος με άλλα λογισμικά, αποστέλλοντας ή δεχόμενο δεδομένα από ή προς τις εξωτερικές πηγές/εφαρμογές. Εξάλλου, ακόμα και αν δημιουργούσε η εταιρία τις προϋποθέσεις ώστε να μελετηθούν και άλλες παράμετροι πέρα από τους τηλεπικοινωνιακούς, η πολυπλοκότητα του προγράμματος θα αυξανόταν τόσο που θα γινόταν ασύμφορο χρονικά για χρήση.

Για τη διασύνδεση με άλλα λογισμικά και συγκεκριμένα με το Matlab υπάρχουν 3 διαφορετικοί τρόποι. Οι 2 πρώτοι προσφέρονται από το Riverbed Modeler, ενώ η τρίτη μέθοδος προσφέρεται από το Matlab μέσω της διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών (API). Έτσι, η διασύνδεση και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δύο λογισμικών μπορεί να επιτευχθεί :

1. Με χρήση της αρχιτεκτονικής υψηλού επιπέδου (HLA) και
2. της μονάδας εξωτερικού συστήματος, που προσφέρονται από το λογισμικό Riverbed Modeler.
3. Και μέσω της διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών MEX API, που προσφέρεται από το Matlab.

Και οι 3 μέθοδοι διασύνδεσης πλεονεκτούν έναντι των υπολοίπων σε κάποιες περιπτώσεις και ανάλογα με το είδος της εφαρμογής μπορεί να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμες.

#### 6.4.1 Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου (HLA)

Η μονάδα αρχιτεκτονικής υψηλού επιπέδου (HLA) επιτρέπει στους χρήστες του λογισμικού να συμπεριλάβουν μια προσομοίωση του συστήματος τους ως μέλος σε μια ομάδα (federation) HLA, και ως εκ τούτου να επηρεάζουν και να επηρεάζονται από τα γεγονότα άλλων μελών. Η εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων ταυτόχρονα αυξάνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της κάθε προσομοίωσης, παρέχοντας ως τελικό προϊόν της προσομοίωσης αποτελέσματα που μπορούν να υποστηριχθούν και να εφαρμοστούν με μεγάλη ασφάλεια και αξιοπιστία λειτουργίας. Τα μέλη της ομάδας-ομοσπονδίας είναι διάφορα λογισμικά που μπορεί να χρησιμοποιούνται για τη λήψη των ίδιων αποτελεσμάτων. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι κάθε λογισμικό έχει βέλτιστη σχεδίαση και πλεονεκτεί έναντι των άλλων σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, γίνεται αντιληπτό ότι για να καταλήξει κάποιος σε ασφαλή συμπεράσματα, χρειάζεται δεδομένα από όλα τα λογισμικά και ιδανικά επιθυμεί τη χρήση των βέλτιστα σχεδιασμένων κόμβων και προβλεπόμενων παραμέτρων από κάθε λογισμικό. Για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιούνται οι κόμβοι επικοινωνίας στην προσομοίωση κινούμενων κόμβων από το Riverbed Modeler και να λαμβάνεται υπόψιν η υλοποίηση προτύπου όπως περιγράφεται από μια άλλη εφαρμογή. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Modeler με χρήση της

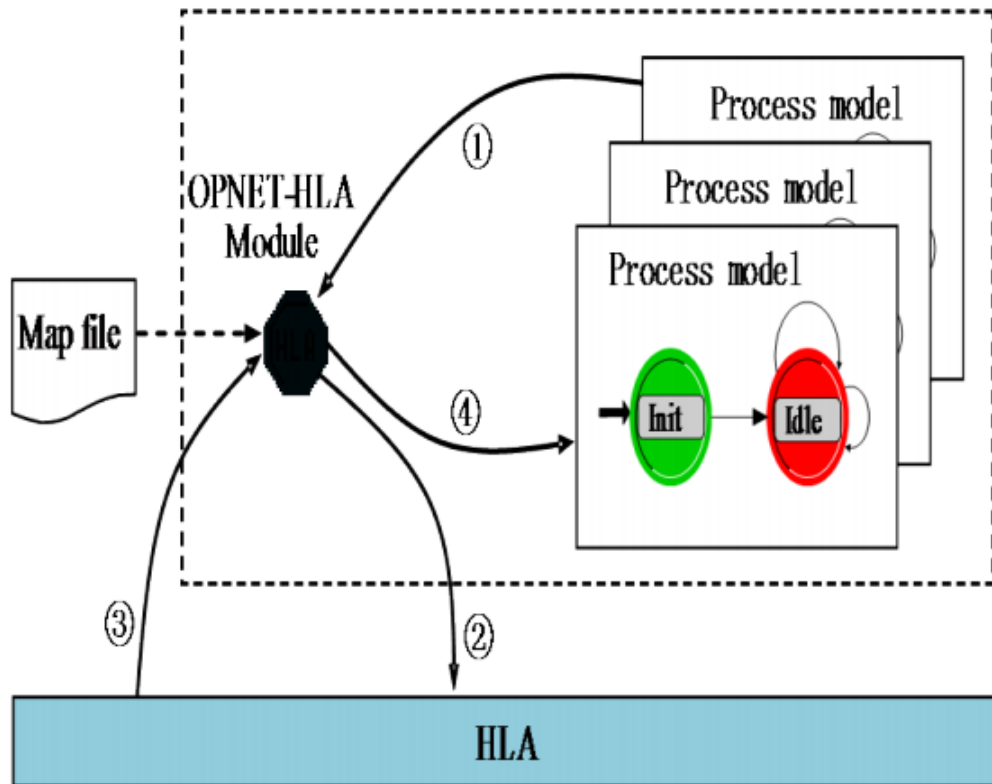
αρχιτεκτονικής υψηλού επιπέδου, μπορούν να προκύπτουν αφού έχουν ληφθεί υπόψιν ως παράμετροι τα δεδομένα του προτύπου από άλλη εφαρμογή. Με αντίστοιχη λογική, όταν τα αποτελέσματα από το Riverbed Modeler αποστέλλονται σε άλλα μέλη-εφαρμογές της ομοσπονδίας, μεταβάλλουν τις παραμέτρους και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών τους.

Το πρότυπο που ακολουθούν όλες οι εφαρμογές με αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου έχει σχεδιαστεί από το γραφείο αμυντικής σχεδίασης και προσομοίωσης DMSO και έχει συμπεριληφθεί στα πρότυπα της IEEE από το 2000 [33], ενώ έχει δημοσιευθεί και μία νεότερη έκδοση του προτύπου το 2010 [34].

Μέσω της μονάδας αρχιτεκτονικής υψηλού επιπέδου το πρόγραμμα Riverbed Modeler :

- Λαμβάνει δεδομένα και μεταβάλλει αυτόματα τις παραμέτρους στους κόμβους και τις διεργασίες του σχεδιαζόμενου δικτύου που προσομοιώνεται.
- Δίνει δυνατότητα εγγραφής σε κάποιο κεντρικό σύστημα, ώστε να λαμβάνονται ειδικές κλάσεις αλληλεπίδρασης HLA, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις οι κλάσεις αυτές μεταδίδονται αυτόματα προς την εφαρμογή ως πακέτα του Modeler. Κάθε παράμετρος αλληλεπίδρασης αντιστοιχεί σε ένα προκαθορισμένο πεδίο πακέτου που έχει οριστεί στο Modeler.
- Μπορεί να δημιουργήσει αλληλεπιδράσεις μεταξύ προσομοιώσεων διαφορετικών λογισμικών πακέτων ή ακόμα και μεταξύ στοιχείων στο ίδιο λογισμικό, όπου η αλληλεπίδραση πραγματοποιείται με τη μορφή μεταδιδόμενων πακέτων.
- Ενημερώνει σε ζωντανό χρόνο τις παραμέτρους που αφορούν το HLA, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους κόμβων και διεργασιών που λαμβάνονται υπόψιν κατά την επόμενη προσομοίωση.

Η διασύνδεση με χρήση της αρχιτεκτονικής υψηλού επιπέδου (HLA) προτείνεται σε περιπτώσεις όπου πρόκειται να πραγματοποιηθούν πολλές παράλληλες προσομοιώσεις, από πολλά διαφορετικά λογισμικά και για εκτενή χρονικά διαστήματα. Μια μονάδα HLA οφείλει να υφίσταται σε κάθε λογισμικό που συμμετέχει στην προσομοίωση, όπως επίσης απαιτείται η ύπαρξη μιας υποδομής ζωντανού χρόνου (RTI-run time infrastructure), για τη διασύνδεση όλων των προγραμμάτων μεταξύ τους σε μια κεντρική βάση ή σε ένα κεντρικό αγωγό επικοινωνίας. Στην εικόνα 6.6 που ακολουθεί παρουσιάζεται συνοπτικά και χωρίς την μονάδα RTI, ένα διάγραμμα ροής του Riverbed Modeler με χρήση αρχιτεκτονικής υψηλού επιπέδου (HLA).



Εικόνα 6. 6 Διάγραμμα ροής του Riverbed Modeler με HLA

#### 6.4.2 Μονάδα εξωτερικού συστήματος (Esys Module)

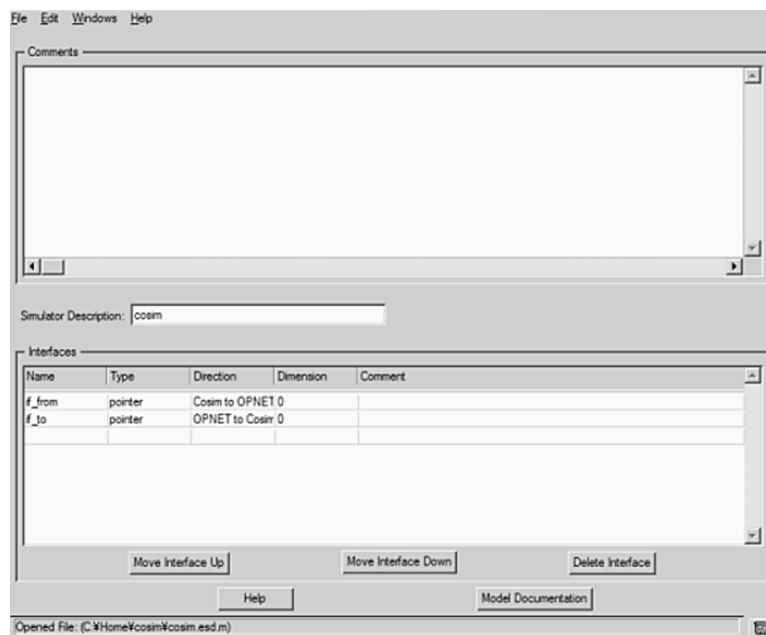
Η δεύτερη μέθοδος που υποστηρίζεται από το λογισμικό Riverbed Modeler και επιτρέπει τη διασύνδεση και μετέπειτα ανταλλαγή πληροφοριών με άλλο λογισμικό, είναι η μονάδα εξωτερικού συστήματος (Esys-external system module). Η μονάδα αυτή επιτρέπει την παρέμβαση ενός τμήματος κώδικα που έχει αναπτυχθεί σε εξωτερική πηγή, από το λογισμικό, ώστε να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό του τρόπου λειτουργίας κάποιας οντότητας του προγράμματος.

Ο έλεγχος από εξωτερική πηγή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιοδήποτε στοιχείο του προγράμματος, από τα στοιχεία ενός κόμβου και τις παραμέτρους αυτού, μέχρι τη μορφή των πακέτων και την περιγραφή της συμπεριφοράς των χρηστών. Το λογισμικό αποστέλλει και λαμβάνει δεδομένα από τη μονάδα εξωτερικού συστήματος χωρίς να γνωρίζει τον τρόπο και τη μέθοδο επεξεργασίας αυτών, δηλαδή για το Riverbed Modeler το εξωτερικό σύστημα είναι ένα μαύρο κουτί που εκτελεί μια άγνωστη προκαθορισμένη λειτουργία.

Το εξωτερικό σύστημα μπορεί να αποτελείται από οποιοδήποτε αριθμό μονάδων (modules), όπως επίσης είναι δυνατόν να υπάρχουν πολλαπλές δίοδοι επικοινωνίας μεταξύ του εξωτερικού

συστήματος και του Riverbed Modeler, οι οποίες στο σύνολο τους να επιτελούν μια επιθυμητή λειτουργία.

Για να είναι σε θέση το λογισμικό να αντιληφθεί ότι επιθυμείται η διασύνδεση και η αποστολή δεδομένων προς άλλο πρόγραμμα, απαιτούνται κάποιες επιπλέον ρυθμίσεις από τον χρήστη, που αφορούν τον καθορισμό στοιχείων στο συντάκτη εξωτερικού συστήματος (ESE-External System Editor). Ο συγκεκριμένος συντάκτης επιτρέπει τον καθορισμό ενός εξωτερικού συστήματος (ESD), προσδιορίζοντας τον αριθμό και των τύπο των διεπαφών του εξωτερικού συστήματος, τον τρόπο που δημιουργείται μια παράλληλη προσομοίωση, την ονομασία ενός αρχείου που χρειάζεται για την περιγραφή του περιβάλλοντος (environmental file), καθώς και άλλες παραμέτρους. Μια απεικόνιση του συντάκτη εξωτερικού συστήματος και του αρχείου που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του συστήματος παρουσιάζονται παρακάτω.



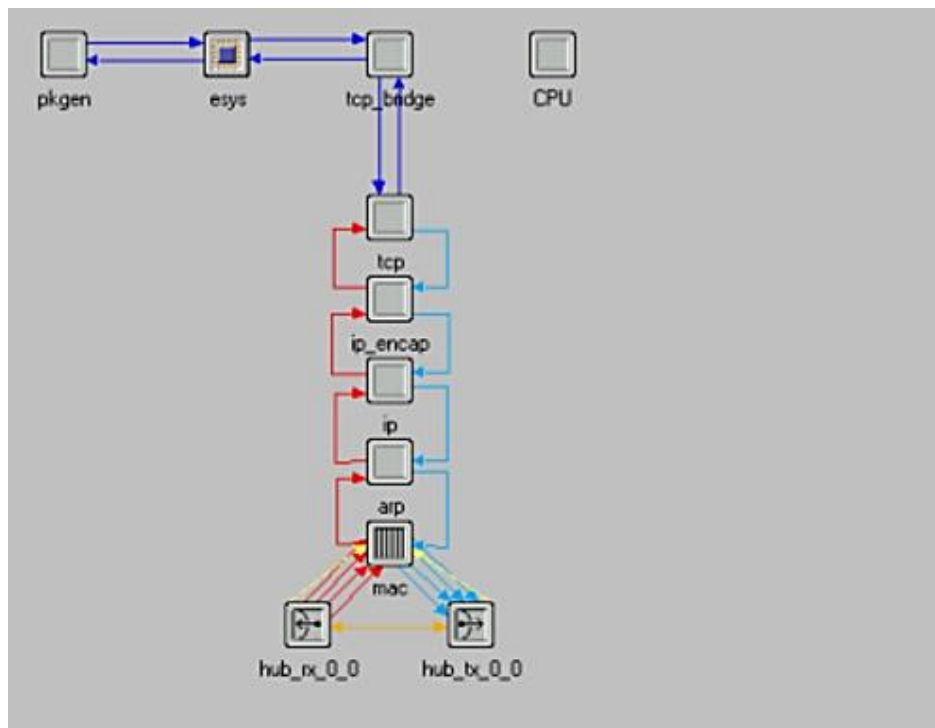
Εικόνα 6. 7 Συντάκτης εξωτερικού συστήματος (ESD)

```
# Simulator Description
start_definition
platform: windows
use_esa_main: no
bind_obj: cosim_external_code2.obj
bind_lib: C:\Program Files\MATLAB\R2011a\extern\lib\win64\microsoft\libeng.lib
bind_lib: C:\Program Files\MATLAB\R2011a\extern\lib\win64\microsoft\libmx.lib
bind_lib: C:\Program Files\MATLAB\R2011a\extern\lib\win64\microsoft\libmat.lib
bind_lib: C:\Program Files\MATLAB\R2011a\extern\lib\win64\microsoft\libmex.lib
bitness: 32bit
kernel: development
end_definition
```

Εικόνα 6. 8 Αρχείο καθορισμού συστήματος (sd-system description)



Όταν ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός όλων των παραμέτρων στο αρχείο ESD και αφού αποθηκευτεί στο χώρο εργασίας του μοντέλου, χρησιμοποιείται η ονομασία του αρχείου .ESD ως παράμετρος στη μονάδα εξωτερικού συστήματος, με αποτέλεσμα η μονάδα να κατέχει πλέον τις απαραίτητες πληροφορίες για τον τρόπο που θα διαχειρίζεται τα δεδομένα που καταλήγουν σε αυτήν. Με τη βοήθεια των παραμέτρων του αρχείου .ESD, εγκαθιδρύεται ένας διάυλος επικοινωνίας μεταξύ του Modeler και ενός εξωτερικού συστήματος. Παρακάτω εικονίζεται η μονάδα εξωτερικού συστήματος, ως στοιχείο στο εσωτερικό ενός κόμβου.



Εικόνα 6. 9 Μονάδα Esys συνδεδεμένη με άλλα στοιχεία.

Όπως φαίνεται, η μονάδα μεσολαβεί μεταξύ ενός στοιχείου που παράγει πακέτα και μιας γέφυρα TCP. Η σύνδεση μεταξύ των τριών στοιχείων είναι αμφίδρομη. Το στοιχείο pk\_gen δημιουργεί πακέτα, στη συνέχεια τα προωθεί στο στοιχείο Esys, το οποίο τα υποδέχεται, εκτελεί κάποια προκαθορισμένη λειτουργία σε εξωτερικό σύστημα και επιστρέφει δεδομένα τόσο προς το στοιχείο pk\_gen, που προσαρμόζουν τον αριθμό ή το μέγεθος των παραγόμενων πακέτων, όσο και προς το στοιχείο tcp\_bridge που υποδέχεται τα δεδομένα από μια φυσική ή ψηφιακή πηγή και τα προωθεί σε ένα δίκτυο που υπακούει σε συγκεκριμένο πρωτόκολλο, όπως είναι το πρωτόκολλο Ethernet.

Εφόσον η διασύνδεση πραγματοποιείται μεταξύ του Riverbed Modeler και ενός εξωτερικού συστήματος, λογισμικού ή κώδικα, τότε γίνεται λόγος για παράλληλη προσομοίωση με μία διεργασία. Στην περίπτωση όμως που το εξωτερικό σύστημα είναι ένας μηχανισμός επικοινωνίας, προς ένα μεγαλύτερο σύστημα, τότε γίνεται λόγο για παράλληλη προσομοίωση πολλαπλών διεργασιών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της δεύτερης περίπτωσης είναι η

διασύνδεση με χρήση της αρχιτεκτονικής υψηλού επιπέδου (HLA) που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η οποία απαιτεί σύστημα υποδομής RTI API, για τον συγχρονισμό και την επιτυχημένη λειτουργία όλου του συστήματος.

#### 6.4.3 Διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών MEX (MEX API Interface)

Το Matlab είναι ένα ευρύτατα γνωστό λογισμικό που χρησιμοποιείται ως υπολογιστικό εργαλείο σε όλους τους τομείς της επιστήμης. Ο μοναδικός σχεδιασμός του και η συνεχής βελτίωση του, τόσο από την ίδια την εταιρία όσο και από την επιστημονική κοινότητα, έχουν θέσει το συγκεκριμένο λογισμικό, μεταξύ των πρώτων επιλογών για την επίλυση και τη μελέτη προβλημάτων διαφορετικών τομέων της επιστήμης.

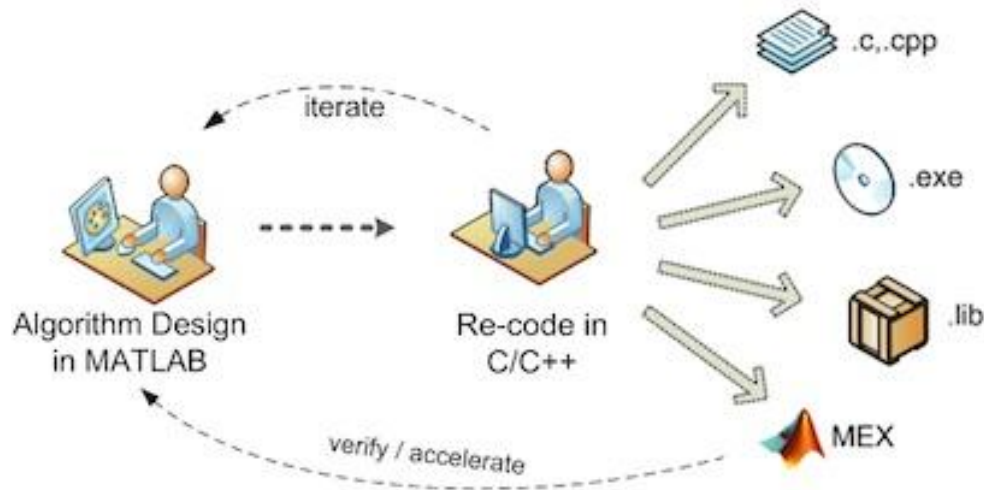
Η τρίτη και τελευταία μέθοδος διασύνδεσης των λογισμικών Riverbed Modeler και Matlab, αφορά τη χρήση της διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών MEX API, που προσφέρεται από το Matlab. Ο όρος “MEX” αποτελεί συντομογραφία για τον όρο “Matlab Executable”.

Η συγκεκριμένη διεπαφή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να καλέσει υπορουτίνες που έχουν κωδικοποιηθεί σε C, C++ ή Fortran από τη γραμμή εντολών του Matlab με τον ίδιο τρόπο που καλούνται συναρτήσεις που δημιουργούνται από το λογισμικό. Τα προγράμματα αυτά, ονομάζονται δυναμικά αρχεία MEX, και είναι δυναμικά συνδεδεμένες υπορουτίνες που καλούνται και εκτελούνται από το Matlab. Κάθε αρχείο MEX μπορεί να περιέχει μονάχα μία συνάρτηση ή μια υπορουτίνα [35].

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένα αρχείο MEX επιτρέπει την κλήση και εκτέλεση μιας συνάρτησης C, C++ ή Fortran από το Matlab. Για τη δημιουργία ενός αρχείου MEX υπάρχουν ορισμένες απαιτήσεις. Πρώτη και προφανής απαίτηση είναι η ικανότητα συγγραφής κώδικα σε μια από τις τρεις γλώσσες προγραμματισμού που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για τη συγγραφή του κώδικα, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τον συντάκτη που προσφέρεται από το Matlab. Σε δεύτερη φάση, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μεταγλωττιστή που να υποστηρίζεται από το Matlab. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι διάφορες εκδόσεις του Microsoft Visual C++ Professional και το MinGW 4.9.2 C/C++. Πέρα από το μεταγλωττιστή και τις γνώσεις του χρήστη, χρειάζονται δύο πακέτα, τα οποία είναι : η βιβλιοθήκη C/C++ Matrix Library API και οι συναρτήσεις C MEX Library API functions. Τέλος χρειάζεται το script κατασκευής MEX, που χρησιμοποιείται για δημιουργία αρχείου MEX.

Για να μπορεί ένα πρόγραμμα γραμμένο σε C/C++ να καλέσει τη γραμμή εντολών Matlab και να εκτελέσει κάποιο κομμάτι κώδικα εκεί χρειάζεται να ενημερωθούν κάποια στοιχεία στις παραμέτρους του περιβάλλοντος εργασίας του λειτουργικού συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται από το πάνελ προχωρημένων ρυθμίσεων συστήματος με μετέπειτα πλοήγηση στις μεταβλητές συστήματος. Από εκεί ενημερώνεται το σύστημα σχετικά με τη θέση που βρίσκονται οι βιβλιοθήκες και η θέση εγκατάστασης του λογισμικού στο δίσκο, ώστε να είναι δυνατόν να το καλέσει αργότερα, μέσω άλλων λογισμικών.

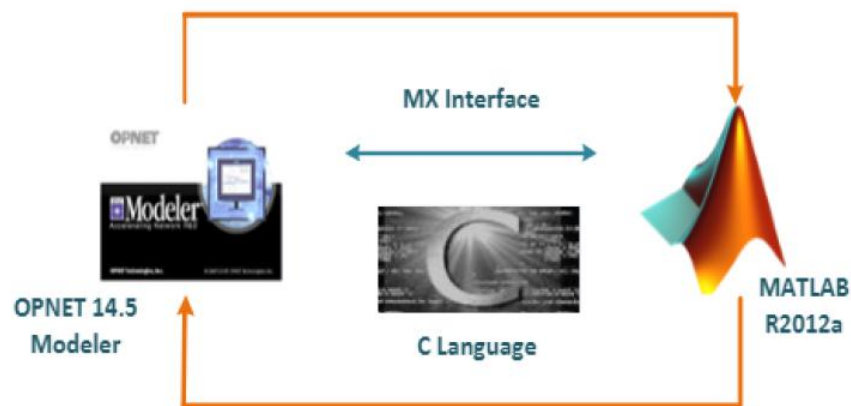
Ένα διάγραμμα ροής όπου χρησιμοποιείται το MEX API δίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 6. 10 Αλληλεπίδραση μεταξύ κώδικα C και Matlab.

Όσον αφορά τη διασύνδεση του Riverbed Modeler με το Matlab, μεγάλο πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι το λογισμικό Riverbed Modeler βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού C, η οποία απαιτείται από το Matlab για να μπορεί κληθεί μέσω της διεπαφής MEX[Εικόνα 6.11].

Ο κώδικας σε C μπορεί να προστεθεί είτε στο εσωτερικό κάποιας διεργασίας, είτε ως καθορισμένο εξωτερικό αρχείο κώδικα του μοντέλου που προσομοιώνεται. Σε κάθε περίπτωση η διασύνδεση των δύο λογισμικών θα είναι επιτυχημένη.



Εικόνα 6. 11 Διασύνδεση Matlab με το Riverbed Modeler μέσω κώδικα σε C. [36]

Από τη στιγμή που θα κληθεί η γραμμή εντολών του Matlab από το Modeler, μπορούν να εκτελεστούν οποιεσδήποτε λειτουργίες προσφέρει το υπολογιστικό πακέτο Matlab. Είναι επίσης δυνατόν να εκτελεστούν προσομοιώσεις και από πρόσθετα του Matlab, όπως είναι το Simulink. Γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχουν τεράστιες δυνατότητες, ενώ με την παράλληλη χρήση των δύο λογισμικών μπορούν να μελετηθούν συστήματα που θα ήταν πολύ δύσκολο να αναλυθούν από το κάθε πρόγραμμα ξεχωριστά.

## Κεφάλαιο 7 : Περιγραφή Μελέτης και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

### 7.1 Στόχος Μελέτης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τεσσάρων διαφορετικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, με στόχο την ανάδειξη της βέλτιστης λύσης σε εφαρμογές μετάδοσης δεδομένων από και προς σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Για την μελέτη επιλέχθηκαν δύο πρωτόκολλα ενσύρματης και δύο ασύρματης επικοινωνίας.

Για τη διασύνδεση και μετάδοση δεδομένων μέσω σύρματος, χρησιμοποιήθηκαν τα πρωτόκολλα ATM και MPLS. Το πρώτο αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές εφαρμογές εδώ και αρκετές δεκαετίες (από τα τέλη της δεκαετίας του 1980), ενώ το δεύτερο είναι μια πολύ νεότερη τεχνολογία που εμφανίστηκε στις αρχές της νέας χιλιετίας (το 2001 δημοσιεύθηκαν τα βασικά προτεινόμενα πρότυπα του μοντέλου από την ομάδα εργασίας της IETF [37]) και αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που προσελκύει συνεχώς περισσότερους υποστηρικτές.

Με ανάλογο σκεπτικό, όπως στην ενσύρματη δικτύωση, για την ασύρματη δικτύωση γίνεται σύγκριση μεταξύ ενός πολύ γνωστού στο ευρύ κοινό πρωτοκόλλου και ενός λιγότερου γνωστού, το οποίο όμως αποδεικνύεται σε κάθε δοκιμή άξιο εμπιστοσύνης. Ο λόγος γίνεται για το UMTS και το WiMAX. Το UMTS χρησιμοποιείται ευρύτατα σε δίκτυα κινητής, αφού ο σχεδιασμός του από την 3GPP έγινε έτσι ώστε να είναι συμβατό με προηγούμενες τεχνολογίες (GPRS), με αποτέλεσμα η αναβάθμιση των υπάρχοντων δικτύων να πραγματοποιείται με ελάχιστο κόστος, ενώ όσον αφορά το WiMAX, από την αρχική προτυποποίηση το 2004 [38] μέχρι και σήμερα η τεχνολογία συνεχώς ακμάζει, παρά το γεγονός ότι η μετάβαση σε αυτήν δεν γίνεται το ίδιο εύκολα όπως στην περίπτωση του UMTS.

Η μελέτη που ακολουθεί χωρίζεται σε δύο σκέλη. Στο πρώτο σκέλος[παράγραφος 7.2] παρουσιάζονται οι τοπολογίες των δικτύων και ο τρόπος που αυτές σχεδιάστηκαν, ενώ κλείνει με μια σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων πρωτοκόλλων και παρουσιάζονται αποτελέσματα σημαντικών παραμέτρων, όπως είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη λήψη δεδομένων (response time) και η ικανότητα μετάδοσης όγκου δεδομένων. Γίνεται επίσης επιμέρους σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών ίδιου τύπου ζεύξης, ενσύρματη ή ασύρματη. Στο δεύτερο σκέλος διασυνδέεται το πρόγραμμα προσομοίωσης, Riverbed Modeler, με το γνωστό υπολογιστικό πακέτο Matlab για την μετάδοση πραγματικών ενεργειακών δεδομένων (τάση, ρεύμα, ισχύς) που λαμβάνονται από κώδικα του Matlab. Η διασύνδεση των δύο προγραμμάτων πραγματοποιείται μέσω του MEX Interface που επιτρέπει την κλήση αρχείων και κώδικα του Matlab από άλλες εφαρμογές (όπως το Riverbed Modeler) και την εν συνεχεία ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δύο προγραμμάτων, όπως αναλύθηκε στην τελευταίο παράγραφο του κεφαλαίου 6.

## 7.2 Μελέτη σύγκρισης τεσσάρων πρωτοκόλλων επικοινωνίας για σύνδεση ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Για την πραγματοποίηση του πρώτου σκέλους της μελέτης χρησιμοποιήθηκε το γνωστό πακέτο προσομοίωσης τηλεπικοινωνιακών δικτύων, Riverbed Modeler [30]. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα, μέσω του πολύ καλού ιεραρχικού σχεδιασμού που παρέχει, επιτρέπει στον μελετητή που το χρησιμοποιεί να προσομοιώνει δίκτυα τηλεπικοινωνιών, είτε λαμβάνοντας δεδομένα από πραγματικές συσκευές, είτε από άλλα προγράμματα προσομοίωσης και υπολογιστικά πακέτα, όπως το Matlab [39], είτε εκτελώντας προσομοιώσεις με προκαθορισμένες τιμές παραμέτρων. Με αυτό τον τρόπο τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις μπορούν να δώσουν στους μηχανικούς μια ιδέα για την αναμενόμενη συμπεριφορά του συστήματος, πριν ξεκινήσουν την εγκατάσταση ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

Η τοπολογία του μελετώμενου δικτύου αφορά τρεις χώρους στάθμευσης της Πολυτεχνειούπολης στην περιοχή του δήμου Ζωγράφου της Αθήνας. Στην εικόνα 7.1 παρουσιάζονται μαρκαρισμένοι με μπλε χρώμα όλοι οι χώροι στάθμευσης εντός του Πολυτεχνείου. Οι τρεις χώροι που επιλέχθηκαν για τη μελέτη είναι :

- Ο χώρος στάθμευσης στο περιβάλλοντα χώρο της διεύθυνσης μέριμνας, που αριθμεί 56 θέσεις.
- Ο χώρος στάθμευσης στο υπόγειο των νέων κτηρίων της σχολής ηλεκτρολόγων μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών, που αριθμεί 103 θέσεις και
- Ο χώρος στάθμευσης που βρίσκεται στα παλιά κτίρια της σχολής ηλεκτρολόγων μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών, που αριθμεί 250 θέσεις.



Εικόνα 7. 1 Χώροι στάθμευσης πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου

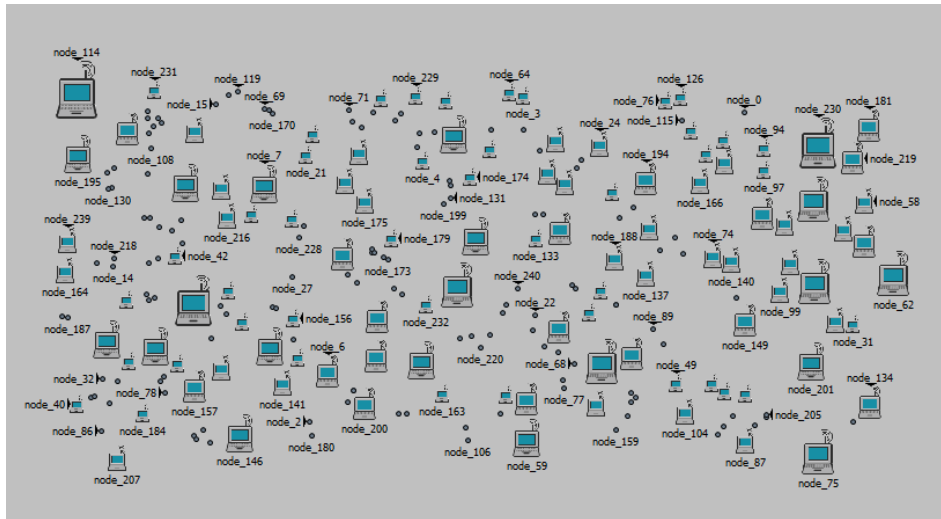
Οι χώροι στάθμευσης που επιλέχθηκαν, θεωρούνται οι πιο αντιπροσωπευτικοί για τη συγκεκριμένη μελέτη. Δεδομένου ότι ο κεντρικός server που αποστέλλονται τα δεδομένα βρίσκεται στα παλιά κτίρια της σχολής ΗΜΜΥ, ο ένας χώρος στάθμευσης βρίσκεται αρκετά κοντά στον εξυπηρετητή, ενώ οι άλλοι δύο βρίσκονται σε αρκετά μεγάλη απόσταση, με τον ένα από τους δύο χώρους να βρίσκεται σε υπόγειο, γεγονός που όπως θα παρατηρηθεί στη συνέχεια, δυσχεραίνει τις συνθήκες μετάδοσης ιδιαίτερα στις ασύρματες τεχνολογίες.

Η σύγκριση των τεσσάρων πρωτοκόλλων πραγματοποιείται με βάση την ικανότητα εξυπηρέτησης ενός δικτύου 409 σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, που στέλνουν δεδομένα ηλεκτρικής ενέργειας (στιγμιαία τάση, ρεύμα και ισχύς) σε μια βάση δεδομένων που είναι εγκατεστημένη στα παλιά κτίρια της σχολής Ηλεκτρολόγων μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

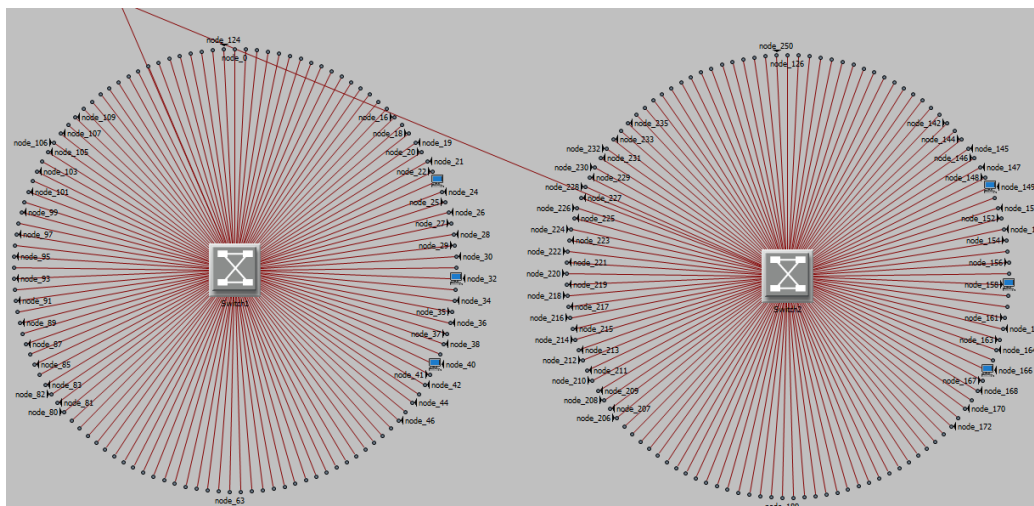
Λόγω του μεγάλου αριθμού οχημάτων και για λόγους καλύτερης παρουσίασης, τα οχήματα χωρίζονται στους τρεις χώρους στάθμευσης, που είναι τα τρία υποδίκτυα (subnets) που φαίνονται στην εικόνα 7.2. Στο εσωτερικό των υποδικτύων τα οχήματα τοποθετούνται όπως φαίνεται στην εικόνα 7.3, όταν γίνεται υλοποίηση με ασύρματη τεχνολογία και όπως φαίνεται στην εικόνα 7.4, όταν γίνεται υλοποίηση με ενσύρματη τεχνολογία.



Εικόνα 7. 2 Τοπολογία δικτύου με τρία υποδίκτυα-χώρους στάθμευσης και τη βάση δεδομένων



Εικόνα 7. 3 Εσωτερικό subnet χώρου στάθμευσης για δίκτυο ασύρματης δικτύωσης



Εικόνα 7. 4 Εσωτερικό subnet χώρου στάθμευσης για δίκτυο ενσύρματης δικτύωσης

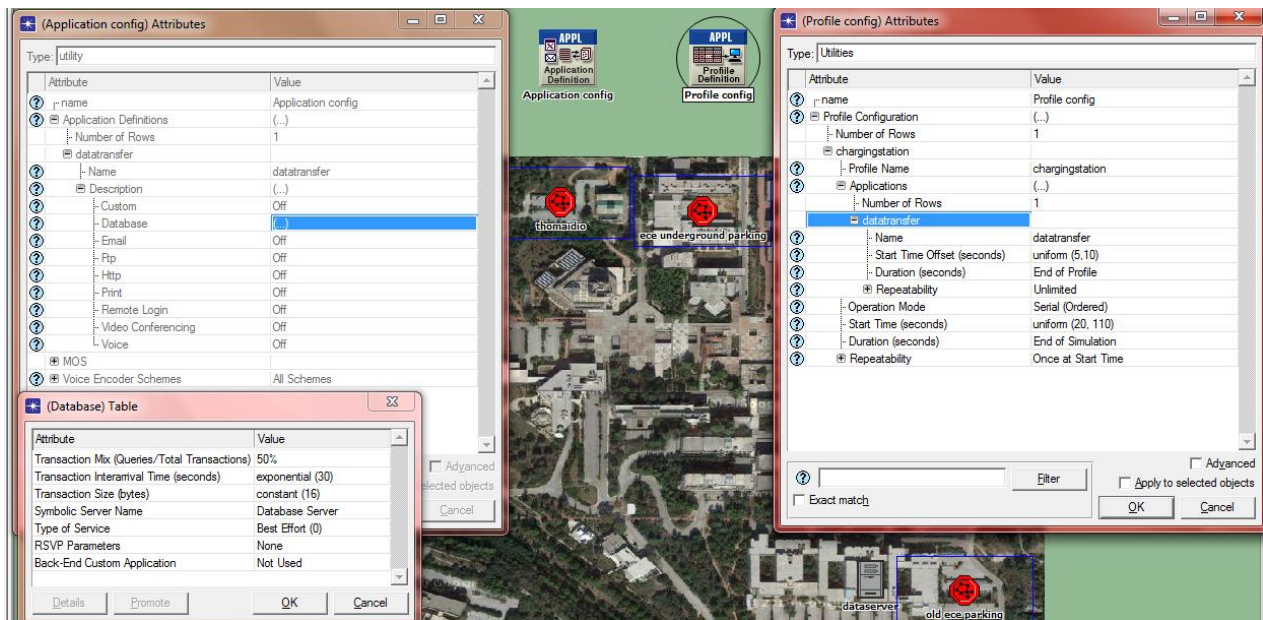
Σε όλες τις περιπτώσεις επιλέχθηκε η εφαρμογή database access, έτσι ώστε να ελεγχθεί ισόνομα η ικανότητα αποστολής δεδομένων από όλους τους σταθμούς και με τις 4 διαφορετικές τεχνολογίες που συγκρίνονται. Κάθε σταθμός φόρτισης ξεκινά την αποστολή δεδομένων σε ένα χρονικό διάστημα μεταξύ 20 και 110 δευτερολέπτων, ενώ ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαφορετικών αιτήσεων από τον ίδιο σταθμό, για αποστολή δεδομένων, ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέση τιμή τα 30 δευτερόλεπτα. Ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, η σχεδιαζόμενη τοπολογία οφείλει να περιλαμβάνει ένα ειδικό κόμβο, όπως οι κόμβοι WiMAX και ATM Config , στους οποίους ρυθμίζονται οι παράμετροι που αφορούν το εκάστοτε πρωτόκολλο.

Ο καθορισμός των παραμέτρων που ακολουθούν οι σταθμοί φόρτισης, όπως ο χρόνος έναρξης αποστολής δεδομένων, το μέγεθος των δεδομένων και άλλες σημαντικές παράμετροι, ρυθμίζονται από δύο ειδικούς κόμβους που παραμένουν απaráλαχτοι ανεξάρτητα από το

πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται. Αυτοί οι κόμβοι είναι : ο κόμβος Application Config, στον οποίο καθορίζονται το σύνολο των εφαρμογών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση και ο κόμβος Profile Config, όπου δημιουργούνται διάφορα προφίλ χρήστη, όπου χρήστης σε αυτή την περίπτωση είναι οι διάφοροι κόμβοι του συστήματος. Υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ εφαρμογών οποιουδήποτε τύπου, όπως είναι εφαρμογές απομακρυσμένης σύνδεσης (remote login), αποστολής αρχείων (ftp), ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (Email), εγγραφή ή ανάγνωση από βάση δεδομένων (Database Access) και άλλες χρήσιμες εφαρμογές για διάφορες μελέτες.

Επειδή σε μια μελέτη μπορεί κάποιος χρήστης να εκτελεί περισσότερες της μίας εφαρμογής, υπεισέρχεται η λειτουργικότητα του κόμβου Profile Config, ο οποίος επιτρέπει σε κάθε χρήστη-κόμβο να εκτελεί πολλαπλές διεργασίες, είτε ταυτόχρονα είτε σειριακά.

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης μελέτης, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή πρόσβασης και εγγραφής σε βάση δεδομένων (Database Access) και συνεπώς το προφίλ που ακολουθούσαν οι χρήστες είχε μια εφαρμογή, ενώ διαφοροποιούνταν μεταξύ τους μόνο ως προς τους χρόνους εκκίνησης. Οι τιμές των παραμέτρων για τους κόμβους Application και Profile Config, που εφαρμόστηκαν σε όλα τα σενάρια (για όλα τα πρωτόκολλα) της μελέτης, φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7. 5 Τιμές παραμέτρων κόμβων Application και Profile Config.

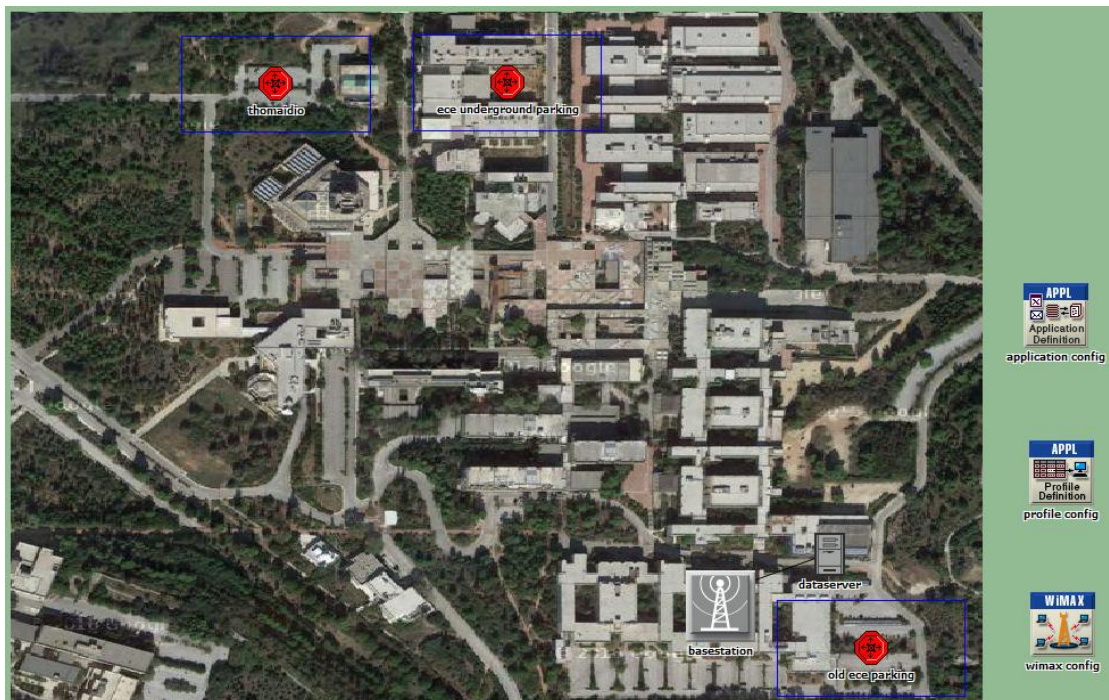
Στις τέσσερις επόμενες υποπαραγράφους περιγράφεται η τοπολογία και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της μελέτης για το κάθε ένα από τα τέσσερα πρωτόκολλα επικοινωνίας.



### 7.2.1 1<sup>ο</sup> Σενάριο προσομοίωσης (WiMAX)

Για τις ανάγκες του πρώτου σκέλους της μελέτης δημιουργήθηκαν τέσσερα σενάρια. Το πρώτο σενάριο αφορά την τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης δεδομένων, WiMAX ή όπως επίσης ονομάζεται, IEEE 802.16 και αναλύεται παρακάτω.

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 4, το πρωτόκολλο WiMAX δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις σε εξοπλισμό. Τα μόνα που χρειάζεται είναι ένα σταθμός βάσης που υποστηρίζει το πρωτόκολλο και σταθμοί εργασίας-φόρτισης με την ίδια ιδιότητα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η τοπολογία του δικτύου στο πρόγραμμα προσομοίωσης Riverbed Modeler, για το πρωτόκολλο IEEE 802.16.



Εικόνα 7. 6 Τοπολογία δικτύου WiMAX.

Όλο το δίκτυο εξυπηρετείται με ένα σταθμό βάσης, ο οποίος συνδέεται άμεσα με τη βάση δεδομένων. Υπάρχουν επίσης δύο ειδών σταθμοί φόρτισης. Σταθμοί φόρτισης που επικοινωνούν με τεχνολογία WiMAX και ειδικά για το χώρο στάθμευσης στο υπόγειο της σχολής ΗΜΜΥ, έχουν εγκατασταθεί σταθμοί φόρτισης που επικοινωνούν με χρήση της τεχνολογίας WLAN 802.11. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε τελικά αυτή η υλοποίηση είναι η λειτουργικότητα. Επειδή ακριβώς ο ένας χώρος στάθμευσης είναι υπόγειος, είναι αναμενόμενο να παρουσιάζονται αυξημένες απώλειες στο μονοπάτι της ασύρματης ζεύξης από τους σταθμούς φόρτισης προς τον σταθμό βάσης. Συνεπώς, χρειάστηκε να δοκιμαστούν διαφορετικές υλοποιήσεις, ώστε να μπορούν όλοι οι σταθμοί του δικτύου να επικοινωνούν με το σταθμό βάσης και εν συνεχεία με τη βάση δεδομένων. Επικρατέστερη λύση και πιο αποδοτική, όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα, είναι ο συνδυασμός των δύο ασύρματων πρωτοκόλλων επικοινωνίας 802.16 και

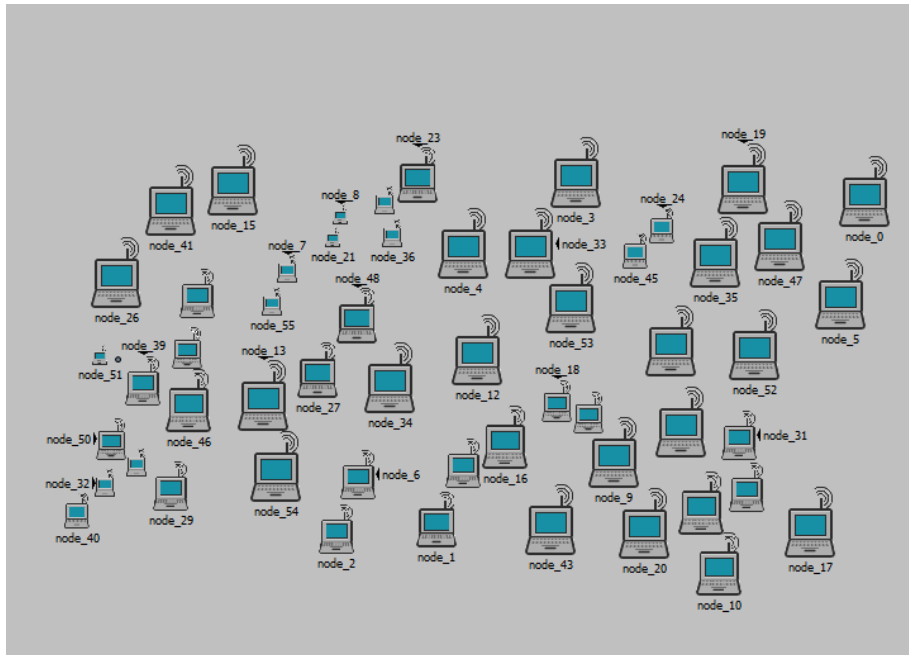
802.11. Δοκιμάστηκε επίσης η υλοποίηση με δύο σταθμούς βάσεις αντί για ένα, αλλά από τεχνοοικονομικής άποψης η λύση δεν ήταν συμφέρουσα.

Για να επιτευχθεί ο συνδυασμός των 802.11 και 802.16, χρησιμοποιήθηκε ένας δρομολογητής (Router) που υποστηρίζει και τα δύο πρωτόκολλα. Ο δρομολογητής εγκαταστάθηκε στο υπόγειο όπου βρίσκονται και οι σταθμοί φόρτισης. Είναι σε θέση να εγκαθιδρύσει ζεύξη με το σταθμό βάσης επειδή είναι εφοδιασμένος με κεραία κέρδους 15dBi. Συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους σταθμούς και τα προωθεί στο σταθμό βάσης. Θα μπορούσε φυσικά να γίνει υλοποίηση με σταθμούς WiMAX και χρήση μεγαλύτερης κεραίας σε κάθε σταθμό, αλλά είναι προφανές ότι μια τέτοια κίνηση θα ήταν ιδιαίτερα ασύμφορη από οικονομικής άποψης, καθώς επίσης θα υπήρχε πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, λόγω της αύξησης της ισχύος εκπομπής του κάθε σταθμού για να μπορέσει να αποστείλει δεδομένα. Οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν στον κόμβο του δρομολογητή παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

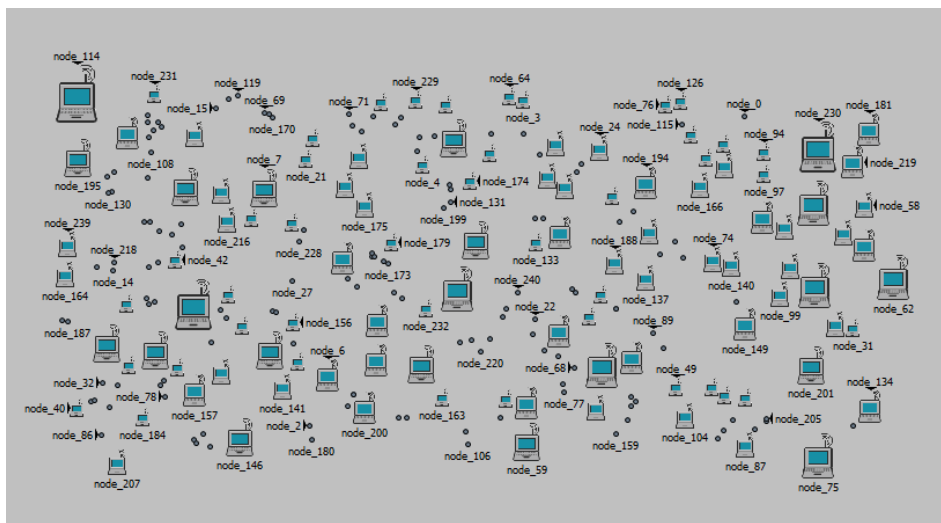
<b>Παράμετροι WiMAX</b>	
Κέρδος κεραίας	15dBi
Επίπεδο υπηρεσιών	Bronze(384kbps)
Τύπος Υπηρεσίας	Best Effort (0)
Μέγιστη Εκπεμπόμενη Ισχύς	0.5W
Προφίλ Φυσικού επιπέδου	OFDM
Τύπος κωδικοποίησης(Uplink/Downlink)	Προσαρμοστική(adaptive)
Τύπος περιβάλλοντος	Pedestrian
<b>Παράμετροι Wi-Fi</b>	
Πρωτόκολλο μετάδοσης φυσικού στρώματος	802.11g
Ταχύτητα μετάδοσης	54Mbps
Ισχύς μετάδοσης	0.005W

*Πίνακας 7. 1 Παράμετροι δρομολογητή*

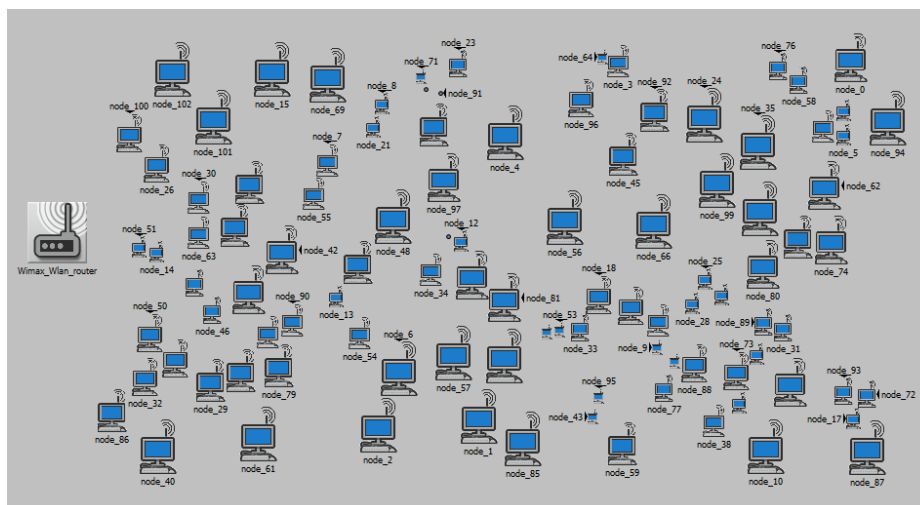
Η χωροθέτηση των σταθμών φόρτισης στο εσωτερικό των τριών υποδικτύων, φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 7. 7 Υποδίκτυο WiMAX χώρου στάθμευσης της διεύθυνσης μέριμνας



Εικόνα 7. 8 Υποδίκτυο WiMAX χώρου στάθμευσης στα παλιά κτίρια της σχολής ΗΜΜΥ.



Εικόνα 7. 9 Υποδίκτυο WiMAX χώρου στάθμευσης στο υπόγειο των νέων κτιρίων της σχολής ΗΜΜΥ.

Πέρα από το δρομολογητή μεταβλήθηκαν και οι παράμετροι των συνδρομητών-σταθμών φόρτισης και του σταθμού βάσης του δικτύου. Οι μεταβαλλόμενες παράμετροι παρουσιάζονται στους πίνακες 7.2 και 7.3 αντίστοιχα.

Παράμετροι Σταθμού Βάσης	
Κέρδος κεραίας	30 dBi
Μέγιστη ισχύς εκπομπής	0.5 W
Μέγιστος αριθμός συνδρομητικών κόμβων	500
Τύπος φυσικού προφίλ	OFDM
Τύπος Πομπού	STC 2x1 MIMO
Ελάχιστη πυκνότητα ισχύος	-110 dBm/subchannel
Μέγιστη πυκνότητα ισχύος	-60 dBm/subchannel
Επίπεδο υπηρεσιών	Bronze(384kbps)
Τύπος Υπηρεσίας	Best Effort (0)

Πίνακας 7. 2 Παράμετροι Σταθμού βάσης

Παράμετροι Σταθμών Φόρτισης(WiMAX)	
Κέρδος κεραίας	-1 dBi
Μέγιστη ισχύς εκπομπής	0.5 W
Τύπος φυσικού προφίλ	OFDM
Τύπος περιβάλλοντος	Pedestrian (Suburban-Type C)

Επίπεδο υπηρεσιών	Bronze(384kbps)
Τύπος Υπηρεσίας	Best Effort (0)
Παράμετροι Σταθμών Φόρτισης(Wi-Fi)	
Έκδοση Υποστηριζόμενου Πρωτοκόλλου	802.11g
Ταχύτητα Μετάδοσης	54Mbps
ισχύς εκπομπής	0.005W
Ευαισθησία Λήψης	-95dBm

Πίνακας 7. 3 Παράμετροι Συνδρομητικών σταθμών

Ειδικά για το πρωτόκολλο WiMAX προτού προβεί ο χρήστης στην εκτέλεση της προσομοίωσης, οφείλει να εισάγει τον κόμβο WiMAX Config, ώστε να ρυθμίσει βασικές παραμέτρους για το πρωτόκολλο. Οι ρυθμιζόμενες παράμετροι και οι τιμές που λαμβάνουν, δίνονται στον πίνακα 7.4, ενώ στον πίνακα 7.5 παρουσιάζεται ο αριθμός των στοιχείων, ανά είδος, που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του σεναρίου.

Παράμετροι κόμβου WiMAX Config	
Τύπος Υπολογισμού Αποδοτικότητας	Mobility and Ranging Enabled
Φυσικό Προφίλ OFDM	WirelessOFDMA 20 MHz
Τεχνική Πολυπλεξίας	TDD
Κεντρική Συχνότητα	5GHz
Εύρος Ζώνης	20MHz

Πίνακας 7. 4 Παράμετροι WiMAX Config.

Στοιχεία Δικτύου WiMAX		
Είδος	Τύπος Στοιχείου	Αριθμός Στοιχείων
Devices	Total	412
	Routers	3
	Workstations	408
	Servers	1
Physical Links	Total	2
	Serial	2
Άλλα στοιχεία	Configuration Utilities	4

Πίνακας 7. 5 Στοιχεία Δικτύου WiMAX

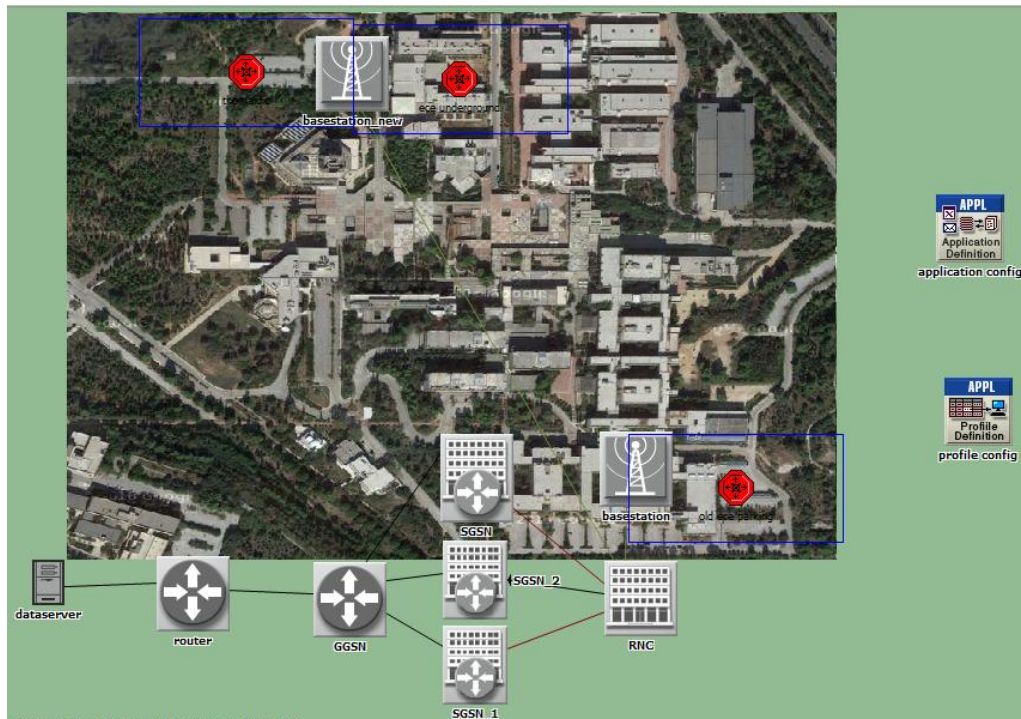
Αφού ολοκληρωθεί όλη η παραπάνω διαδικασία με την εγκατάσταση όλων των στοιχείων της τοπολογίας και την ρύθμιση των παραμέτρων σε όλους τους κόμβους του δικτύου, μπορεί να πραγματοποιηθεί η εκτέλεση της προσομοίωσης για τη λήψη των αποτελεσμάτων.

### 7.2.2 2<sup>ο</sup> Σενάριο προσομοίωσης (UMTS)

Σε αυτό το σενάριο αναλύεται η τοπολογία και οι παράμετροι του έτερου ασύρματου πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Το πρωτόκολλο UMTS έχει υψηλότερες απαιτήσεις ως προς την εγκατάσταση στοιχείων, σε σύγκριση με το WiMAX, αλλά πλεονεκτεί λόγω της συμβατότητας με προϋπάρχουσες τεχνολογίες (GPRS). Για να λειτουργήσει ένα δίκτυο που υποστηρίζεται από τη συγκεκριμένη τεχνολογία, χρειάζεται να έχει :

- Σταθμούς βάσης (node-b)
- RNC
- SGSN
- GGSN

Επειδή παρατηρήθηκε ότι δεν επαρκεί ένας κόμβος υποστήριξης GPRS εξυπηρέτησης (SGSN), αφού δεν μπορούσαν να εξυπηρετηθούν όλοι οι συνδρομητές, συνδέθηκαν παράλληλα 3 τέτοιοι κόμβοι, όπως φαίνεται στην τοπολογία της εικόνας 7.10.



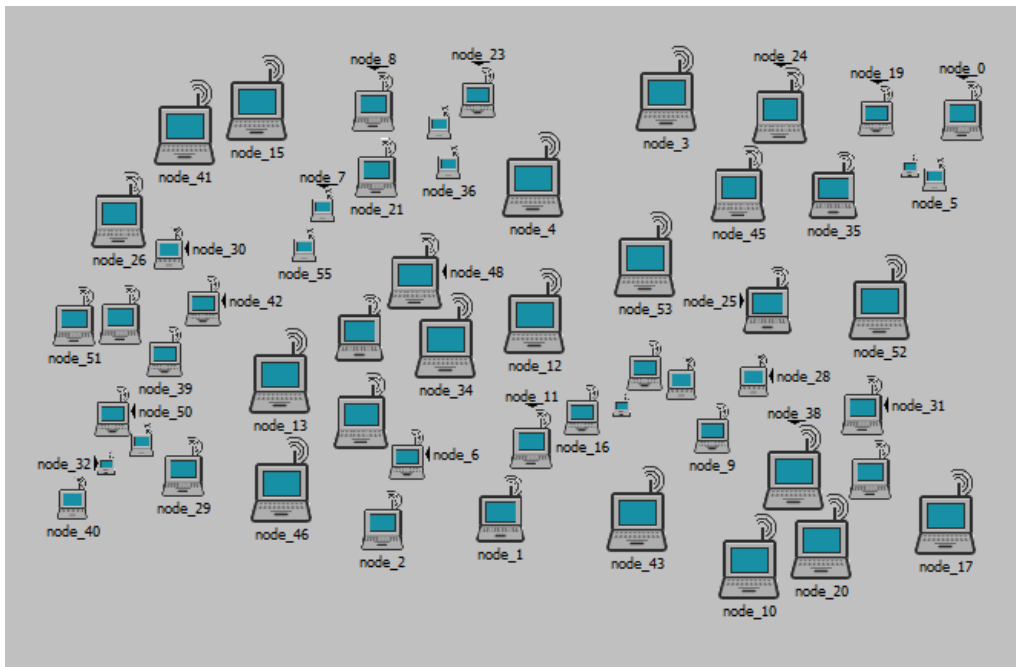
Εικόνα 7. 10 Τοπολογία Δικτύου UMTS

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στην επικοινωνία των σταθμών φόρτισης με ένα από τους δύο σταθμούς βάσης, που επιλέγεται με γνώμονα την απόσταση. Οι σταθμοί βάσης είναι συνδεδεμένοι με τον κόμβο ελέγχου ασύρματης πρόσβασης (RNC) με γραμμές ATM OC3 που

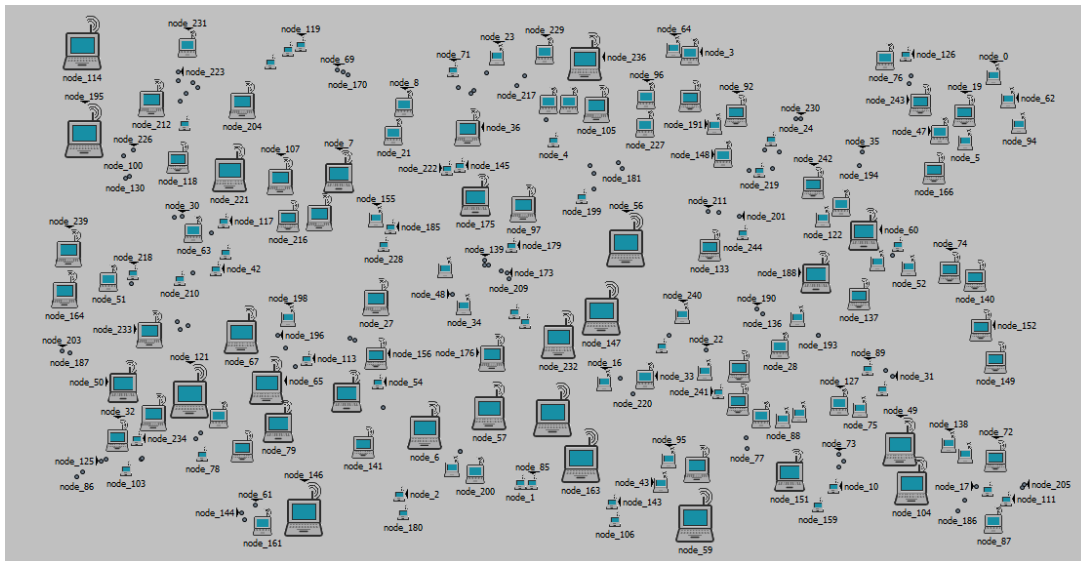
υποστηρίζουν ταχύτητες μετάδοσης 148.6Mbps. Ο κόμβος RNC με τη σειρά του συνδέεται με τους τρεις κόμβους υποστήριξης GPRS εξυπηρέτησης (SGSN), μέσω 2 γραμμών Ethernet 100baseT\_adv με ταχύτητες μετάδοσης 100Mbps και μιας γραμμής PPP DS3 με ρυθμό μετάδοσης 44.736Mbps. Από την άλλη πλευρά οι κόμβοι SGSN συνδέονται με το κόμβο Υποστήριξης Πυλών GPRS (GGSN) μέσω γραμμής PPP DS3 έκαστος, ενώ η ίδια σύνδεση χρησιμοποιείται τόσο μεταξύ του κόμβου GGSN και του δρομολογητή της βάσης δεδομένων, όσο και μεταξύ του δρομολογητή και της βάσης δεδομένων.

Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι η προκείμενη τοπολογία έχει πολλαπλάσιες απαιτήσεις για το υποστηρικτικό δίκτυο πρόσβασης, αφού χρειάζεται μεγάλος αριθμός συνδέσεων μεταξύ πολλών διαφορετικών στοιχείων, ώστε να καθίσταται το δίκτυο λειτουργικό.

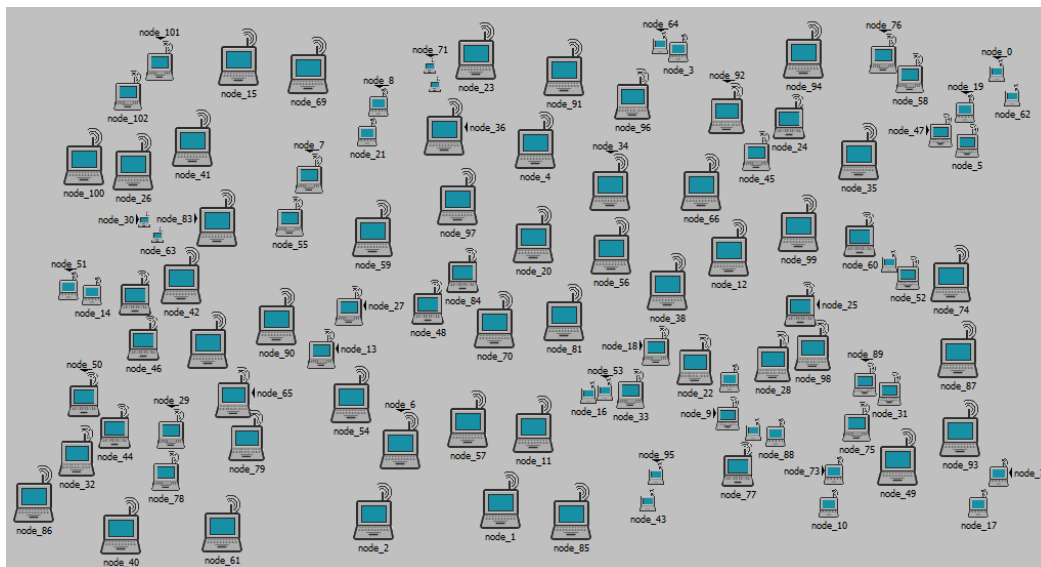
Ο διαχωρισμός των σταθμών φόρτισης σε υποδίκτυα γίνεται όπως και στην περίπτωση του 1<sup>ου</sup> σεναρίου, ανάλογα με το χώρο στάθμευσης στον οποίο ανήκουν. Η εγκατάσταση των σταθμών φόρτισης εντός των τριών υποδικτύων φαίνεται στις παρακάτω εικόνα για κάθε έναν από τους τρεις χώρους στάθμευσης αντίστοιχα.



Εικόνα 7. 11 Υποδίκτυο UMTS χώρου στάθμευσης της διεύθυνσης μέριμνας.



Εικόνα 7. 12 Υποδίκτυο UMTS χώρου στάθμευσης παλαιών κτιρίων σχολής ΗΜΜΥ.

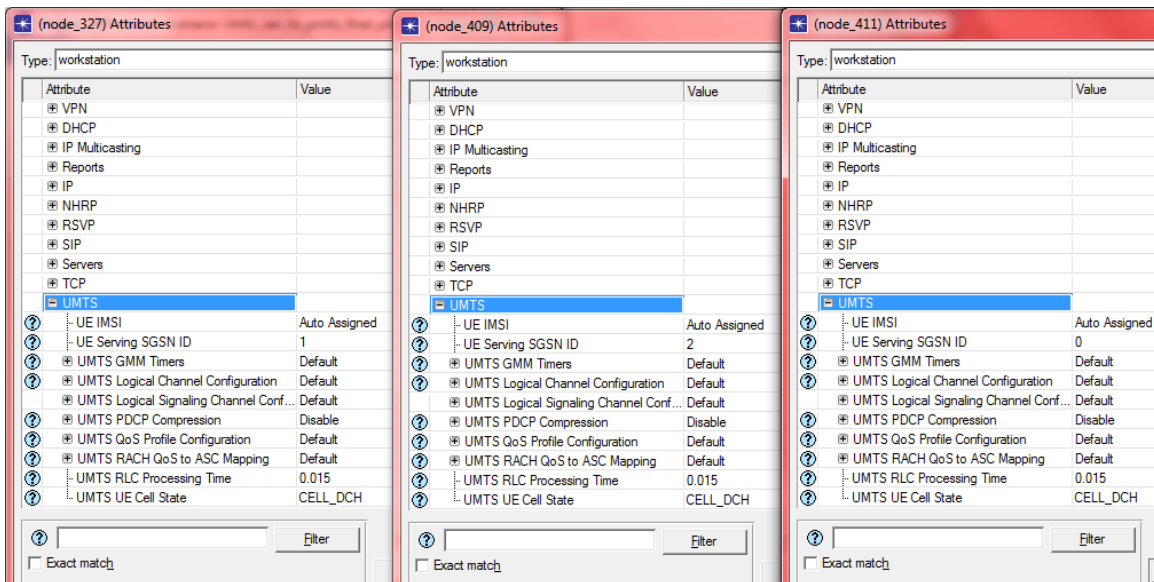


Εικόνα 7. 13 Υποδίκτυο UMTS χώρου στάθμευσης υπογείου νέων κτιρίων σχολής ΗΜΜΥ.

Οι μηχανικοί της Riverbed, οι οποίοι σχεδίασαν τη βιβλιοθήκη του πρωτοκόλλου UMTS δεν προέβλεψαν τη δημιουργία ενός ειδικού κόμβου για την ρύθμιση των παραμέτρων που εμφανίζει μόνο ένα δίκτυο UMTS. Η έλλειψη ενός κόμβου τέτοιας μορφής δυσκόλεψε ιδιαίτερα την διαδικασία παραμετροποίησης του συστήματος στις κατάλληλες συνθήκες προσομοίωσης.

Σε όλους τους τερματικούς κόμβους ορίστηκε το προφίλ χρήστη που θα ακολουθείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ παράλληλα έγινε ανάθεση όλων των σταθμών φόρτισης σε κάποιον από τους τρεις κόμβους SGSN, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.14 για τρεις τυχαίους σταθμούς. Έγινε προσπάθεια ισοκατανομής των σταθμών στους τρεις κόμβους SGSN, έτσι ώστε να επιτευχθεί ανάλογη ισοκατανομή του φορτίου.





Εικόνα 7. 14 Ανάθεση σταθμών φόρτισης στους τρεις κόμβους SGSN.

Για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου, έγινε αλλαγή των σταθμών βάσης μιας ισοτροπικής κεραίας, με σταθμούς βάσης έξι τομέων (6-sectors). Επειδή όμως οι σταθμοί φόρτισης δεν είναι εγκατεστημένοι ομοιόμορφα γύρω από τους σταθμούς βάσης, με αποτέλεσμα κάποιοι τομείς να παραμένουν ανενεργοί παρότι υπήρχε υπερφόρτωση των υπόλοιπων τομέων, έγινε αλλαγή του τύπου κεραίας που χρησιμοποιείται στους σταθμούς βάσης. Συγκεκριμένα έγινε αλλαγή του μοντέλου κατευθυντικών κεραιών με 6 ισοτροπικές κεραίες, οι οποίες να μην εκπέμπουν προς πάσα κατεύθυνση ομοιόμορφα, αλλά μπορούν να εξυπηρετήσουν συνδρομητές ανεξάρτητα με την τομεακή τους θέση.

Όσον αφορά τους κόμβους RNC, SGSN και GGSN η μόνη αλλαγή που πραγματοποιήθηκε στις παραμέτρους τους, ήταν η αλλαγή της μοναδικής ταυτότητας (ID) των κόμβων για την σωστή αναφορά και σύνδεση από άλλους κόμβους προς αυτούς στο εσωτερικό του δικτύου.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του σεναρίου.

Στοιχεία Δικτύου UMTS		
Είδος	Τύπος Στοιχείου	Αριθμός Στοιχείων
Συσκευές	Total	416
	Routers	2
	Workstations	407
	Servers	1
	Other	6

Φυσικές Συνδέσεις	Total	10
	ATM	2
	Serial	6
	Ethernet	2
Άλλα Στοιχεία	Configuration Utilities	3

Πίνακας 7. 6 Στοιχεία Δικτύου UMTS

### 7.2.3 3<sup>ο</sup> Σενάριο προσομοίωσης (ATM)

Τρίτο στη σειρά σενάριο που δημιουργήθηκε είναι αυτό που αφορά το πρωτόκολλο ATM. Είναι η πρώτη από τις δύο ενσύρματες τεχνολογίες που μελετώνται. Η υλοποίηση του δικτύου αφορά μόνο ενσύρματες συνδέσεις μεταξύ διαφόρων στοιχείων. Ένα δίκτυο ATM βασίζεται στον κύριο κορμό που αποτελείται από μεταγωγείς (switches), οι οποίοι αλληλοσυνδέονται. Το δίκτυο ATM που υλοποιήθηκε σε αυτό το σενάριο παρουσιάζεται στην εικόνα 7.15.

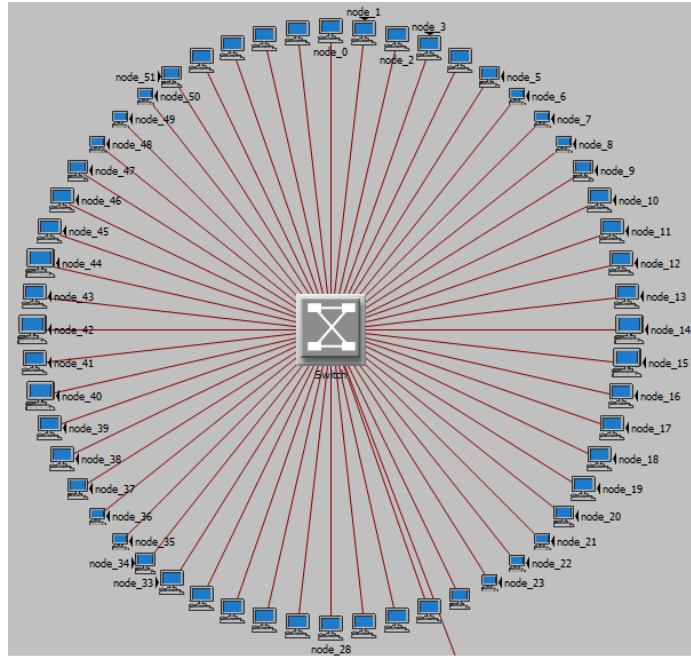


Εικόνα 7. 15 Τοπολογία Δικτύου ATM.

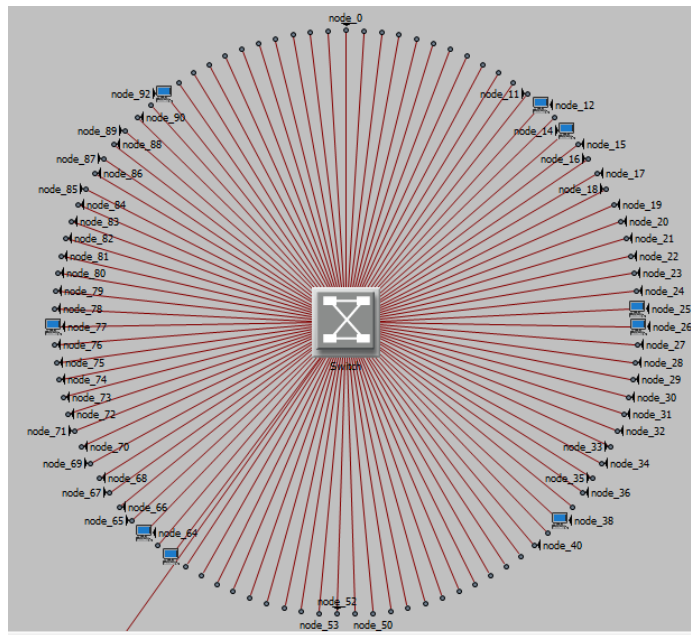
Η μεθοδολογία υλοποίησης του σεναρίου ακολουθούσε την εξής σειρά :

Αρχικά τοποθετήθηκαν στο χάρτη τα τρία υποδίκτυα και οι δύο κόμβοι, Application και Profile Config, που απαιτούνται σε κάθε προσομοίωση ανεξαρτήτως πρωτοκόλλου. Έπειτα τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό των τριών υποδικτύων οι κόμβοι που αναπαριστούν τους σταθμούς φόρτισης. Επειδή στη βιβλιοθήκη των έτοιμων στοιχείων που λειτουργούν με το

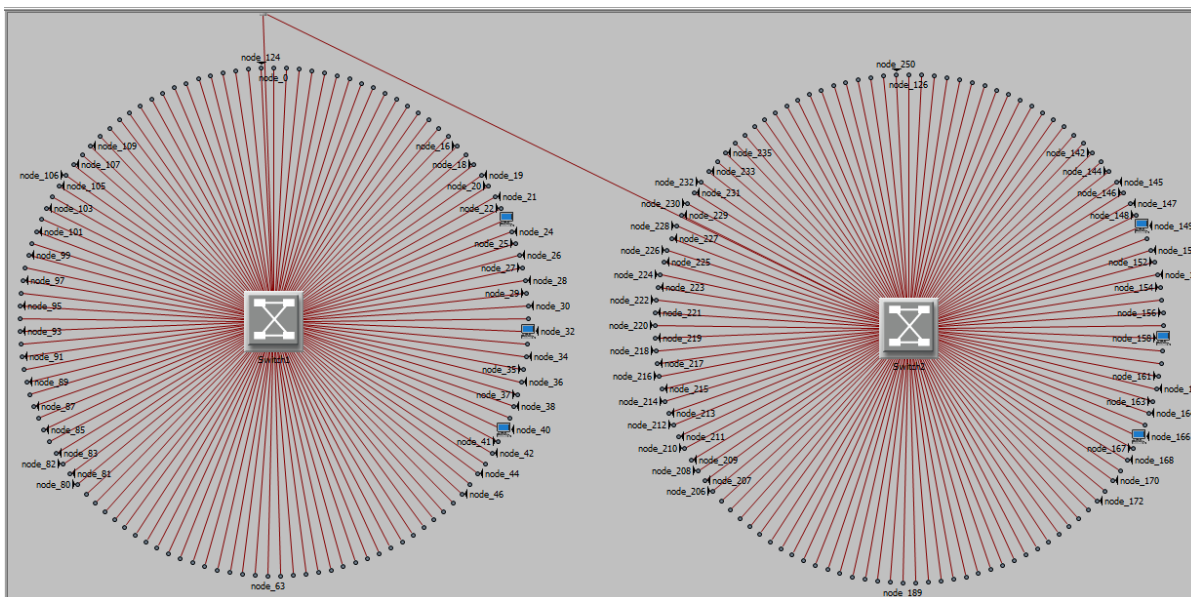
πρωτόκολλο ATM δεν υπήρχαν κάποιος μεταγωγέας (switch) που να συνδέεται με περισσότερους από 16 κόμβους, κρίθηκε ασύμφορη η υλοποίηση με αυτό τον τρόπο, οπότε χρησιμοποιήθηκαν τερματικοί σταθμοί που μεταδίδουν δεδομένα σύμφωνα με το πρωτόκολλο Ethernet, ενώ για τη διασύνδεση του συνόλου των σταθμών φόρτισης κάθε υποδικτύου χρησιμοποιήθηκαν ένας ή δύο μεταγωγείς με ικανότητα σύνδεσης με έως 128 κόμβους Ethernet, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες για καθένα από τα τρία υποδίκτυα αντίστοιχα.



Εικόνα 7. 16 Υποδίκτυο ATM χώρου στάθμευσης της διεύθυνσης μέριμνας



Εικόνα 7. 17 Υποδίκτυο ATM υπόγειου χώρου στάθμευσης νέων κτιρίων σχολής ΗΜΜΥ



Εικόνα 7. 18 Υποδίκτυο ATM χώρου στάθμευσης παλαιών κτιρίων σχολής ΗΜΜΥ

Όλες οι συνδέσεις μεταξύ των τερματικών σταθμών και των μεταγωγέων του κάθε υποδικτύου είναι τύπου 10baseT\_adn με υποστηριζόμενους ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 10Mbps. Οι μεταγωγείς των υποδικτύων είναι εφοδιασμένοι με μία αναχώρηση έκαστος, τύπου 100baseT\_adn με ρυθμούς μετάδοσης 100Mbps. Η αναχώρηση αυτή καταλήγει στον πλησιέστερο δρομολογητή του δικτύου, όπως φαίνεται από την εικόνα 7.15, ο οποίος με τη σειρά συνδέεται με το κύριο δίκτυο μεταγωγών ATM. Χρησιμοποιήθηκαν 4 μεταγωγείς ATM, ως τυπική δομή χωρίς να είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν όλοι για την δικτύωση από άκρο σε άκρο του συστήματος. Όλες οι φυσικές συνδέσεις μεταξύ των ATM μεταγωγέων του συστήματος, είναι τύπου ATM\_OC3 με ικανότητα μετάδοσης 155.52Mbps.

Για το συγκεκριμένο πρωτόκολλο έχει προβλεφθεί και σχεδιαστεί ένας ειδικός κόμβος, αντίστοιχος με τον κόμβο WiMAX Config που παρουσιάστηκε στο πρώτο σενάριο, για τη ρύθμιση παραμέτρων που αφορούν τη συμπεριφορά του συστήματος και τις ιδιότητες που θα λαμβάνουν οι ATM κόμβοι αυτού. Ο κόμβος αυτός ονομάζεται ATM Config. Από την παράμετρο «χαρακτηριστικά κίνησης» του κόμβου και δημιουργώντας στη συνέχεια ένα νέο στοιχείο σειράς, ορίστηκε χαρακτηριστικό κίνησης με όνομα «data», στο οποίο διευκρινίζεται η ο τύπος υπηρεσιών για την εφαρμογή. Επιλέχθηκε ως υποστηριζόμενος τύπος υπηρεσιών (ToS) το Best Effort (0), που σημαίνει ότι δεν υπάρχει καμία απολύτως εγγύηση για τα πακέτα δεδομένων που αποστέλλονται.

Πέρα από τον τύπο υπηρεσιών, μεταβλήθηκε επίσης η τιμή της παραμέτρου «Application Type», όπου προστέθηκε νέα σειρά και έπειτα επιλέχθηκε ως υποστηριζόμενος τύπος εφαρμογής το “Database Application”.

Για λόγους πληρότητας, στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφεται το σύνολο των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του σεναρίου που αφορά το πρωτόκολλο ATM.

Στοιχεία Δικτύου ATM		
Είδος	Τύπος Στοιχείου	Αριθμός Στοιχείων
Συσκευές	Total	420
	Routers	2
	Switches	8
	Workstations	409
	Servers	1
Προμηθευτής	Cisco Systems	2
Φυσικές Συνδέσεις	Total	420
	ATM	6
	Serial	1
	Ethernet	413
Άλλα Στοιχεία	Configuration Utilities	4

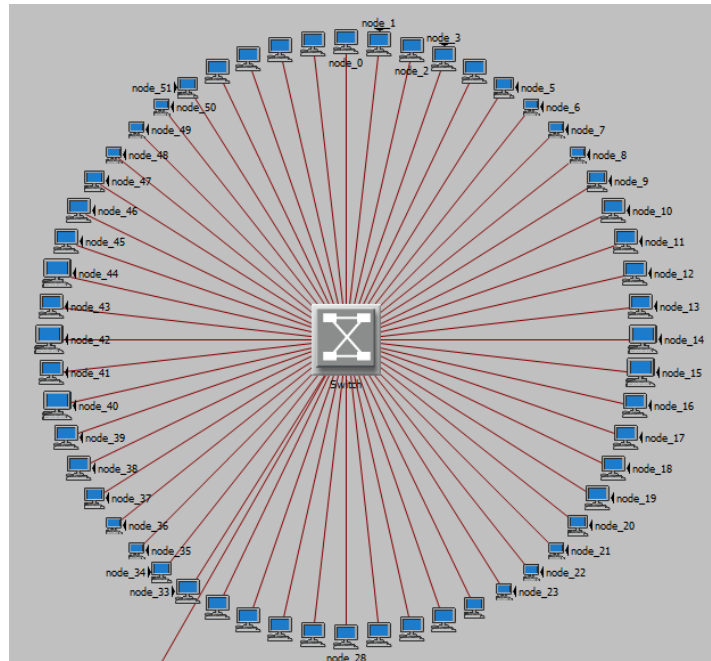
Πίνακας 7. 7 Στοιχεία Δικτύου ATM.

#### 7.2.4 4<sup>ο</sup> Σενάριο προσομοίωσης (MPLS)

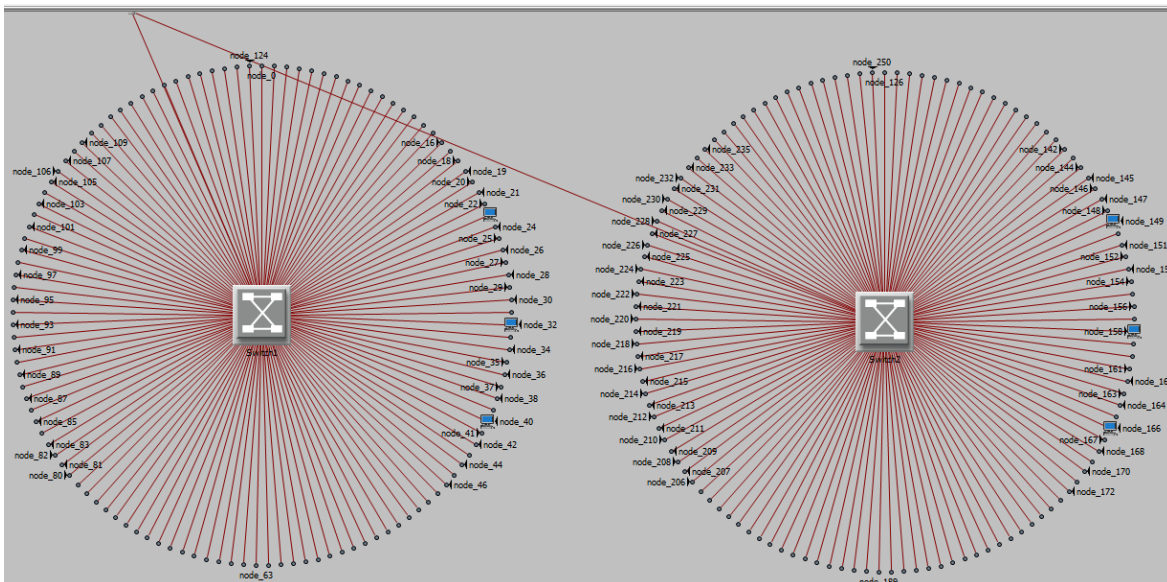
Στο τέταρτο και τελευταίο σενάριο προσομοίωσης, γίνεται ανάλυση της τοπολογίας του δικτύου για το πρωτόκολλο MPLS, το οποίο είναι το δεύτερο πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για ενσύρματη μετάδοση δεδομένων. Κατ' αντιστοιχία με το πρωτόκολλο ATM, το MPLS βασίζεται κατά κύριο λόγο στον κύριο κορμό του δικτύου, ο οποίος όμως σε αυτή την περίπτωση αποτελείται από δρομολογητές ειδικού σκοπού και όχι μεταγωγείς ATM. Οι δρομολογητές υποδέχονται και επαναπροωθούν τα πακέτα που λαμβάνουν με πολύ μεγάλη ταχύτητα, εξετίας του μηχανισμού προώθησης με ετικέτες που εφαρμόζεται στους κόμβους LSR του δικτύου. Για την υλοποίηση του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 421 συσκευές και 420 συνδέσεις, όπως αναφέρεται πιο αναλυτικά στον πίνακα 7.8.

Στοιχεία Δικτύου MPLS		
Είδος	Τύπος Στοιχείου	Αριθμός Στοιχείων
Συσκευές	Total	420
	Routers	6
	Switches	4
	Workstations	409
	Servers	1
Προμηθευτές	Cisco Systems	1
Φυσικές Συνδέσεις	Total	421

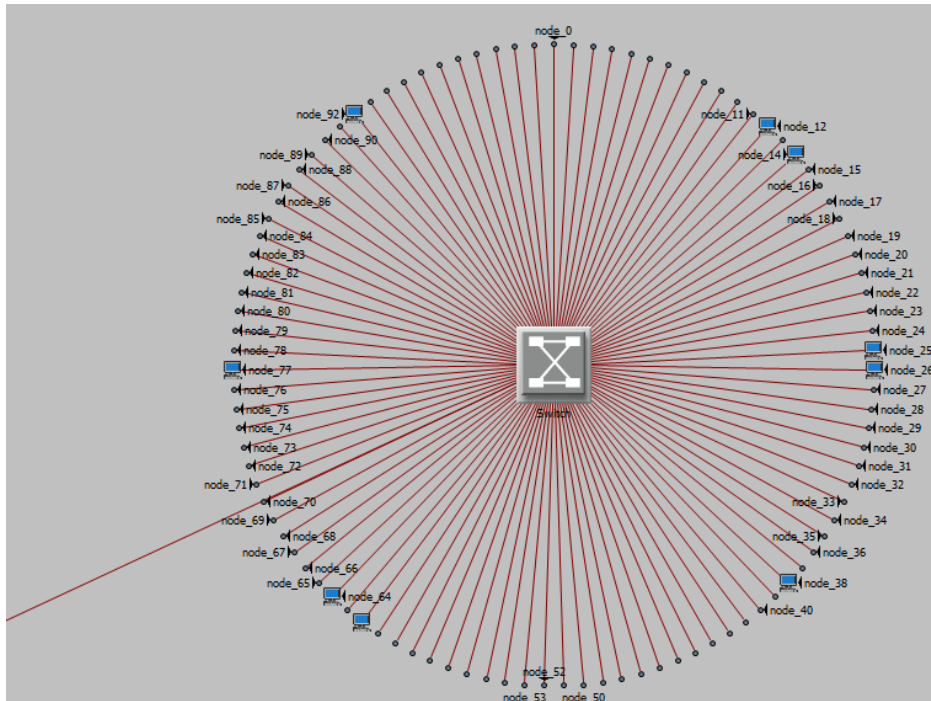
Η τοπολογία του σεναρίου βασίστηκε σε αυτή που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο σενάριο. Οι κόμβοι και οι ζεύξεις μεταξύ των κόμβων των υποδικτύων είναι ίδια με το σενάριο του πρωτοκόλλου ATM, αφού για τους ίδιους λόγους χρησιμοποιήθηκαν τερματικοί σταθμοί που υποστηρίζουν το πρωτόκολλο Ethernet, όπως φαίνεται από τις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 7. 19 Υποδίκτυο MPLS χώρου στάθμευσης της διεύθυνσης μέριμνας

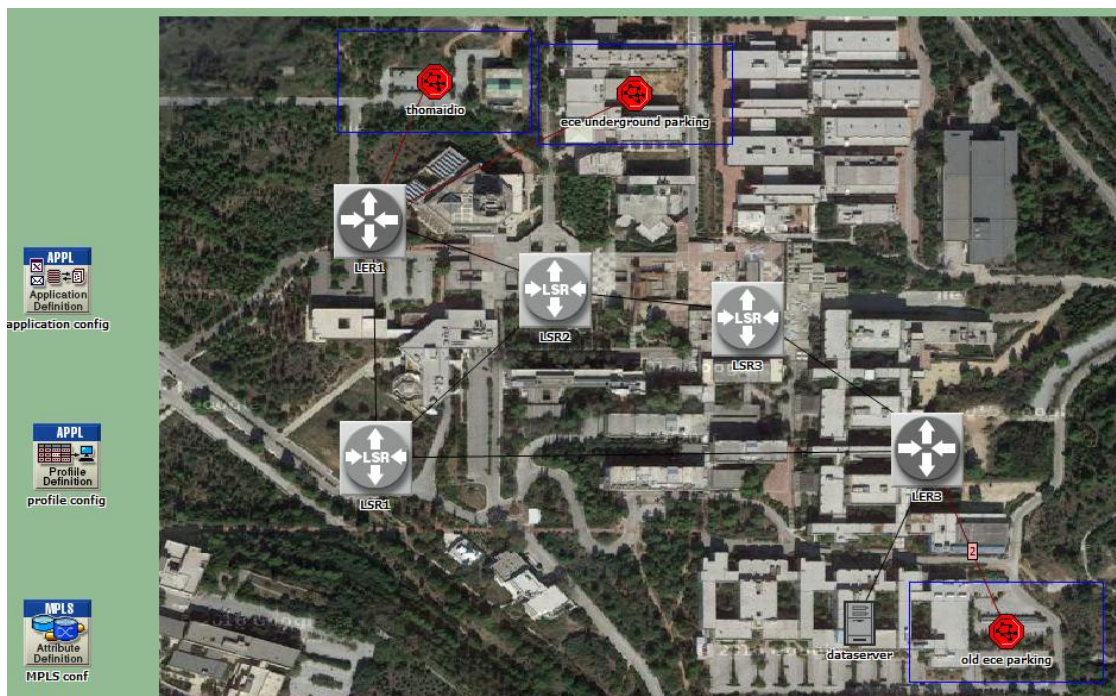


Εικόνα 7. 20 Υποδίκτυο MPLS χώρου στάθμευσης παλαιών κτιρίων σχολής ΗΜΜΥ



Εικόνα 7. 21 Υποδίκτυο MPLS υπόγειου χώρου στάθμευσης νέων κτιρίων σχολής ΗΜΜΥ

Πέρα από το εσωτερικό των υποδικτύων και τους κόμβους Application Config και Profile Config που παραμένουν αμετάβλητοι σε όλα τα σενάρια, η τοπολογία του δικτύου MPLS δεν έχει καμία σχέση με αυτή του ATM, όπως εύκολα παρατηρεί κανείς από την επόμενη εικόνα.



Εικόνα 7. 22 Τοπολογία Δικτύου MPLS

Το δίκτυο MPLS αποτελείται από 5 δρομολογητές. Δύο ακραίους δρομολογητές, τύπου LER, οι οποίοι συνδέουν το κύριο δίκτυο με τα υποδίκτυα και τη βάση δεδομένων, ενώ επίσης υπάρχουν και 3 δρομολογητές, τύπου LSR που χρησιμοποιούνται για την ταχεία προώθηση των πακέτων δεδομένων από άκρο σε άκρο, δια μέσου 2 οδών, γεγονός που αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος αλλά και την ικανότητα διαμοιρασμού του φορτίου στα 2 μονοπάτια είτε προς ισοκατανομή και διατήρηση χαμηλής χρήσης (utilization) γραμμών, είτε για δέσμευση πόρων προς εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών. Η σύνδεση και η χρήση αυτού του αριθμού των στοιχείων LSR και LER έγινε τυπικά με βάση τη λογική, δεδομένου ότι εγκαταστάσεις που βασίζονται στο πρωτόκολλο MPLS είναι συνήθως πολύ μεγάλης κλίμακας και όχι όπως στην περίπτωση που μελετάται για τον ευρύτερο χώρο της Πολυτεχνειούπολης.

Από τις παραμέτρους που ορίστηκαν στους κόμβους, αξίζει να αναφερθούν αυτές του κόμβου LER1 που μεσολαβεί μεταξύ των υποδικτύων «thomaidio» και «ece underground parking» με το κύριο δίκτυο MPLS του συστήματος. Στον ακραίο αυτό δρομολογητή LER, ορίστηκε μια σαφής διαδρομή δρομολόγησης που περιλαμβάνει τους κόμβους LSR2 και LSR3 και η οποία ακολουθείται κατά την προώθηση όλων των πακέτων προς τη βάση δεδομένων. Η αντίστροφη διαδρομή δεν ελέγχεται με κάποιο αντίστοιχο περιορισμό. Η ρύθμιση αυτή δεν είναι αναγκαία για την ορθή λειτουργία του συστήματος, αλλά πραγματοποιήθηκε με το σκεπτικό ότι σε ένα πραγματικό δίκτυο, ο υπεύθυνος μηχανικός, ο οποίος ελέγχει την κυκλοφορία (traffic engineering) επιθυμεί να ορίζει ρητά την κίνηση και να αφήνει διαθέσιμους πόρους για υπηρεσίες που έχουν υψηλές απαιτήσεις για εγγυημένη ποιότητα. Με τον έλεγχο της κυκλοφορίας είναι εύκολο να υποστηριχθούν υπηρεσίες υψηλών απαιτήσεων, μέσω της οδού LER1-LSR1-LER3 με ελάχιστες αλλαγές στις παραμέτρους του συστήματος.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι στο ειδικό κόμβο MPLS Config, στον οποίο πραγματοποιούνται οι ρυθμίσεις που αφορούν το πρωτόκολλο MPLS, έγινε αλλαγή της μεταβλητής της παραμέτρου «FEC Specifications», όπου ορίστηκε ένα όνομα FEC και δημιουργήθηκε μια σειρά για τον ορισμό του τύπου υπηρεσιών της εφαρμογής σε «Best Effort(0)» και του ονόματος της θύρας προορισμού σε «Database Application Server».

Έπειτα από την αναλυτική παρουσίαση των τεσσάρων σεναρίων, ακολουθεί ή υποπαράγραφος όπου παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα της μελέτης του πρώτου σκέλους.

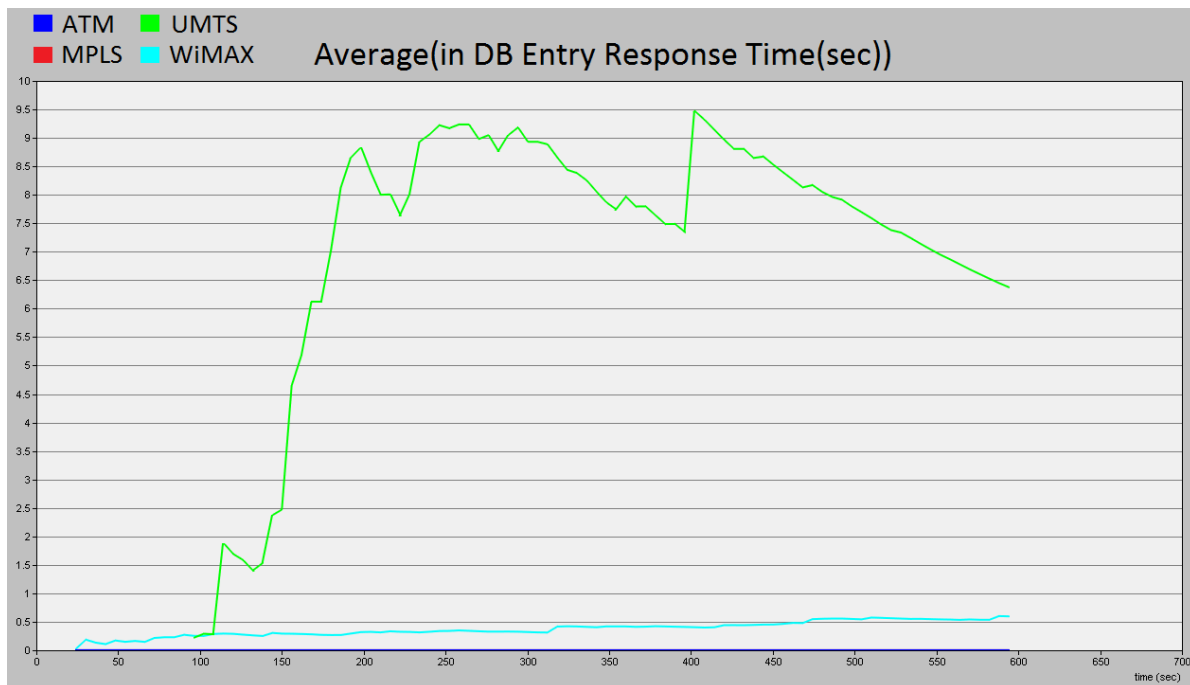
#### 7.2.5 Συγκριτικά Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τα 4 πρωτόκολλα

Εκτελώντας προσομοιώσεις και για τα τέσσερα πρωτόκολλα επικοινωνίας, κατέστη δυνατή η συλλογή αποτελεσμάτων σχετικά με διάφορες παραμέτρους του δικτύου. Επιλέχθηκε να προσομοιωθεί το κάθε δίκτυο για χρονικό διάστημα 10 λεπτών (χρόνος προσομοίωσης), ως δείγμα φόρτου λειτουργίας του συστήματος σε ένα τυχαίο δεκάλεπτο της ημέρας, ενώ η σύνδεση των οχημάτων γίνεται σε τυχαίο χρόνο, που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή.



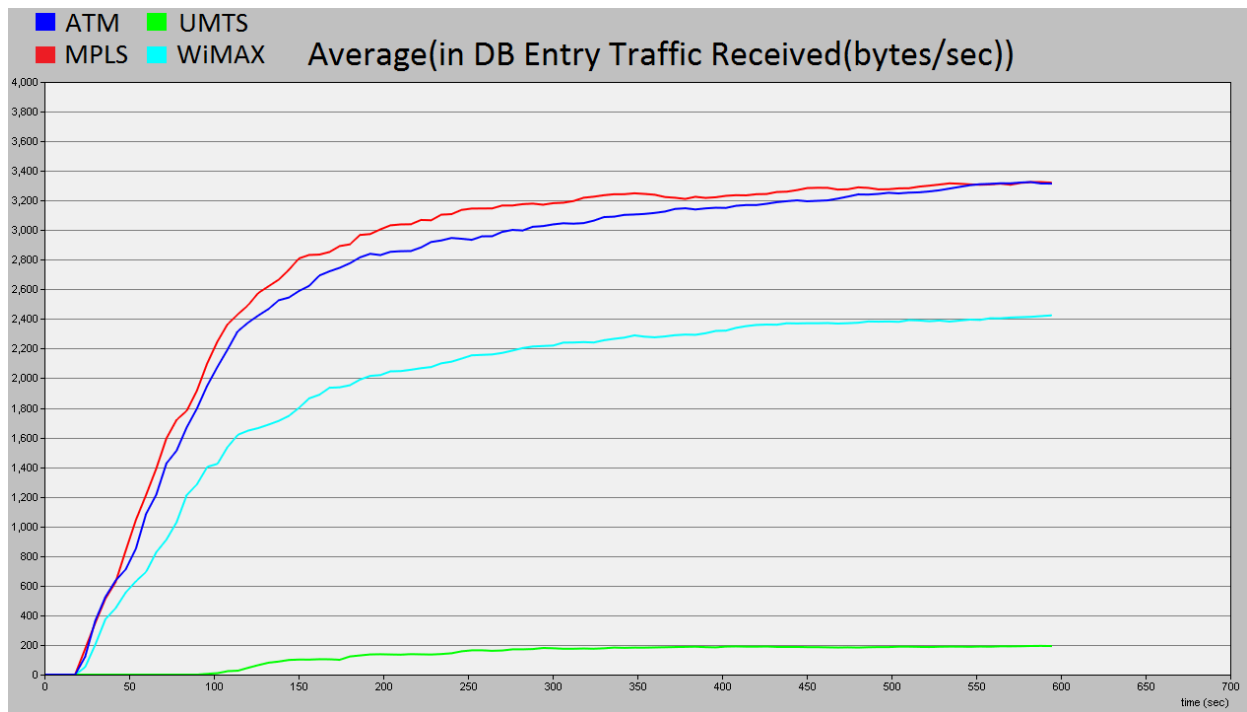
Επειδή η πληροφορία ακολουθεί διπλή διαδρομή, καθώς μεταδίδεται τόσο από την πλευρά των σταθμών φόρτισης προς τη βάση δεδομένων, αλλά και με την αντίθετη φορά, η παράμετρος Database Queries/Total transactions ορίστηκε στο 50%. Δηλαδή για κάθε εγγραφή στη βάση δεδομένων υπάρχει και αντίστοιχη πληροφορία που αποστέλλεται από τη βάση δεδομένων προς το, κάθε σταθμό φόρτισης. Επιλέχθηκαν προς παρουσίαση το σύνολο των γραφικών που αφορούν τα δεδομένα που στέλνουν οι σταθμοί φόρτισης προς εγγραφή στη βάση δεδομένων(Database Entry) καθώς και τα δεδομένα που ακολουθούν την αντίστροφη διαδρομή(Database Query).

Αρχικά γίνεται σύγκριση του μέσου χρόνου που μεσολαβεί από την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων προς τη βάση δεδομένων και του πακέτου επιβεβαίωσης που φτάνει στο σταθμό φόρτισης [εικόνα 7.23]. Είναι φανερό ότι τα ασύρματα πρωτόκολλα υστερούν έναντι των ενσύρματων, καθώς απαιτούν τάξης μεγέθους περισσότερο χρόνο για την αποστολή δεδομένων μέχρι τη λήψη απάντησης. Ιδιαίτερα το πρωτόκολλο UMTS παρουσιάζει την δυσμενέστερη απόδοση με χρόνους που υπερβαίνουν τα 9sec, ενώ ακολουθεί το WiMAX με μέτρια προς ικανοποιητική απόδοση και χρόνους μέχρι 0.5sec. Τα ενσύρματα πρωτόκολλα, MPLS και ATM επιτυγχάνουν τους καλύτερους χρόνους μεταξύ των τεσσάρων μελετώμενων πρωτοκόλλων, αποτέλεσμα λογικό αν αναλογιστεί κανείς ότι τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω μόνιμης και απαλλαγμένης από παρεμβολές διαδρομής (multipath propagation).

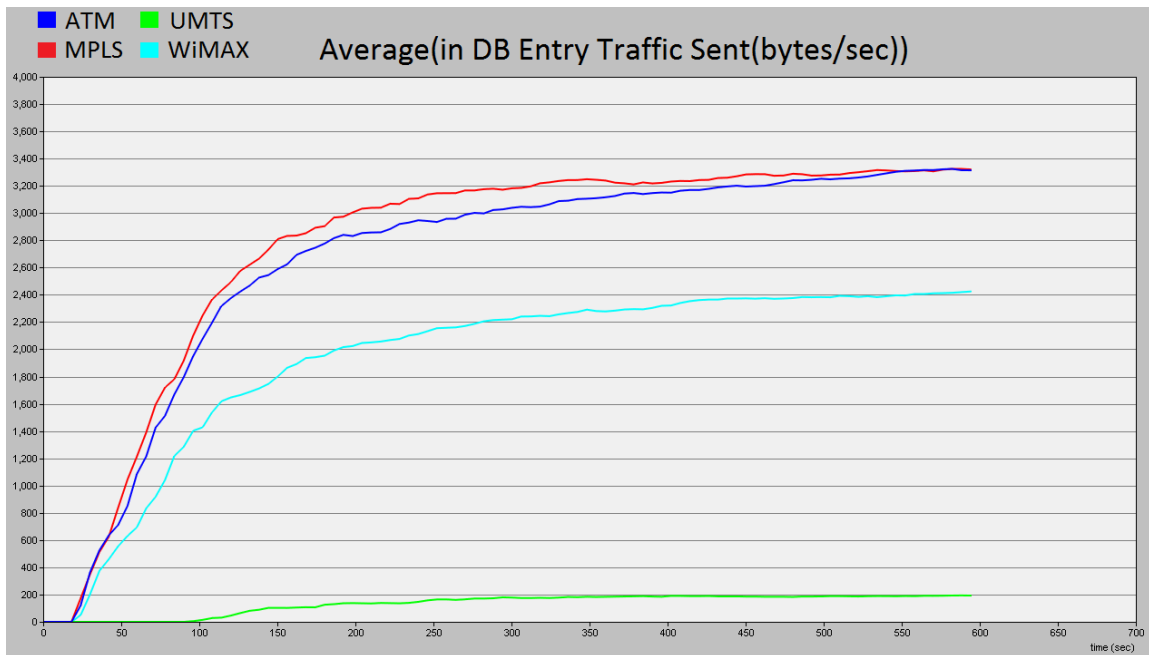


Εικόνα 7. 23 Database Entry Response Time(sec)

Ακολουθώς, γίνεται σύγκριση των ικανοτήτων λήψης και αποστολής πακέτων δεδομένων από και προς την βάση δεδομένων ανά δευτερόλεπτο [Εικόνες 7.24 και 7.25 αντίστοιχα]. Όπως και με το χρόνο απόκρισης έτσι και σε αυτές τις περιπτώσεις οι ενσύρματες τεχνολογίες παρουσιάζουν την καλύτερη απόδοση, υποστηρίζοντας λήψη και αποστολή δεδομένων της τάξης των 3.5 Kbytes ανά δευτερόλεπτο. Μεταξύ των ασύρματων πρωτοκόλλων υπερτερεί το WiMAX, που υποστηρίζει λήψη και αποστολή όγκου δεδομένων της τάξης των 2.5 Kbytes, τιμή πολύ ικανοποιητική για ασύρματη τεχνολογία. Η τεχνολογία UMTS έχει πάλι τη χειρότερη απόδοση, καθώς από την προσομοίωση προέκυψε ότι η βάση δεδομένων σε αυτή την περίπτωση έχει ικανότητα λήψης και αποστολής δεδομένων της τάξης μόλις των 200 Bytes ανά δευτερόλεπτο.

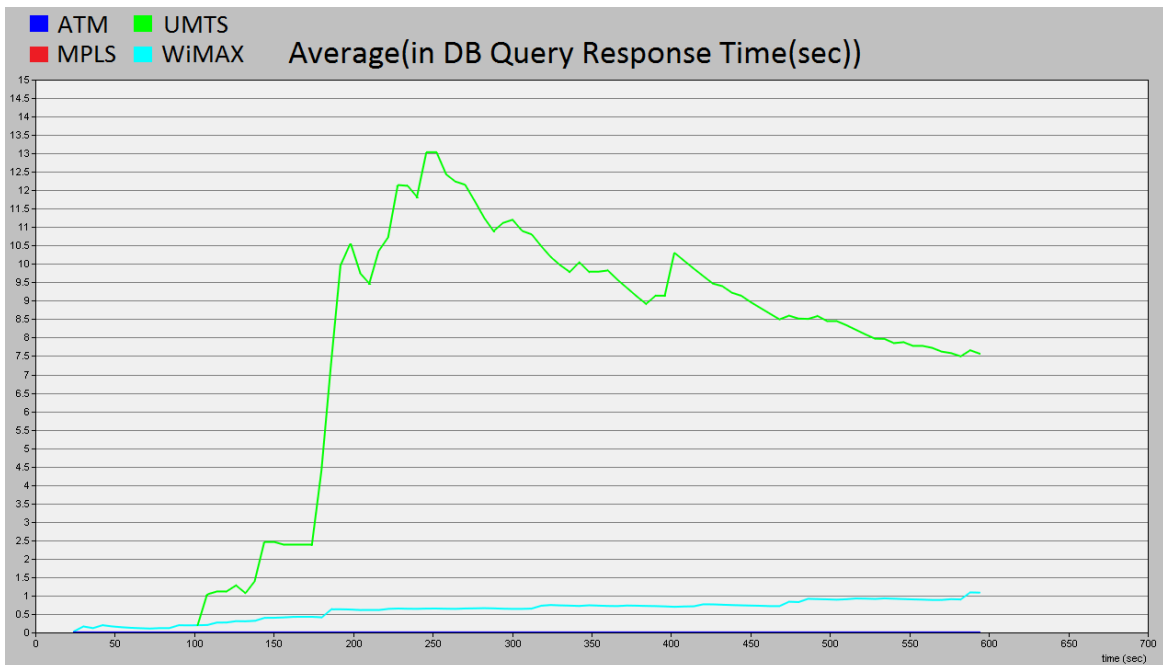


Εικόνα 7. 24 Database Entry Traffic Received (bytes/sec)



Εικόνα 7. 25 Database Entry Traffic Sent (bytes/sec)

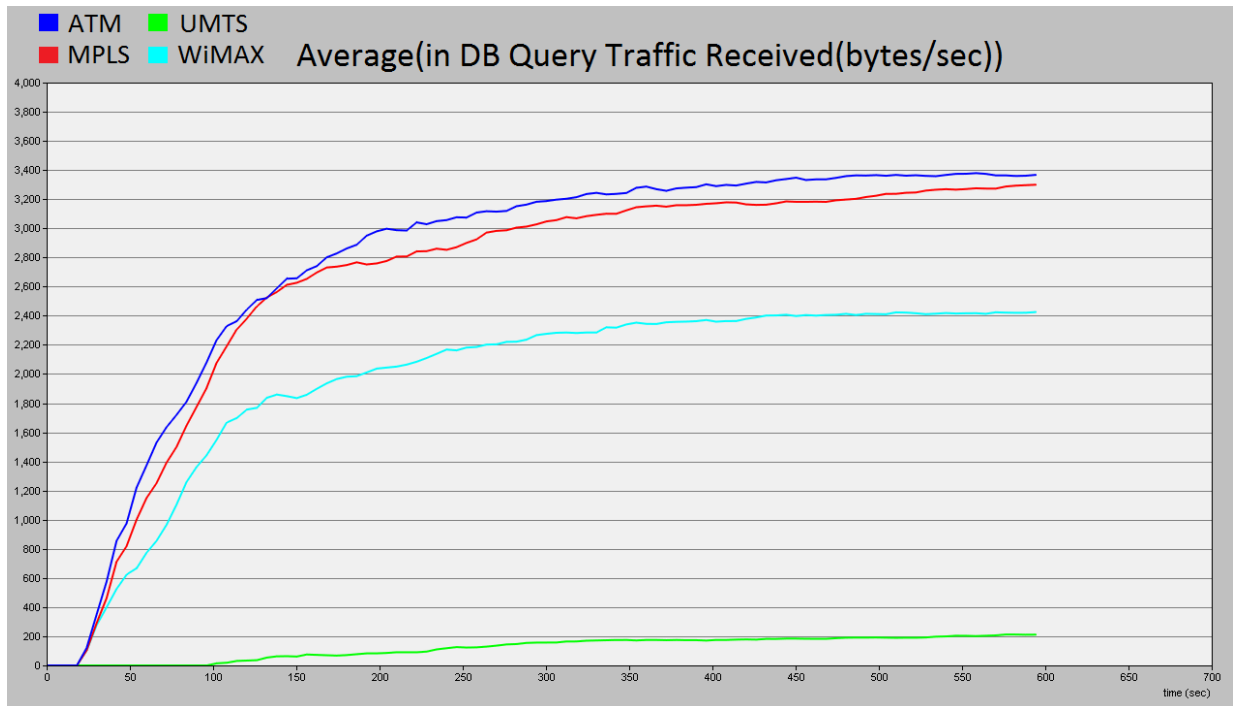
Κατ' αντιστοιχία με τα αποτελέσματα που αφορούν την εγγραφή δεδομένων στη βάση δεδομένων, παρακάτω δίνονται οι γραφικές που αφορούν τις αιτήσεις (queries) προς τη βάση δεδομένων.



Εικόνα 7. 26 Database Query Response Time(sec)

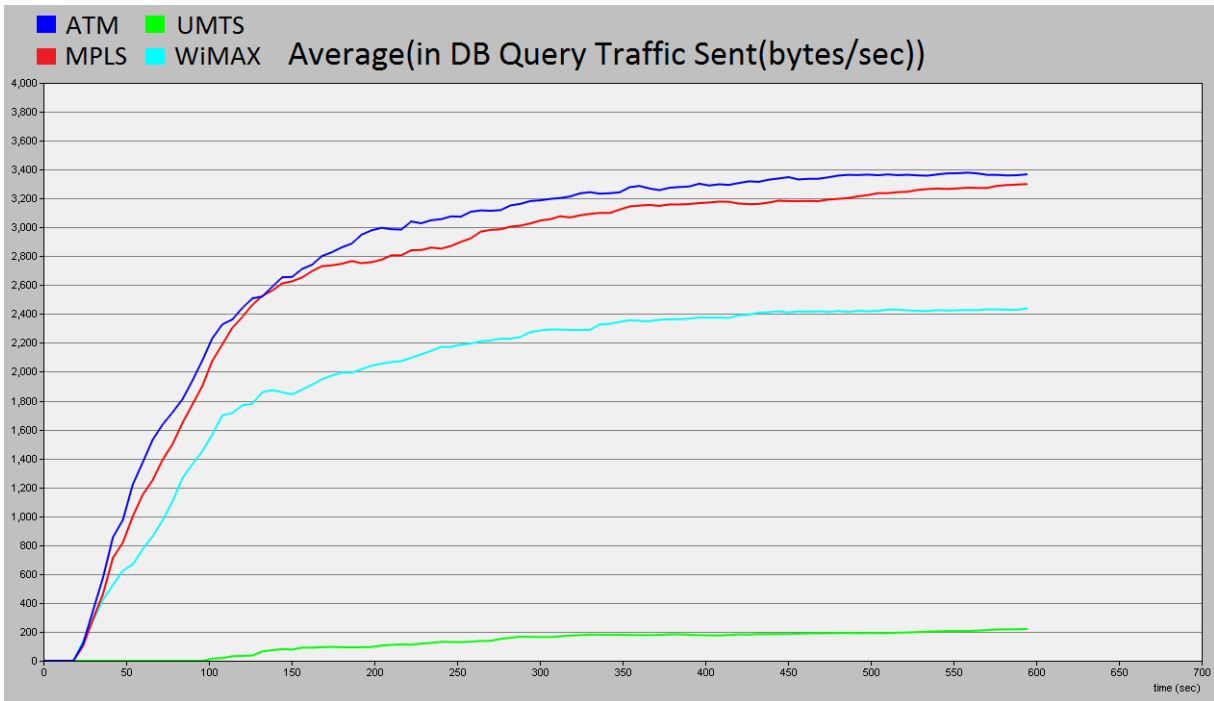
Όπως μπορεί να παρατηρήσει εύκολα κανείς, η απόδοση των πρωτοκόλλων ακολουθεί την ίδια μορφή με τις προηγούμενες γραφικές, αφού για άλλη μια φορά το UMTS έχει τη μεγαλύτερη

καθυστέρηση αντίδρασης σε κάποιο αίτημα από χρήστη, ενώ επόμενο στη σειρά είναι το άλλο ασύρματο πρωτόκολλο, WiMAX, Τους μικρότερους και κατά συνέπεια καλύτερους χρόνους απόκρισης επιτυγχάνουν τα δύο ενσύρματα πρωτόκολλα MPLS και ATM.



Εικόνα 7. 27 Database Query Traffic Received (bytes/sec)

Όσον αφορά την ικανότητα λήψης και απάντησης σε αιτήσεις από τη βάση δεδομένων τα αποτελέσματα είναι και πάλι ανάλογα με αυτά των γραφικών παραστάσεων των εικόνων 7.24 και 7.25. Πιο συγκεκριμένα, τα πρωτόκολλα ATM και MPLS βρίσκονται στις 2 πρώτες θέσεις ως προς την ικανότητα λήψης και απόκρισης σε αιτήσεις συνδρομητών από τη βάση δεδομένων. Ακολουθεί με αρκετά ικανοποιητική απόδοση το πρωτόκολλο WiMAX, ενώ και πάλι τελευταίο κατατάσσεται το πρωτόκολλο UMTS μεταδίδοντας μόλις 200 bytes/sec την ίδια στιγμή που το WiMAX μεταδίδει 2.5 kbytes/sec, το MPLS 3.3 kbytes/sec και το ATM 3.4 kbytes/sec. Γνωρίζοντας την αναλογία byte προς bit, εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς ότι εξυπηρετούνται αιτήσεις με ταχύτητες 1.6 kbps, 20 kbps, 26.4 kbps και 27.2 kbps αντίστοιχα. Αυτές είναι οι ταχύτητες για την εξυπηρέτηση αιτήσεων από τη βάση δεδομένων προς τους χρήστες και όχι όλων των εφαρμογών του δικτύου.

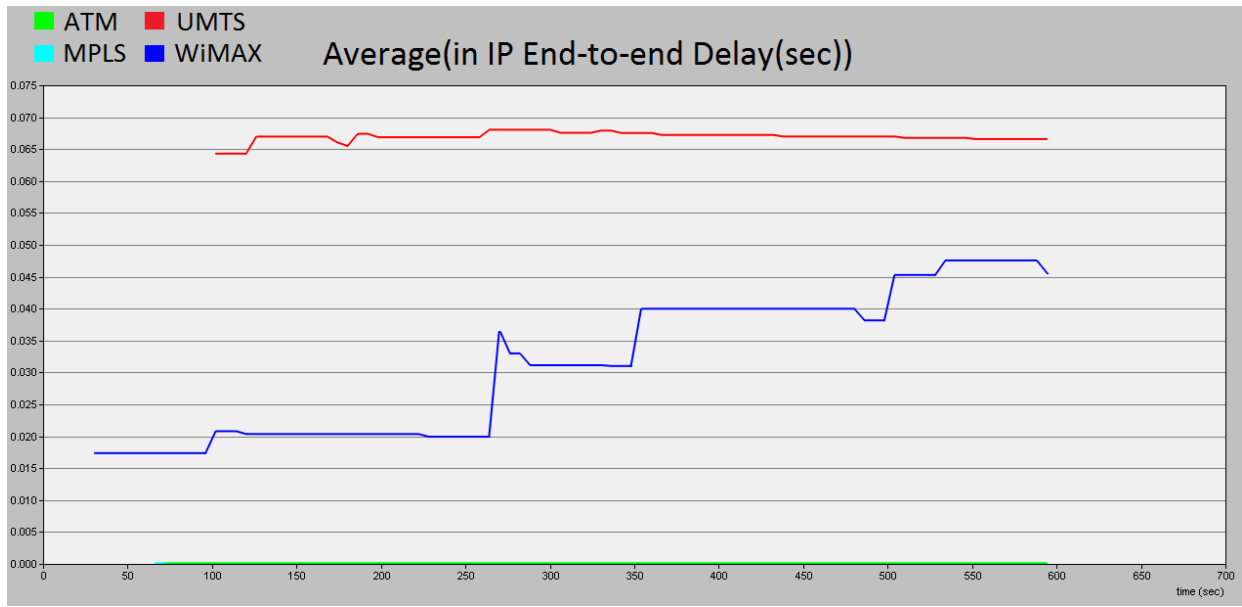


Εικόνα 7. 28 Database Query Traffic Sent (bytes/sec)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι φανερό πως το πρωτόκολλο UMTS δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στον αριθμό των χρηστών με αποτέλεσμα να μην εξυπηρετεί ένα μεγάλο αριθμό από αυτούς. Συνέπεια του προηγούμενου είναι ο πολύ μικρός αριθμός (σε σύγκριση με τις άλλες τεχνολογίες) δεδομένων που αποστέλονται κάθε δευτερόλεπτο στη βάση δεδομένων.

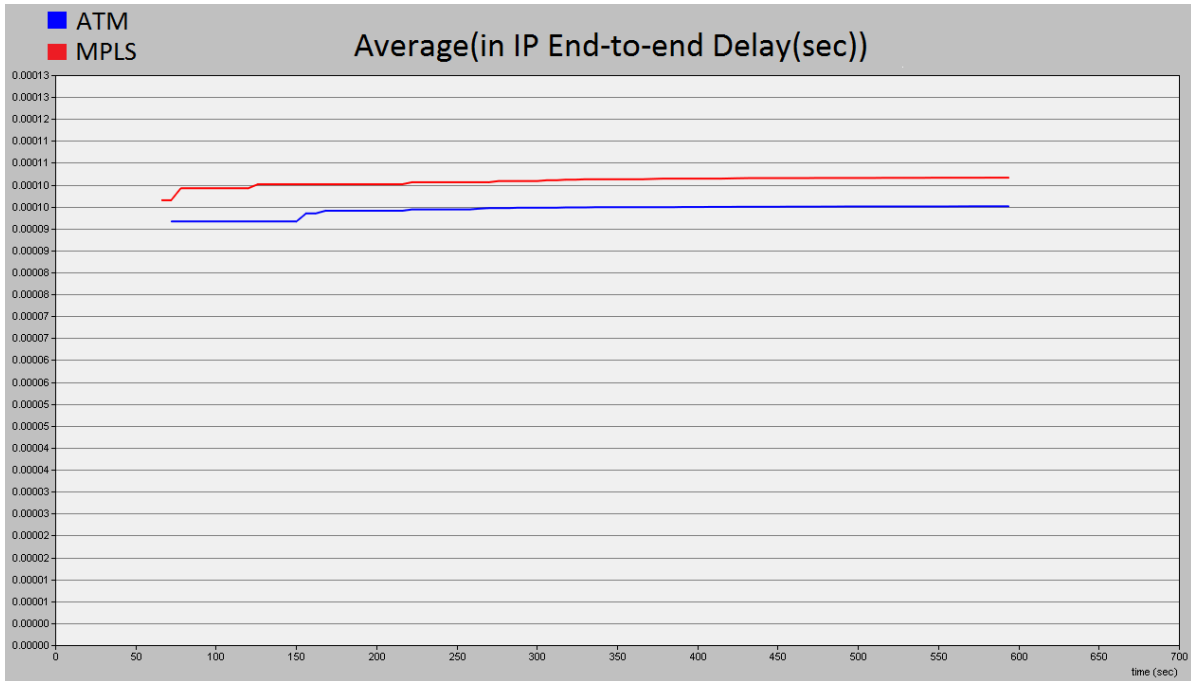
Η πολύ μεγάλη καθυστέρηση απόκρισης (response time) που έχει το UMTS, οφείλεται αφενός στις απαιτήσεις του ίδιου του πρωτοκόλλου (ανάγκη για Authentication χρηστών από ειδικό κομβό, ενημέρωση άλλου κόμβου για έγκριση σύνδεσης, πολλά στάδια επεξεργασίας μέχρι τη βάση δεδομένων) και αφετέρου στην συμφόρηση του δικτύου λόγω υπεραριθμίας χρηστών.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικές γραφικές παραστάσεις για την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-end delay), από τη βάση δεδομένων του δικτύου προς ένα τυχαίο τερματικό κόμβο. Η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι περίπου στα 70msec για την τεχνολογία UMTS και παραμένει σταθερή με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που δεν μπορεί να ειπεί για το WiMAX, το οποίο ξεκινά με αρκετά χαμηλή καθυστέρηση της τάξης των 20msec, η τιμή αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, φτάνοντας τα 50msec στο τέλος της προσομοίωσης. Το γεγονός πιθανότατα οφείλεται στο συνοστισμό όλο και περισσότερων αιτήσεων προς την βάση δεδομένων, για την εξυπηρέτηση των οποίων απαιτείται περισσότερος χρόνος από το διαθέσιμο.

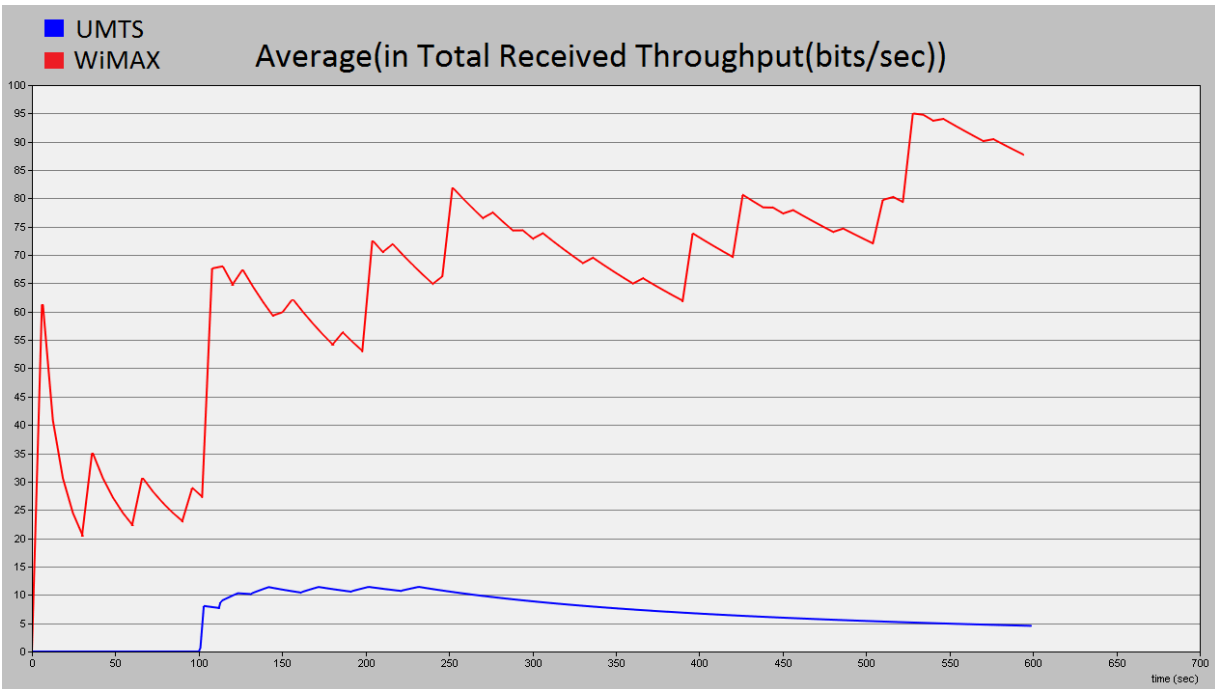


Εικόνα 7. 29 End to end Delay (all protocols)

Οι γραφικές των ενσύρματων πρωτοκόλλων επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τόσο με αυτές των δύο ασύρματων πρωτοκόλλων, όσο και μόνες τους. Ο λόγος που έγινε αυτή η επιλογή, είναι η μεγάλη διαφορά στις τιμές της καθυστέρησης σε σχέση με τα ασύρματα πρωτόκολλα που είχε ως αποτέλεσμα να φαίνονται μηδενικές οι καθυστερήσεις των ATM και MPLS στις γραφικές της εικόνας 7.29, ενώ κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Όπως φαίνεται λοιπόν από τις γραφικές της εικόνας 7.30, τα ενσύρματα πρωτόκολλα δεν έχουν μηδενική καθυστέρηση, παρόλο που κάτι τέτοιο δεν θα ήταν λανθασμένο να ειπωθεί ανάλογα με την κρισιμότητα της εφαρμογής, αφού η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται στα 0.1 msec και η σταθερότητα της κλίσης των δύο γραφικών, υποδεικνύει ότι δεν πρόκειται να αυξηθούν οι τιμές. Στη μελέτη που διενεργείται στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, η καθυστέρηση αυτού του μεγέθους είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική.



Εικόνα 7. 30 MPLS - ATM End to end Delay

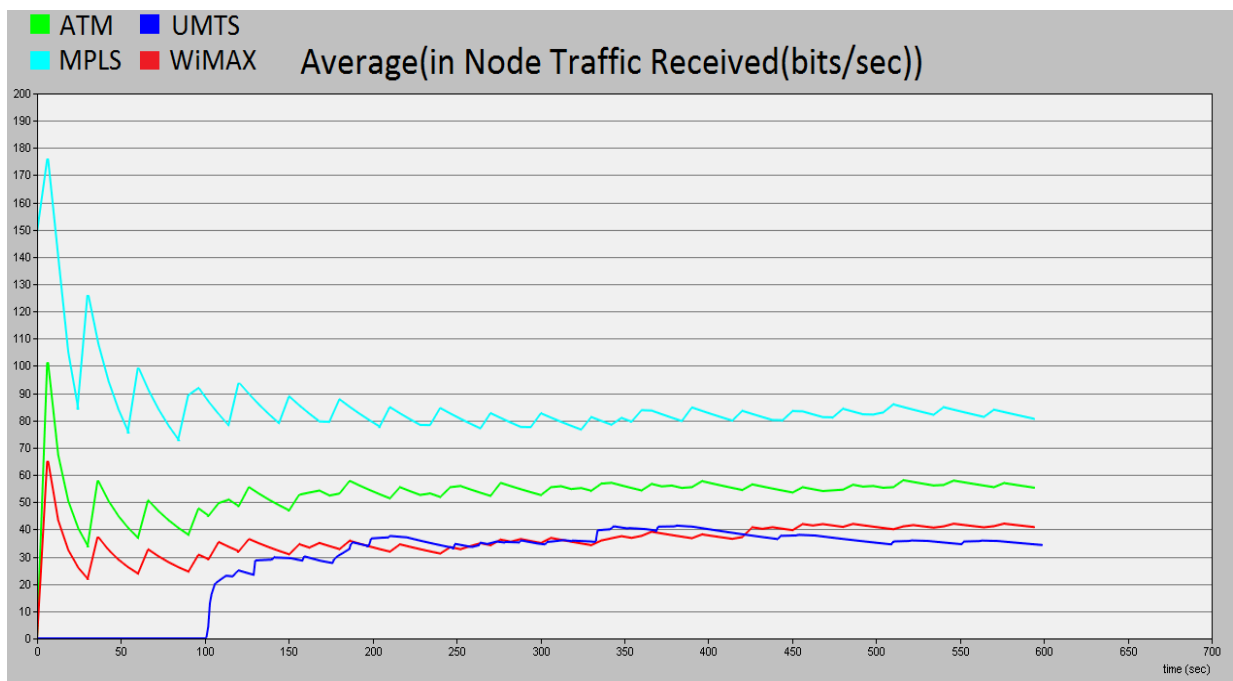


Εικόνα 7. 31 Umts - Wimax received throughput

Αξίζει μια επισκόπηση στις γραφικές, στις οποίες συγκρίνεται η συμπεριφορά τυχαίων κόμβων για τις επιδόσεις των ασύρματων πρωτοκόλλων. Από την εικόνα 7.31, συμπεραίνει κανείς ότι για τυχαίο κόμβο, το πρωτόκολλο WiMAX επιτρέπει τη λήψη μεγαλύτερου όγκου δεδομένων ανά δευτερόλεπτο σε σχέση με το πρωτόκολλο UMTS. Από τη μορφή της γραφικής παράστασης

του WiMAX, παρατηρείται αύξηση του μέσου λαμβανόμενου όγκου δεδομένων ανά δευτερόλεπτο, σε αντίθεση με τη γραφική του UMTS όπου ενώ αρχικά εμφανίζεται μια μικρή αύξηση στην συνέχεια η τιμή μειώνεται και σταθεροποιείται, δίνοντας την εντύπωση ότι η περαιτέρω αύξηση περιορίζεται από κάποιο ανώτατο όριο, που μπορεί να ονομαστεί κατώφλι αστάθειας.

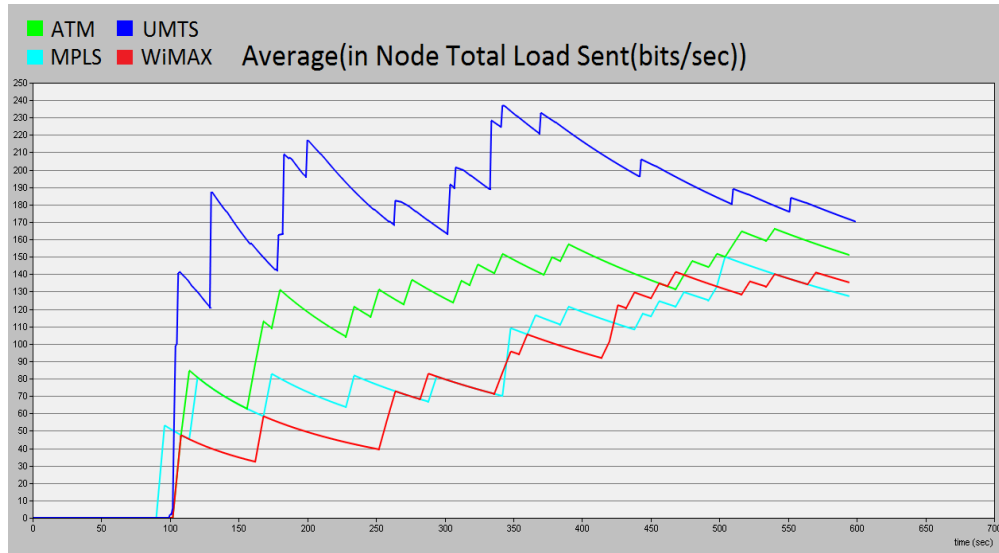
Συνεχίζοντας στο επίπεδο τερματικού κόμβου, στην εικόνα 7.32, δίνεται μια σύγκριση των τεσσάρων πρωτοκόλλων σχετικά με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον κόμβο ανά δευτερόλεπτο. Τα ενσύρματα πρωτόκολλα υπερτερούν των ασύρματων για άλλη μια φορά, με τη διαφορά του πιο αποδοτικού πρωτοκόλλου (MPLS) από το χειρότερο (UMTS) να είναι σχεδόν διπλάσια.



Εικόνα 7. 32 Node Traffic Received

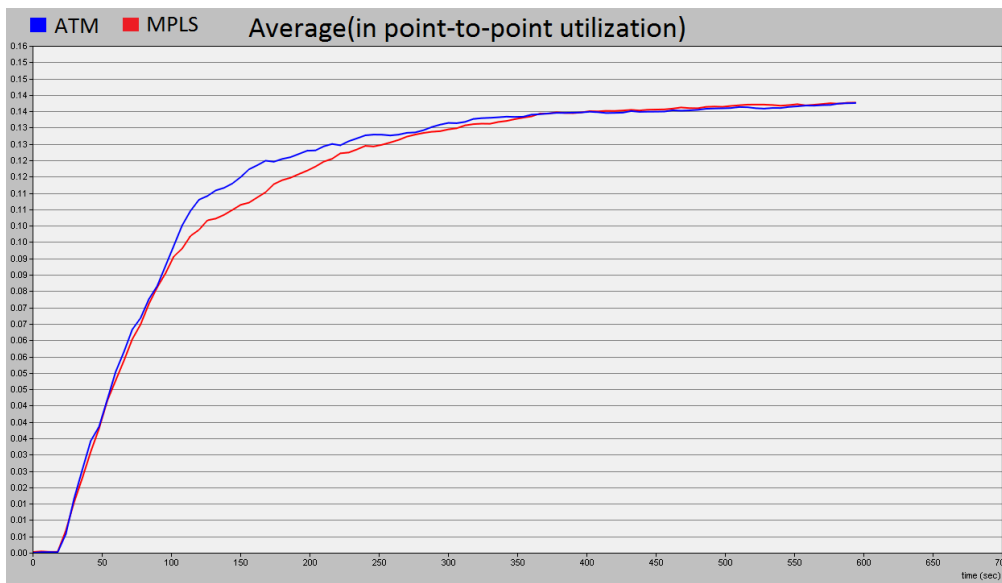
Στην εικόνα 7.33, δίνεται μια συγκριτική γραφική παράσταση για το μεταδιδόμενο φορτίο από ένα κόμβο. Στον κόμβο που επιλέχθηκε το πρωτόκολλο UMTS φαίνεται να έχει την βέλτιστη απόδοση μεταξύ των 4, ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι απολύτως σωστό. Μπορεί για το συγκεκριμένο κόμβο να έχει την υψηλότερη τιμή αποστολής δεδομένων, αλλά για πολλούς άλλους κόμβους η αντίστοιχη τιμή είναι μηδενική. Το δίκτυο UMTS είναι κατασκευασμένο με δυαδική λογική, δηλαδή είτε εξυπηρετεί πλήρως ένα κόμβο είτε δεν τον εξυπηρετεί καθόλου. Αποτέλεσμα είναι πολλοί κόμβοι του UMTS να μην μπορούν να επικοινωνήσουν με τη βάση δεδομένων, ενώ κάποιοι άλλοι να επιτυγχάνουν πλήρως λειτουργικές ζεύξεις χωρίς μείωση των αποσταλλόμενων δεδομένων.





Εικόνα 7. 33 Node Load Sent

Τέλος, στην παρακάτω γραφική, γίνεται σύγκριση της ποσοστιαίας χρήσης των ενσύρματων συνδέσεων που χρησιμοποιούνται στα σενάρια των ATM και MPLS. Η χρήση των γραμμών ακολουθεί όμοια συμπεριφορά και στα δύο πρωτόκολλα. Το ποσοστό χρήσης αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου και δείχνει να ακολουθεί λογαριθμική κατανομή. Τα ποσοστά χρήση των γραμμών και στις δύο περιπτώσεις είναι υπερβολικά χαμηλά, γεγονός αναμενόμενο αφού τα αποσταλλόμενα δεδομένα επιλέχθηκε να έχουν πολύ μικρό μέγεθος της τάξης μερικών bytes (16bytes). Αν είναι γνωστό ότι στην εφαρμογή πρόκειται να μεταδίδονται πακέτα μικρού μεγέθους, τότε πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο αλλαγής των ενσύρματων ζεύξεων με τύπους που υποστηρίζουν χαμηλότερες ταχύτητες, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το συνολικό κόστος εγκατάστασης.

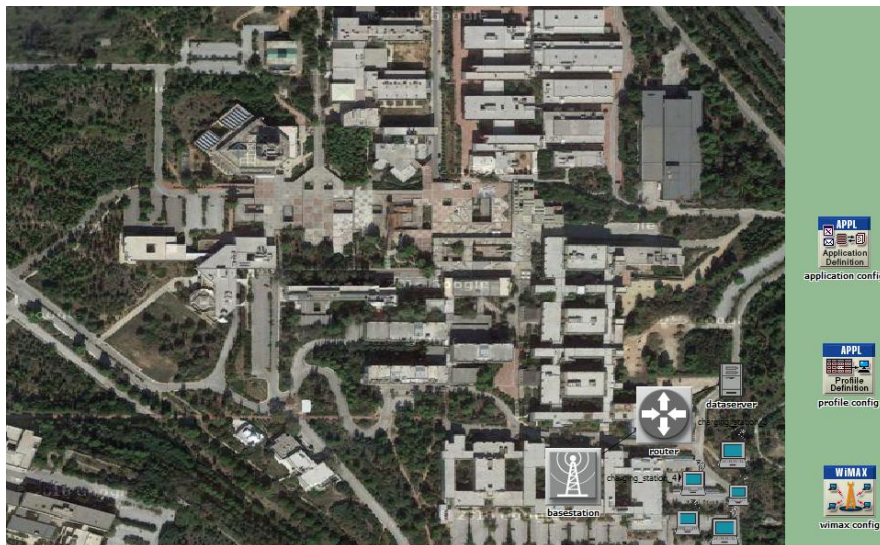


Εικόνα 7. 34 ATM - MPLS Link Utilization

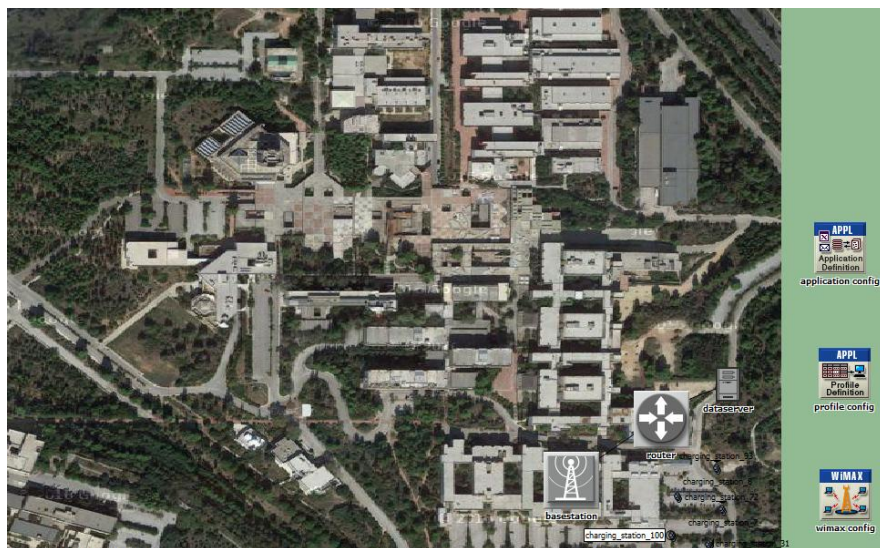
## 7.3 Μελέτη παραμέτρων δικτύου WiMAX με παράλληλη προσομοίωση Riverbed Modeler και Matlab

### 7.3.1 Μέθοδος διασύνδεσης Riverbed Modeler και Matlab (co-simulation)

Για το δεύτερο σκέλος της μελέτης, η προσοχή επιστήθηκε στη σύγκριση του χρόνου που απαιτείται για την μετάδοση των δεδομένων (WiMAX Delay) από όλο το δίκτυο. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε ως μοναδική τεχνολογία το WiMAX και δημιουργήθηκαν δύο σενάρια με μοναδική διαφορά τον αριθμό των συνδεδεμένων τερματικών κόμβων. Το πρώτο σενάριο υλοποιήθηκε με 5 κόμβους ενώ το δεύτερο με 100. Οι τοπολογίες των δύο σεναρίων δίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 7. 35 Τοπολογία δικτύου 5 κόμβων για παράλληλη προσομοίωση



Εικόνα 7. 36 Τοπολογία δικτύου 100 κόμβων για παράλληλη προσομοίωση

Και στα δύο σενάρια, οι κόμβοι λαμβάνουν ως είσοδο από το Matlab το μέγεθος των αποσταλλόμενων δεδομένων, όπως αυτό προκύπτει από την εκτέλεση του script “matlab\_riverbed.m”. Το script αυτό περιέχει μια δομή σε μορφή πίνακα, η οποία περιέχει τιμές για τις μεταβλητές ρεύματος, τάσης και ισχύος, ενώ μπορούν να προστεθούν πολύ εύκολα περισσότερες παράμετροι, όπως συντελεστής ισχύος και άεργος ισχύς. Για κάθε μια από τις παραμέτρους του πίνακα, μπορούν να αυξηθούν οι τιμές που περιλαμβάνονται, ανάλογα με το αν η αποστολή δεδομένων γίνεται ανά δευτερόλεπτο ή αν μεσολαβεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Με τη βοήθεια μιας συνάρτησης που προσφέρεται από τη βιβλιοθήκη συναρτήσεων του Matlab, υπολογίζεται το μέγεθος του πίνακα σε bytes και η τιμή αυτή επιστρέφεται ως έξοδος κατά την κλήση του script στο χώρο εργασίας του Matlab ή του Matlab Command Line, ανάλογα με την πηγή από όπου πραγματοποιήθηκε η κλήση του script.

Ο κώδικας που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα προστέθηκε στο function block του gna\_clsvr\_mgr process model, ώστε να καθίσταται δυνατή η λήψη δεδομένων από το Matlab, δηλαδή να είναι εφικτή η παράλληλη προσομοίωση και κατά συνέπεια η μετάδοση δεδομένων μεταξύ των δύο λογισμικών.

```

1  /*-----Matlab-----*/
2
3  #include <stdlib.h>
4  #include <stdio.h>
5  #include <string.h>
6  #include "engine.h"
7
8
9
10 int matlab_data()
11 {
12     Engine          *ep;
13     mxArray         *busdata = NULL;
14     int             value;
15
16     /* Open matlab engine or print failure message if this can't happen */
17     if (!(ep = engOpen("\0"))) {
18         fprintf(stderr, "\nCan't start MATLAB engine\n");
19         return (EXIT_FAILURE);
20     }
21
22     /* Add Matlab file path and call the script 'matlab_riverbed' which contains the array of energy data*/
23     /* along with the data manipulation code */
24     engEvalString(ep, "addpath('C:\\Documents and Settings\\me\\op_models')");
25     engEvalString(ep, "matlab_riverbed");
26
27     /* Retrieve the data from Matlab to Modeler */
28     busdata = engGetVariable(ep, "bus");
29     /* Check if the data arrive in proper format */
30     if(mxIsStruct(busdata))
31     {
32         value=mxGetScalar(mxGetField(busdata,0,"Size_in_bytes"));
33         printf("Charging Station Energy Data Size in bytes : %d \n",value);
34     }
35     else
36     {
37         /* If no structure found close matlab engine and return a failure message. */
38         printf("Oops...No structure found!\n");
39         mxDestroyArray(busdata);
40         engClose(ep);
41         return (EXIT_FAILURE);
42     }
43
44     printf("Matlab Finished!\n");
45     engClose(ep);
46     return (value);
47 }
48
49 /*-----Matlab-----*/

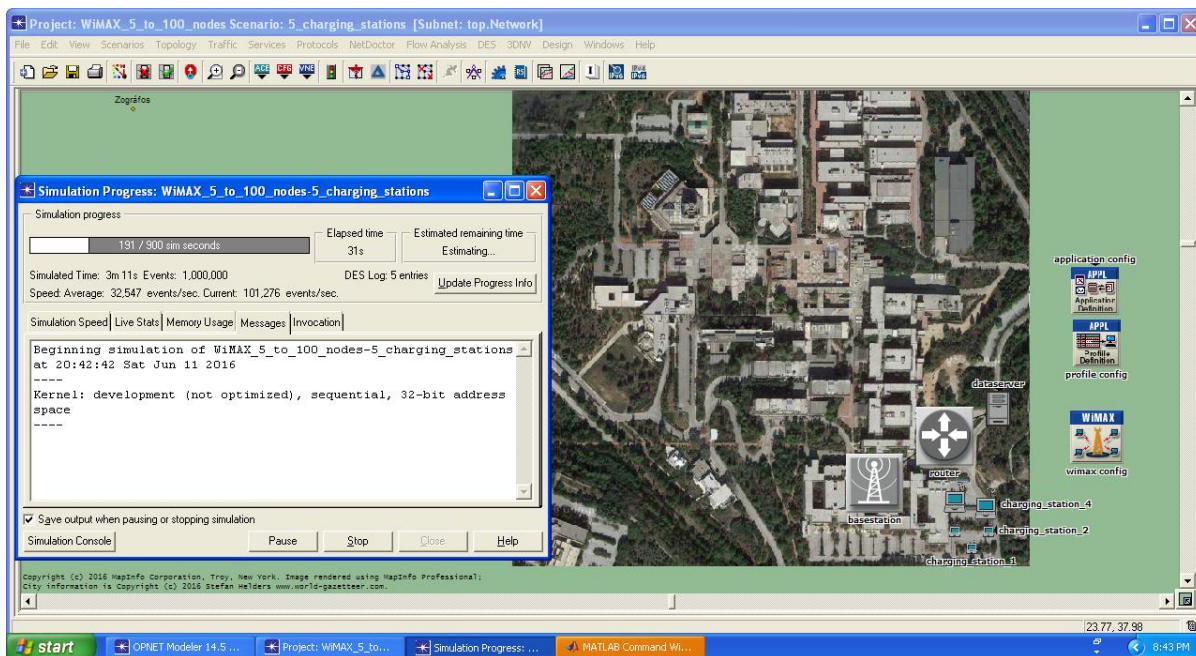
```

Εικόνα 7. 37 Κώδικας για την κλήση του Matlab από το Riverbed Modeler.

Η συνάρτηση “matlab\_data()” καλείται από τη συνάρτηση “gna\_client\_params\_parse()” που βρίσκεται επίσης στο function block και η οποία διατρέχει τις παραμέτρους που αφορούν τον κάθε κόμβο (σταθμό φόρτισης), μεταξύ των οποίων είναι και η παράμετρος που αφορά το μέγεθος των δεδομένων που αποστέλλονται σε bytes. Παρεμβάλλοντας λοιπόν τη συνάρτηση “matlab\_data()”, δίνεται η δυνατότητα αλλαγής του μεγέθους των αποστελλόμενων δεδομένων με τιμές που προκύπτουν από την εκτέλεση του κώδικα στο Matlab. Υπήρχε δυνατότητα τόσο άμεσης αλλαγής του μεγέθους των δεδομένων, όσο και έμμεσης κατά την οποία τα δεδομένα γράφονται σε ένα αρχείο μορφής .csv, το οποίο ελέγχεται ανά διαστήματα και οι τιμές του αλλάζουν τις παραμέτρους του κάθε κόμβου.

Αφού ολοκληρωθούν όλες οι αλλαγές στον κώδικα και γίνει η μεταγλώττιση του κώδικα επιτυχημένα, το πρόγραμμα είναι έτοιμο για την πραγματοποίηση της παράλληλης προσομοίωσης με λήψη πληροφορίας για το μέγεθος των αποστελλόμενων δεδομένων σε bytes από το Matlab.

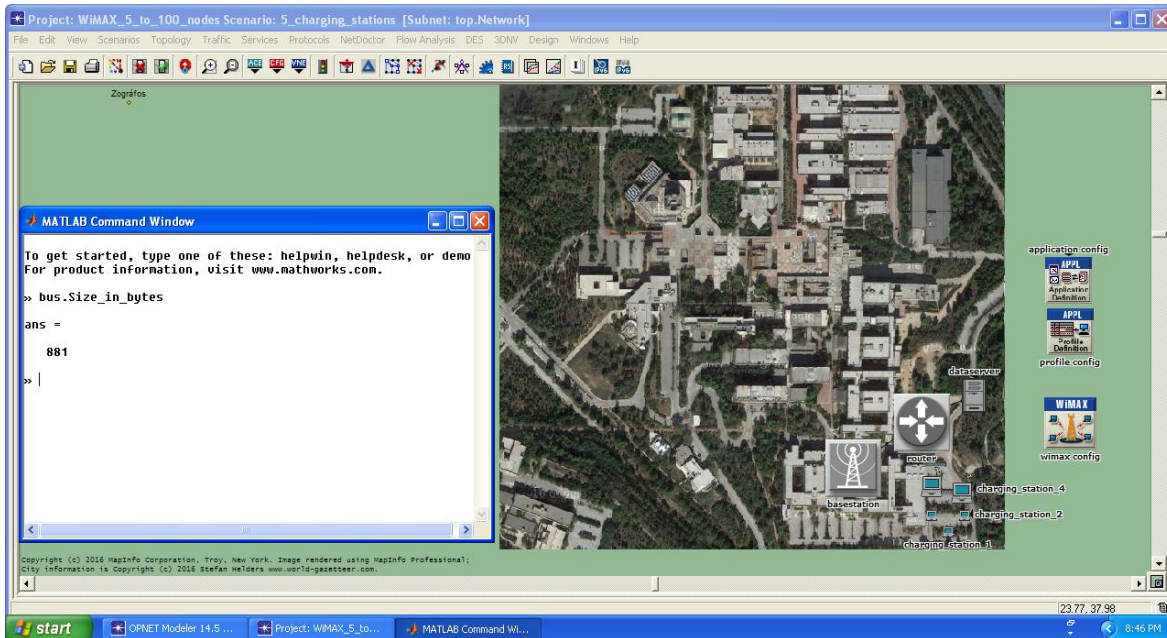
Η επόμενη εικόνα λήφθηκε κατά τη διάρκεια που εκτελείται η παράλληλη προσομοίωση και όπως φαίνεται, ενώ εκτελείται η προσομοίωση από το Riverbed Modeler, το λογισμικό φτάνει στο τμήμα του κώδικα που ενεργοποιεί το Matlab Engine, με αποτέλεσμα να ανοίγει το Matlab Command Line για να εκτελεστούν οι εντολές που ορίστηκαν στον κώδικα και να επιστραφεί ως τιμή το μέγεθος του πίνακα σε bytes.



Εικόνα 7. 38 Τοπολογία του δικτύου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, γίνεται χρήση του Matlab Command Line, το οποίο έχει ενεργοποιήσει το Riverbed Modeler κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσο είναι λειτουργικό το σύστημα που κωδικοποιήθηκε. Ο έλεγχος μπορεί να

επιτευχθεί πολύ απλά ζητώντας από το Matlab Command Line την τιμή που έχει η μεταβλητή “Bus.Size\_in\_bytes”. Επειδή η μεταβλητή επιστρέφει κάποια αναμενόμενη τιμή, γίνεται αντιληπτό ότι ο κώδικας λειτουργεί όπως αναμενόταν. Η λειτουργικότητα εξακριβώνεται και από την επόμενη εικόνα, στην οποία φαίνεται πως όταν ζητείται η τιμή της μεταβλητής “Bus.Size\_in\_bytes”, επιστρέφεται η τιμή 881, αριθμός που αναφέρεται σε Bytes. Το “Bus” είναι το όνομα της δομής στην οποία αποθηκεύονται όλες οι επιθυμητές τιμές. Γράφοντας απλά τη λέξη Bus στο Matlab Command Line, εμφανίζονται όλες οι μεταβλητές που έχουν καταχωρηθεί για τη συγκεκριμένη δομή.



Εικόνα 7. 39 Προβολή τελευταίας τιμής δεδομένων σε bytes από το Matlab Console.

### 7.3.2 Περιγραφή μελέτης

Η συγκεκριμένη μελέτη δεν χρειάζεται ιδιαίτερη προεργασία, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τοπολογία WiMAX που δημιουργήθηκε στο πρώτο σενάριο του προηγούμενου σκέλους της μελέτης.

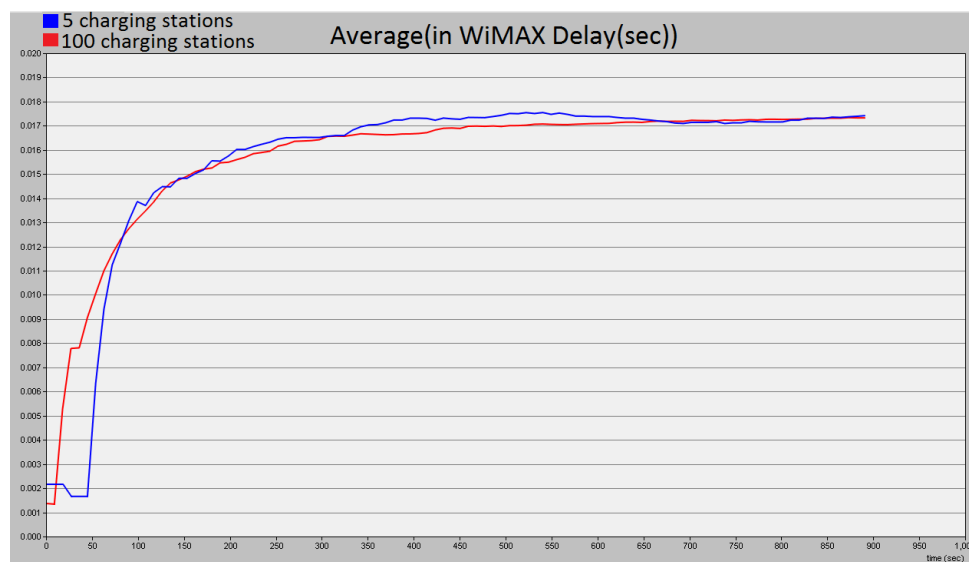
Από την τοπολογία του 1<sup>ου</sup> σεναρίου αφαιρέθηκαν όλα τα υποδίκτυα και διαγράφηκαν όλοι οι τερματικοί σταθμοί. Στην συνέχεια προστέθηκαν 5 τερματικοί σταθμοί στο χώρο στάθμευσης των παλιών κτιρίων της σχολής ηλεκτρολόγων μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών για το πρώτο σενάριο προσομοίωσης, ενώ για το δεύτερο σενάριο προστέθηκαν 100 σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

Σε όλους τους σταθμούς φόρτισης ρυθμίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων κατ' αντιστοιχία με τις παραμέτρους των σταθμών φόρτισης του 1<sup>ου</sup> σεναρίου του πρώτου σκέλους της μελέτης. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του συστήματος παρέμειναν αμετάβλητες.

Έχοντας ολοκληρώσει τις ρυθμίσεις των παραμέτρων και για τα δύο σενάρια του δεύτερου σκέλους της μελέτης και δεδομένου ότι έχει πραγματοποιηθεί επιτυχώς η διασύνδεση των δύο λογισμικών για ανταλλαγή δεδομένων, ο χρήστης μπορεί να προβεί στην εκτέλεση προσομοίωσης για τα δύο σενάρια της μελέτης και να λάβει τα αποτελέσματα που επιλέχθηκαν σε γραφική μορφή.

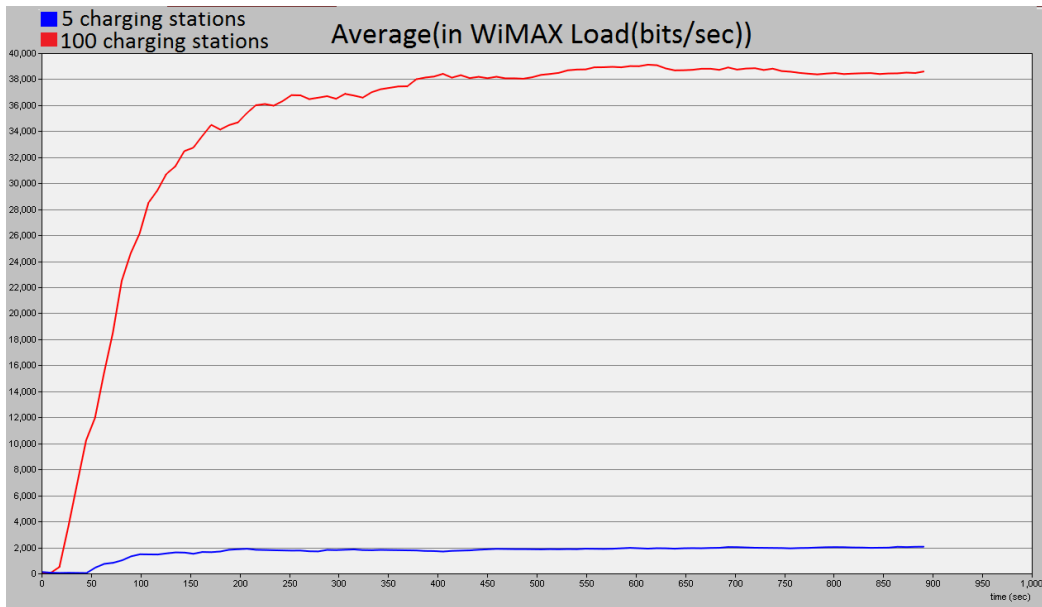
### 7.3.3 Αποτελέσματα Μελέτης

Από τα αποτελέσματα του δεύτερου σκέλους της μελέτης, παρουσιάζονται οι γραφικές που αφορούν την καθυστέρηση (DB Entry response time) λήψης των δεδομένων από τη βάση δεδομένων, την καθυστέρηση της μετάδοσης (WiMAX Delay) και τον όγκο της μεταδιδόμενης πληροφορίας (WiMAX Load) για τα σενάρια με 5 και 100 σταθμούς φόρτισης αντίστοιχα.



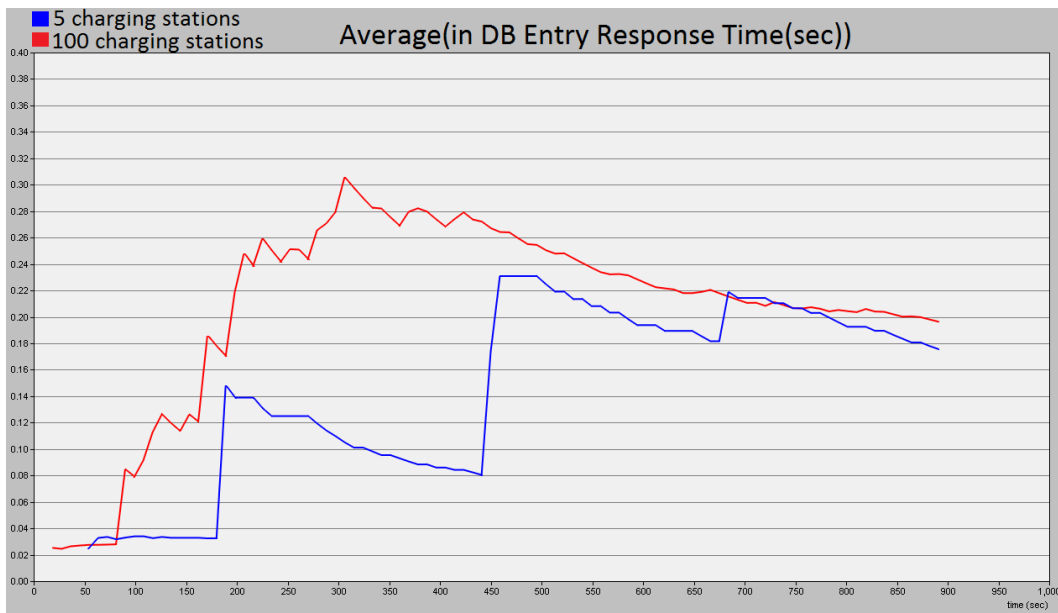
Εικόνα 7. 40 WiMAX Delay (sec)

Από τις γραφικές που παρουσιάζονται στις εικόνες 7.40 και 7.41, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι παρά την κατακόρυφη αύξηση του όγκου της μεταδιδόμενης πληροφορίας στο σενάριο των 100 κόμβων, δεν παρατηρείται αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης (delay). Τα αποτελέσματα αυτά είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά για την τεχνολογία WiMAX, αφού η ταχύτητα και ο χρόνος που απαιτείται για την μετάδοση δεδομένων από τους τερματικούς κόμβους προς το σταθμό βάσης για να καταλήξουν στην συνέχεια στη βάση δεδομένων είναι πολύ σημαντικοί παράμετροι. Η μικρή καθυστέρηση εξασφαλίζει συνεχή ροή δεδομένων αφού δε μεσολαβεί μεγάλο χρονικό διάστημα από τη στιγμή που αναχωρεί ένα πακέτο από τερματικό κόμβο έως ότι φτάσει στο σταθμό βάσης.



Εικόνα 7. 41 WiMAX Load (bits/sec)

Η μόνη αξιόλογη μεταβολή, που εμφανίζεται στις παραμέτρους των δύο σεναρίων, είναι στο χρόνο απόκρισης της βάσης δεδομένων κατά την εγγραφή των πληροφοριών [εικόνα 7.42]. Η γραφική δείχνει μεγάλη αύξηση με τριπλασιασμό του χρόνου απόκρισης της βάσης δεδομένων σε εγγραφή, για το σενάριο με τους 100 κόμβους. Στην συνέχεια, όμως, ο χρόνος αυτός μειώνεται και σταδιακά τείνει προς το χρόνο απόκρισης της βάσης δεδομένων για το σενάριο των 5 κόμβων. Τελικά, η διαφορά στο χρόνο απόκρισης μεταξύ των δύο σεναρίων, είναι περίπου 40msec, τιμή απολύτως αποδεκτή αν ληφθεί υπόψη η κατακόρυφη αύξηση του φορτίου που κυκλοφορεί στο δίκτυο.



Εικόνα 7. 42 Database Entry Response Time (sec)

## Κεφάλαιο 8 : Συμπεράσματα Μελετών και Προτάσεις για το Μέλλον

### 8.1 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της μελέτης που έλαβε χώρα στην παρούσα διπλωματική εργασία, κατέστη δυνατή η εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων, τόσο γενικής φύσεως γύρω από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιήθηκαν, όσο και ειδικής φύσεως, που σχετίζονται με την ανάδειξη της βέλτιστης λύσης για την μετάδοση δεδομένων σε εφαρμογές σύνδεσης ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την σύγκριση των πρωτοκόλλων στο πρώτο σκέλος της μελέτης, αναδεικνύεται το μεγάλο πλεονέκτημα της ενσύρματης μετάδοσης δεδομένων, που δεν είναι άλλο από την μικρή καθυστέρηση και την ικανότητα επίτευξης υψηλών ρυθμών μετάδοσης, που δεν επηρεάζονται από εξωγενείς παράγοντες, όπως είναι οι καιρικές συνθήκες, αλλά μόνο από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των γραμμών.

Η ανάδειξη ωστόσο της βέλτιστης λύσης, λαμβάνοντας υπόψιν μονάχα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δεν αποτελεί συνετή απόφαση. Τα ενσύρματα πρωτόκολλα μπορεί να παρουσιάζουν κάποια πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων είναι η υψηλή αξιοπιστία και αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά δεν παύει να χαρακτηρίζονται και από κάποια αρνητικά στοιχεία τα οποία σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να παραληφθούν κατά τη σύγκριση. Η απαίτηση ύπαρξης ενσύρματης ζεύξης αποτελεί αυτό καθ' αυτό τροχοπέδη, καθώς η επέκταση ενός υφιστάμενου δικτύου για την προσθήκη νέων συνδρομητών ή η εγκατάσταση νέων τερματικών για συνδρομητές, απαιτεί την προσθήκη φυσικών πόρων, όπου ακόμη και στην πιο απλή περίπτωση, όπου χρειάζονται μονάχα εγκατάσταση καλωδίων, πρέπει να πραγματοποιηθούν εκτενείς εργασίες και παρεμβάσεις σε υφιστάμενους χώρους, κάτι που πολλές φορές δεν είναι εφικτό. Από τεchnοοικονομικής απόψεως λοιπόν, πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο αυτά που προσφέρει κάθε υλοποίηση όσο και το κόστος υλοποίησης και συντήρησης των εγκαταστάσεων.

Από την πλευρά τους τα ασύρματα πρωτόκολλα, δεν μπορούν, ούτε κατά διάνοια, να ανταγωνιστούν τις επιδόσεις των ενσύρματων, ιδιαίτερα αυτές που αφορούν την καθυστέρηση μετάδοσης, με το χάσμα να ξεπερνά τις 2 τάξεις μεγέθους σε επίπεδο χρονικής καθυστέρησης από άκρο σε άκρο. Το γεγονός, επίσης, ότι κάθε ασύρματη ζεύξη είναι επιρρεπής σε μεταβολές εξωγενών παραγόντων, όπως είναι οι καιρικές συνθήκες, ενώ παράλληλα εξαρτώνται άμεσα από τις διαλείψεις που εμφανίζονται στον διάυλο επικοινωνίας, αποτελεί άλλο ένα μειονέκτημα αυτού του τύπου τις τεχνολογίες. Στο τέλος του 7<sup>ου</sup> κεφαλαίου, ωστόσο, αναφέρθηκε χαρακτηριστικά ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το ασύρματο πρωτόκολλο WiMAX είναι πολύ ενθαρρυντικά. Η αναφορά αυτή έγινε διότι το συγκεκριμένο ασύρματο πρωτόκολλο, μπορεί να μην έφτανε τις επιδόσεις των ενσύρματων, αλλά τις πλησίαζε σε πολύ ικανοποιητικό, για την εφαρμογή, βαθμό. Αν αναλογιστεί κανείς αυτό το γεγονός και λάβει υπόψιν του το



χαμηλό κόστος εγκατάστασης και το ακόμη χαμηλότερο έως μηδαμινό κόστος συντήρησης και επέκτασης ενός δικτύου WiMAX, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η επιλογή του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου για τη σύνδεση ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ τους, αποτελεί τη βέλτιστη λύση, μεταξύ των τεσσάρων.

Το παραπάνω συμπεραίνεται, στην περίπτωση που δεν υφίστανται ήδη εγκατεστημένοι δικτυακοί πόροι για κάποια τεχνολογία από τις 4. Τυχούσα ύπαρξη εγκατεστημένων υποδομών, οφείλεται να συμπεριληφθεί ως δεδομένο κατά την ανάλυση των στοιχείων της μελέτης, καθώς αναμένεται να επηρεάσει κατά πολύ την τελική επιλογή.

Αφού ολοκληρώθηκε η σύγκριση των τεσσάρων πρωτοκόλλων στο πρώτο σκέλος της μελέτης, επιλέχθηκε το πρωτόκολλο WiMAX για να προσομοιωθεί η λειτουργία του σε ένα ακόμη πιο ρεαλιστικό περιβάλλον, εισάγοντας τον ακριβή όγκο δεδομένων που μεταδίδονται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Η αλλαγή του όγκου της μεταδιδόμενης πληροφορίας από τα 16 bytes, που χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση των τεσσάρων τεχνολογιών, σε μια τιμή που μεταβάλλεται συνεχώς και κυμαίνεται γύρω στα 800-900 bytes, αναμένεται να αλλάξει άρδην τα αποτελέσματα που λήφθηκαν στο πρώτο σκέλος της μελέτης, με πιθανότητα το πρωτόκολλο WiMAX να αποκλειστεί ως ικανή λύση. Αντιθέτως, τα αποτελέσματα της δεύτερης προσομοίωσης υποστηρίζουν ακόμη περισσότερο το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, αφού αναδεικνύεται ικανή τηλεπικοινωνιακή λύση για τη σύνδεση ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

## 8.2 Προτεινόμενες Τοπολογίες

Δίνοντας έμφαση στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε πρωτοκόλλου και στα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τα δύο σκέλη της μελέτης, προτείνεται μια εναλλακτική τοπολογία που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο πρωτοκόλλων για να επιτευχθούν ακόμη καλύτερες επιδόσεις. Η τοπολογία αυτή προτείνεται με γνώμονα την αύξηση της τιμής του λόγου

$$\frac{\text{υψηλότερες δυνατές επιδόσεις}}{\text{ελαχιστοποίηση του κόστους}}$$

και αποτελείται από ένα ενσύρματο και ένα ασύρματο πρωτόκολλο. Η ιδέα αυτή μπορεί αρχικά να δίνει την εντύπωση τεράστιας αύξησης του κόστους εγκατάστασης, ωστόσο ο τρόπος υλοποίησης μπορεί να αποδείξει ακριβώς το αντίθετο για το συνολικό κόστος του δικτύου με την παράλληλη βελτίωση των επιδόσεων.

Η ιδέα περιλαμβάνει ένα ενσύρματο και ένα ασύρματο πρωτόκολλο, έτσι ώστε να επωφεληθεί το δίκτυο από την ελευθερία που προσφέρουν τα ασύρματα πρωτόκολλα και την αξιοπιστία που προσφέρουν τα ενσύρματα. Στην περίπτωση που υπάρχει ήδη εγκατεστημένο δίκτυο για κάποια τεχνολογία, θα πρέπει να ελεγχθεί αν συμφέρει περισσότερο να επεκταθεί το υπάρχον σύστημα,

παρά να προστεθεί κάποιο νέο. Επίσης, αν πρόκειται να προστεθούν και άλλοι κόμβοι εκτός Πολυτεχνειούπολης στο δίκτυο, οφείλεται να ληφθεί και αυτό ως παράμετρος υπόψη.

Επειδή ακριβώς είναι πολύ χρονοβόρο και κοστοβόρο να εγκατασταθούν νέα ενσύρματα δίκτυο, καθώς απαιτούν φυσική παρέμβαση σε διαφόρων ειδών υποδομές, όπως είναι οι δρόμοι και τα κτίρια, πρώτη σκέψη προς τη σωστή κατεύθυνση είναι η χρήση ασύρματης δικτύωσης για τη σύνδεση των τερματικών κόμβων και η χρήση ενσύρματης δικτύωσης για μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων από κεντρικά σημεία κάθε περιοχής.

Για παράδειγμα, στην τοπολογία με τους τρεις χώρους στάθμευσης που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ασύρματη τεχνολογία (π.χ. WiMAX ή Wi-Fi) για την μετάδοση δεδομένων από τους σταθμούς φόρτισης των οχημάτων προς ένα κεντρικό δρομολογητή που θα υπάρχει σε κάθε χώρο στάθμευσης, ενώ η διασύνδεση όλων των κεντρικών δρομολογητών από όλους τους χώρους στάθμευσης προς τον δρομολογητή της βάσης δεδομένων, μπορεί να πραγματοποιείται με ενσύρματες τεχνολογίες (π.χ. MPLS, ATM, Ethernet) για τη διασφάλιση υψηλής αξιοπιστίας και επιδόσεων για όλο το σύστημα. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές μικρότερων δυνατοτήτων κεραιές ασύρματης δικτύωσης, οι οποίες θα έχουν και μειωμένο κόστος, αφού θα μπορούν να εξυπηρετήσουν μικρό αριθμό συνδρομητών με διαχειρίσιμο μεταδιδόμενο όγκο δεδομένων, ενώ παράλληλα θα μειώνεται και το κόστος ενσύρματης δικτύωσης, αφού δεν απαιτείται η εγκατάσταση νέων γραμμών για τη διασύνδεση κάθε σταθμού φόρτισης. Μια προσθήκη στην παραπάνω πρόταση, είναι η δημιουργία βρογχοειδούς δικτυακού συστήματος, κόμβοι του οποίου θα είναι οι κεντρικοί δρομολογητές των χώρων στάθμευσης, προσδίδοντας επιπλέον αξιοπιστία και ευελιξία στο σύστημα με τη παροχή εναλλακτικών διαδρομών για τη δρομολόγηση πακέτων από ένα κόμβο σε κάποιο άλλο.

### 8.3 Προτάσεις για Μελλοντικές μελέτες

Η μορφή της τοπολογίας που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να αποτελέσει θέμα μελέτης ως επέκταση της παρούσας διπλωματικής, έτσι ώστε να παρατηρηθεί κατά πόσο είναι συμφέρουσα από τεχνοοικονομικής πλευράς η εγκατάσταση μιας τοπολογίας, που συνδυάζει ενσύρματη και ασύρματη μετάδοση δεδομένων, καθώς επίσης οφείλεται να ελεγχθεί αν τα επιλεγμένα πρωτόκολλα παρουσιάζουν πράγματι βελτιωμένες επιδόσεις σε σχέση με υλοποιήσεις στις οποίες χρησιμοποιείται μόνο ένας τύπος διασύνδεσης.

Ένα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης, που μπορεί να ερευνηθεί ως επέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η παράλληλη προσομοίωση των λογισμικών Riverbed Modeler και Matlab (Matpower και Simulink) με στόχο την ανάλυση και προσομοίωση σύνδεσης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο από τηλεπικοινωνιακής όσο και από ενεργειακής πλευράς. Δηλαδή, να μην γίνεται μόνο αποστολή ενεργειακών δεδομένων από το Matlab προς το Riverbed Modeler για τον υπολογισμό τηλεπικοινωνιακών παραμέτρων, αλλά να

συμβαίνει και το αντίθετο, γεγονός που θα επιτρέπει την παρατήρηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος, τα αποτελέσματα του οποίου θα προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια ένα πραγματικό δίκτυο, εξαιτίας της υψηλής ακρίβεια σχεδίασης και της ρεαλιστική αλληλεπίδρασης μεταξύ ενεργειακών και τηλεπικοινωνιακών παραμέτρων.

## Βιβλιογραφία

- [1] S. team, «Statista,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.statista.com/statistics/281134/number-of-vehicles-in-use-worldwide/>. [Πρόσβαση 12 5 2016].
- [2] Ε. Σ. ΑΡΧΗ, «ΕΛΣΤΑΤ,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [www.statistics.gr](http://www.statistics.gr). [Πρόσβαση 12 5 2016].
- [3] Γ. Εμμανουηλίδης, ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ, 2011.
- [4] E. t. p. f. t. e. n. o. t. future, «ETPSmartGrids,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.smartgrids.eu/ETPSmartGrids>. [Πρόσβαση 22 May 2016].
- [5] «Εθνικό Τυπογραφείο,» 15 January 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.et.gr/idoscs-nph/search/pdfViewerForm.html?args=5C7QrtC22wE4q6ggiv8WTXdtvSoClrL8J6SqjdSFK\\_HtΠ9LGdkF52dKwsMi1xmmyqxSQYNUqAGCF0IfB9HI6qSYtMQEkEHLwnFqmgJSA5WIsluV-nRwO1oKqSe4BIOTSpEWYhszF8P8UqWb\\_zFijLOWoQVnwUH\\_YNCPDFmSmVSdB3BJTSPfhJJMqWIqebd7](http://www.et.gr/idoscs-nph/search/pdfViewerForm.html?args=5C7QrtC22wE4q6ggiv8WTXdtvSoClrL8J6SqjdSFK_HtΠ9LGdkF52dKwsMi1xmmyqxSQYNUqAGCF0IfB9HI6qSYtMQEkEHLwnFqmgJSA5WIsluV-nRwO1oKqSe4BIOTSpEWYhszF8P8UqWb_zFijLOWoQVnwUH_YNCPDFmSmVSdB3BJTSPfhJJMqWIqebd7). [Πρόσβαση 23 May 2016].
- [6] Α. Μπασιάκου και Α. Ντάλα, ΑΝΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ATM – FRAME RELAY, Άρτα, 2004.
- [7] A. Forum, «ATM Forum,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.atmforum.com>.
- [8] Α. ΚΙΤΣΑΚΗΣ και Π. ΠΑΛΛΑ, Asynchronous Transfer Mode(Κατάσταση Ασύγχρονης Μεταφοράς), ΜΕΣΟΛΟΓΓΙ, 2005.
- [9] Θ. Ντούσκα, Ασύγχρονος Τρόπος Μεταφοράς (Δίκτυα Υψηλών Ταχυτήτων), Καβάλα.
- [10] Κ. Μαμούκαρης, «Ασύγχρονος Τρόπος Μεταφοράς - ATM».
- [11] IEC, «IEC,» 28 April 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://iec.org/index.html>.
- [12] Τ. Δημητρίου, Βέλτιστες πρακτικές και διαδικασίες μετάβασης σε IPv6 MPLS για παρόχους υπηρεσιών διαδικτύου., Πάτρα, 2014.
- [13] G. O. Mosongo, SIMULATION OF MULTI-PROTOCOL LABEL SWITCHING, NAIROBI, 2009.

- [14] KeerthiPramukh Jannu και Radhakrishna Deekonda, OPNET simulation of voice over MPLS : With Considering Traffic Engineering, Ronneby, 2010.
- [15] A. NEMTUR, FAILURE RECOVERY TECHNIQUES OVER AN MPLS NETWORK USING OPNET, Indianapolis, 2014.
- [16] Λ. Ν. ΠΟΥΛΟΠΟΥΛΟΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΣΕ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΑ L2 ΚΑΙ MPLS ΔΙΚΤΥΑ, Πάτρα, 2010.
- [17] J. M. Sultan, Hybrid Wireless Broadband Networks, Lancaster, 2016.
- [18] M. C. Wood, «An Analysis of the Design and Implementation of QoS over IEEE 802.16,» 2006.
- [19] W. Forum, «WiMAX Mobile 4G,» IEEE 802.16, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.wimaxforum.org/Page/Initiatives/wimax-advanced>. [Πρόσβαση 20 April 2016].
- [20] M. Ali, Etude de la technologie WIMAX 802.16x MIMO-OFDM, Biskra, 2013.
- [21] Π. Χ. τ. ΣΤΕΛΙΟΥ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ WiMAX - 802.16, Πάτρα: ΠΑΠΑΣΤΥΛΙΑΝΟΥ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ του ΣΤΕΛΙΟΥ, 2013.
- [22] Δ. Χριστίνα, Κ. Κεμαλής και Α. Μακροβασίλης, Ασφάλεια στο πρότυπο IEEE 802.16 (WiMAX), Καρλόβασι, 2006.
- [23] W. Forum, «WiGRID,» IEEE Std 802.16.1-2012, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.wimaxforum.org/Page/Initiatives/WiGRID>. [Πρόσβαση 20 April 2016].
- [24] Β. Η. ΑΝΔΡΟΝΙΚΟΥ, Μελέτη και Προσομοίωση Του Mobile IP με Fast Handovers για την Υποστήριξη Κινητών Τερματικών σε Εξελιγμένα Δίκτυα 3ης Γενιάς, Αθήνα, 2004.
- [25] 3gpp, «3gpp.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/103-umts>. [Πρόσβαση 26 May 2016].
- [26] Π. ΙΑΣΟΝΑ-ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ, Μελέτη Δικτύων Επόμενης Γενιάς και Μοντελοποίηση τους στο Περιβάλλον του OPNET, Πάτρα, 2011.
- [27] Π. Κωττής και Χ. Καψάλης, Ασύρματες Ζεύξεις και Διάδοση, Αθήνα, 2010.

- [28] «radio electronics,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/umts/umts-wcdma-network-architecture.php>. [Πρόσβαση 10 May 2016].
- [29] G. He, Overview of UMTS, Helsinki, 2003.
- [30] Riverbed, «Riverbed Modeler,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>. [Πρόσβαση 9 June 2016].
- [31] Κ. Κανονάκης, ΔΙΚΤΥΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QoS), Athens, 2004.
- [32] Z. Lu και H. Yang, Unlocking the Power of OPNET Modeler, Cambridge, 2012.
- [33] I. S. team, «IEEEExplore,» 2000. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7179>. [Πρόσβαση 14 June 2016].
- [34] I. S. team, «IEEEExplore,» 18 August 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5553438>. [Πρόσβαση 14 June 2016].
- [35] Matlab, «Mex interface,» Mathworks, [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab\\_external/introducing-mex-files.html](http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_external/introducing-mex-files.html). [Πρόσβαση 15 June 2016].
- [36] M. A. Abdala και A. K. Al-Zuhairy, «Integration of Smart Antenna System in Mobile Ad Hoc Networks,» *International Journal of Machine Learning and Computing*, τόμ. III, αρ. 4, 2013.
- [37] IETF, «IETF 3031,» 2001. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc3031>. [Πρόσβαση 9 June 2016].
- [38] IEEE, «IEEE WiMAX Standards,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html>. [Πρόσβαση 9 June 2016].
- [39] Mathworks, «Matlab,» Mathworks, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. [Πρόσβαση 9 June 2016].