



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Χρονοπρογραμματισμός TDMA σε δενδρικές αρχιτεκτονικές ευφύων δικτύων πολλαπλών υπηρεσιών βασισμένων στο πρότυπο IEEE 1901

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βάιος Γ. Κυρίτσης

Επιβλέπων : Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Χρονοπρογραμματισμός TDMA σε δενδρικές αρχιτεκτονικές ευφυών δικτύων πολλαπλών υπηρεσιών βασισμένων στο πρότυπο IEEE 1901

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βάιος Γ. Κυρίτσης

**Επιβλέπων :** Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22<sup>α</sup> Ιουλίου 2013.

.....

Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Χρήστος Καψάλης

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Γεώργιος Φικιώρης

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....  
Βάιος Γ. Κυρίτσης

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

Copyright © Βάιος Γ. Κυρίτσης, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

# Περίληψη

---

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός βέλτιστου αλγορίθμου προγραμματισμού TDMA (Time Division Multiple Access) για επικοινωνία μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (PLC –Power Line Communications) που εφαρμόζεται στη λειτουργία ευφυών δικτύων (Smart Grids) που υποστηρίζουν πολλαπλές υπηρεσίες (multi service). Η τεχνολογία PLC επιτρέπει την ευρυζωνική μετάδοση πληροφορίας πάνω από γραμμές μεταφοράς σε υπάρχοντα ηλεκτρικά δίκτυα. Από τη χρήση της τεχνολογίας αυτής προκύπτει η έννοια του ευφυούς δικτύου το οποίο προσφέρει τόσο τηλεπικοινωνιακές δυνατότητες, όσο και δυνατότητες αποτελεσματικής διαχείρισης και ελέγχου στις επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε παραδοσιακές όσο και σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας.

Στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης μετάδοσης των δεδομένων που παράγονται από τις συσκευές που λειτουργούν στο ευφύες δίκτυο και τις άμβλυνσης της δυσμενούς επίδρασης των ετερογενών συσκευών και υπηρεσιών που υποστηρίζει το δίκτυο, υλοποιήθηκε ένα ισχυρό σύστημα προγραμματισμού TDMA ικανό να παρέχει αποδοτική επικοινωνία με βάση την καθυστέρηση και να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ποιότητας από άκρο σε άκρο όλου του δικτύου. Μέσω διεξοδικής μελέτης των αλγορίθμων και της πολυπλοκότητας διαφορετικών τεχνικών βελτιστοποίησης του δικτύου η προσέγγιση που επιλέχθηκε συνδυάζει αποδοτικά τόσο την εισαγωγή υπηρεσιών πολλαπλών απαιτήσεων όσο και τις απαιτήσεις ποιότητας και καθυστέρησης των εφαρμογών στο ευφύες δίκτυο. Από τις προσομοιώσεις πλήρους και μη συναθροισμένης κίνησης δεδομένων, σε τοπολογίες διαφόρων χαρακτηριστικών (με βάση τις διαφορετικές απαιτήσεις των εφαρμογών σε αγροτικά και αστικά δίκτυα), παρατηρήθηκε πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιώνει σημαντικά τόσο το ρυθμό διέλευσης των δεδομένων όσο και την κατανάλωση ισχύος του δικτύου για τις περιπτώσεις πλήρους συνάθροισης δεδομένων, το οποίο οδηγεί σε σημαντική μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης και εξοικονόμηση ενέργειας.

## Λέξεις κλειδιά

Έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, Επικοινωνία μέσω γραμμών μεταφοράς, Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου, Πολλαπλές υπηρεσίες, Συνάθροιση, Χρονοπρογραμματισμός



# Abstract

---

The objective of this diploma thesis was the design and implementation of an optimal TDMA (Time Division Multiple Access) schedule of networking BPL (Broadband over Power Lines) units, operating in the framework of a multi service Smart Grid. BPL technology is a method of power line communication that allows relatively high speed digital data transmission over the public electric power distribution wiring. The use of BPL technology results the concept of Smart Grid, that offers both telecommunication services and opportunities of effective management and control to the utilities which can be applied both in traditional and alternative energy sources.

Targeting at the minimization of the delivery delay of the data generated by the Smart Grid actors and the mitigation of the detrimental effect of actors and services heterogeneity, a robust scheduling scheme was formulated, able to provide delay efficient communications satisfying end to end QoS (Quality of Service) requirements. A thorough comparative research study was performed and the appropriate approach to the addressed problem combines both efficient introduction of multi service applications in the Smart Grid and different demands in terms of delay and QoS. The simulation results of full and no aggregated traffic in topologies with different characteristics (based on the different requirements of applications in rural and urban Smart Grids), showed that the proposed TDMA scheduling algorithm using full aggregated traffic significantly improves both data throughput and power consumption, which leads to significant reduction of transmission delay and energy saving.

## Key Words

Smart Grid, BPL, Broadband over Power Lines, TDMA, Multi service, Full Aggregation, Scheduling





# Ευχαριστήριο Σημείωμα

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή ΕΜΠ και επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου κ. Παναγιώτη Κωττή, ο οποίος με εμπιστεύθηκε με την ανάθεση αυτής της εργασίας, για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνησή της και τις συμβουλές που αφορούσαν τη συνέχεια των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως το Διδάκτορα ΕΜΠ Αρτέμη Βουλκίδη, για τη σημαντική βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εργασίας καθώς και για τη γενικότερη συνεργασία μας η οποία ήταν καταλυτική για την ολοκλήρωσή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράστασή τους καθ' όλη την πορεία των σπουδών μου και τη στήριξή τους για την επίτευξη των στόχων μου.



# Περιεχόμενα

---

Ευρετήριο σχημάτων.....	13
1 ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ (SMART GRIDS) .....	15
1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Τεχνολογία PLC (Power Line Communications).....	16
1.3 Προκλήσεις για τον σχεδιασμό του ευφυούς δικτύου με χρήση τεχνολογίας BB-PLC	18
1.4 Κατηγορίες τεχνολογιών PLC.....	19
1.5 Ο ρόλος του PLC στο ευφυές δίκτυο – Εφαρμογές και Οφέλη .....	21
1.5.1 Χρήση στα δίκτυα υψηλής τάσης (ΥΤ) .....	21
1.5.2 Χρήση στα δίκτυα μέσης τάσης (ΜΤ).....	22
1.5.3 Χρήση στα δίκτυα χαμηλής τάσης (ΧΤ) .....	23
2 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 1901 .....	25
2.1 Τοπολογία συστήματος πρόσβασης IEEE 1901.....	25
2.2 Επικοινωνία από άκρο σε άκρο (end to end).....	26
2.3 Εξοικονόμηση ενέργειας.....	27
2.4 Κατανομή εύρους ζώνης (Bandwidth Allocation) .....	28
2.4.1 Συγκεντρωτικό TDMA.....	30
2.4.2 Δυναμικό TDMA με δειγματοληψία (polling).....	31
2.4.3 Κατανεμημένη μέθοδος TDMA .....	31
3 ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QoS) .....	33
3.1 Πολλαπλές υπηρεσίες σε PLC εφαρμογές (multi service) .....	33
3.2 Απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας σε ευφυή δίκτυα .....	34
3.3 Έλεγχος και ποιότητα υπηρεσίας από άκρο σε άκρο .....	35
3.3.1 Απαιτήσεις της αρχιτεκτονικής ελέγχου QoS .....	37
3.3.2 Λειτουργίες των κόμβων (agents) της αρχιτεκτονικής QoS .....	38
4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ TDMA ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ .....	41
4.1 Ανάλυση των απαιτήσεων .....	41
4.1.1 Σχηματισμός τοπολογιών σε ένα ευφυές δίκτυο .....	43
4.1.2 Ανάλυση συστήματος ελέγχου ισχύος.....	45
4.2 Περιγραφή αλγορίθμου TDMA .....	46
4.2.1 Εύρεση γειτονικών κόμβων - αρχές σχεδιασμού του TDMA schedule.....	46

4.2.2	Λειτουργία μη συναθροισμένων δεδομένων (Non aggregated traffic) .....	50
4.2.2.1	Εκχώρηση χρονοσχισμών .....	50
4.2.3	Λειτουργία πλήρως συναθροισμένων δεδομένων (Full aggregated traffic) ..	52
4.2.3.1	Εκχώρηση χρονοσχισμών .....	53
4.2.4	Λειτουργία σταθερής κατάστασης .....	54
5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MULTI SERVICE TDMA SCHEDULE ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	57
5.1	Χαρακτηριστικά προσομοίωσης.....	57
5.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	59
5.2.1	Κατανομή υπηρεσιών με βάση το είδος του κόμβου (leaf-hub).....	59
5.2.1.1	Μη συναθροισμένη ροή δεδομένων (Non aggregated traffic) .....	60
5.2.1.2	Συναθροισμένη ροή δεδομένων (Full aggregated traffic).....	63
5.2.1.3	Ποσοστιαία σύγκριση των δύο μεθόδων(Full Aggregation – No Aggregation).....	65
5.2.2	Τυχαία κατανομή των υπηρεσιών στο δένδρο με διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης .....	68
5.2.2.1	Μη συναθροισμένη ροή δεδομένων (Non aggregated traffic) .....	69
5.2.2.2	Συναθροισμένη ροή δεδομένων (Full aggregated traffic).....	72
5.2.2.3	Ποσοστιαία σύγκριση των δύο μεθόδων (Full Aggregation – No aggregation) .....	74
5.3	Αξιολόγηση μετρήσεων .....	77
6	Βιβλιογραφία .....	79

# Ευρετήριο Σχημάτων

---

Σχήμα 1.1 : Τυπικό Smart Grid δίκτυο.....	15
Σχήμα 1.2 : Τυπικό σύστημα PLC .....	17
Σχήμα 2.1 : Στοιχεία κυψέλης πρόσβασης 1901 .....	26
Σχήμα 2.2 : Πρωτόκολλο CSMA/CA.....	28
Σχήμα 2.3 : Πρωτόκολλο TDMA.....	29
Σχήμα 3.1: Παράδειγμα κάθετης και οριζόντιας χαρτογράφησης.....	36
Σχήμα 3.2: Ιεραρχία Κόμβων .....	39
Σχήμα 4.1 : Αραιό δένδρο.....	44
Σχήμα 4.2: Πυκνό δένδρο.....	45
Σχήμα 4.3 : Παράδειγμα μορφής δένδρου .....	47
Σχήμα 4.4 : Προτεινόμενη αρχή σχεδίασης TDMA.....	48
Σχήμα 4.5 : TDMA Schedule για λειτουργία μη συνάθροισης .....	55
Σχήμα 4.6 : TDMA Schedule για λειτουργία πλήρους συνάθροισης .....	55
Σχήμα 5.1 : Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης συνολικού πλήθους χρονοσχισμών (slots)- απαίτησης της υπηρεσίας σε χρονοσχισμές σε αγροτικό και αστικό δίκτυο .....	60
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης ρυθμού διέλευσης (throughput – packets/slot)-απαίτησης της υπηρεσίας σε χρονοσχισμές σε αγροτικό και αστικό δίκτυο ...	61
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης συνολικού πλήθους χρονοσχισμών (slots)- απαίτησης της υπηρεσίας σε χρονοσχισμές σε αγροτικό και αστικό δίκτυο .....	63
Σχήμα 5.4 : Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης ρυθμού διέλευσης (throughput – packets/slot)-απαίτησης της υπηρεσίας σε χρονοσχισμές σε αγροτικό και αστικό δίκτυο ...	64
Σχήμα 5.5 : Ποσοστιαία μεταβολή των απαιτούμενων χρονοσχισμών με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης.....	66
Σχήμα 5.6 : Ποσοστιαία μεταβολή του ρυθμού διέλευσης με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης.....	66
Σχήμα 5.7 : Ποσοστιαία μεταβολή της απαιτούμενης ισχύος λειτουργίας με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης .....	67
Σχήμα 5.8 : Διάγραμμα περιγραφής του συνολικού πλήθους χρονοσχισμών (slots)- ποσοστού διείσδυσης της δεύτερης υπηρεσίας σε σχέση με την πρώτη σε αγροτικό και αστικό δίκτυο.....	69
Σχήμα 5.9 : Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης ρυθμού διέλευσης (throughput – packets/slot)- ποσοστού διείσδυσης της δεύτερης υπηρεσίας σε σχέση με την πρώτη σε αγροτικό και αστικό δίκτυο.....	70
Σχήμα 5.10 : Διάγραμμα περιγραφής του συνολικού πλήθους χρονοσχισμών (slots)- ποσοστού διείσδυσης της δεύτερης υπηρεσίας σε σχέση με την πρώτη σε αγροτικό και αστικό δίκτυο.....	72
Σχήμα 5.11 : Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης ρυθμού διέλευσης (throughput – packets/slot)- ποσοστού διείσδυσης της δεύτερης υπηρεσίας σε σχέση με την πρώτη σε αγροτικό και αστικό δίκτυο.....	73
Σχήμα 5.12: Ποσοστιαία μεταβολή των απαιτούμενων χρονοσχισμών με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης .....	74

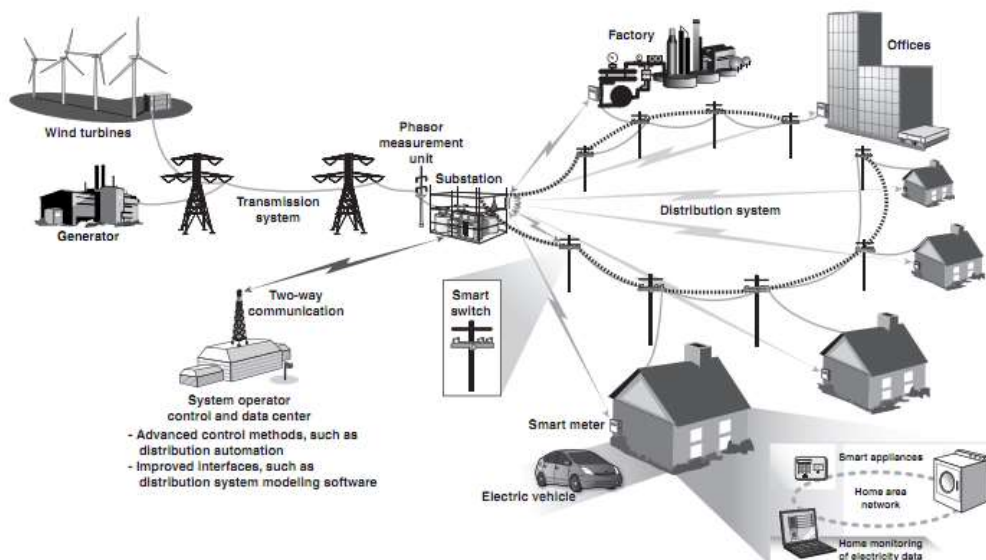
Σχήμα 5.13 : Ποσοστιαία μεταβολή του ρυθμού διέλευσης με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης.....	75
Σχήμα 5.14 : Ποσοστιαία μεταβολή της απαιτούμενης ισχύος λειτουργίας με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης .....	75

# 1 ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ (SMART GRIDS)

## 1.1 Εισαγωγή

Η ιδέα του ευφυούς δικτύου (SG – Smart Grid), αφορά ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο μπορεί να ενσωματώσει ευφυώς τις δράσεις όλων των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι με αυτό, παραγωγούς ή καταναλωτές, προκειμένου να παρέχει αποτελεσματικά βιώσιμο, οικονομικό και ασφαλή εφοδιασμό ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα έξυπνο δίκτυο, χρησιμοποιεί καινοτόμα προϊόντα και υπηρεσίες, σε συνδυασμό με ευφυή παρακολούθηση, έλεγχο, επικοινωνίες και τεχνολογίες αυτοϊασης για τους εξής σκοπούς :

- Διευκόλυνση της σύνδεσης και λειτουργίας των γεννητριών κάθε μεγέθους και τεχνολογίας
- Δυνατότητα των καταναλωτών να διαδραματίσουν ένα ρόλο στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος
- Παροχή στους καταναλωτές περισσότερων πληροφοριών και καλύτερων επιλογών για την επιλογή του προμηθευτή ενέργειας τους
- Σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του όλου συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας
- Διατήρηση και βελτίωση των υφισταμένων επιπέδων της αξιοπιστίας του συστήματος, καθώς και της ποιότητας και ασφάλειας της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας
- Αποτελεσματική διατήρηση και βελτίωση των υφισταμένων υπηρεσιών
- Ενθάρρυνση της ανάπτυξης μιας ενοποιημένης αγοράς



Σχήμα 1.1 : Τυπικό Smart Grid δίκτυο

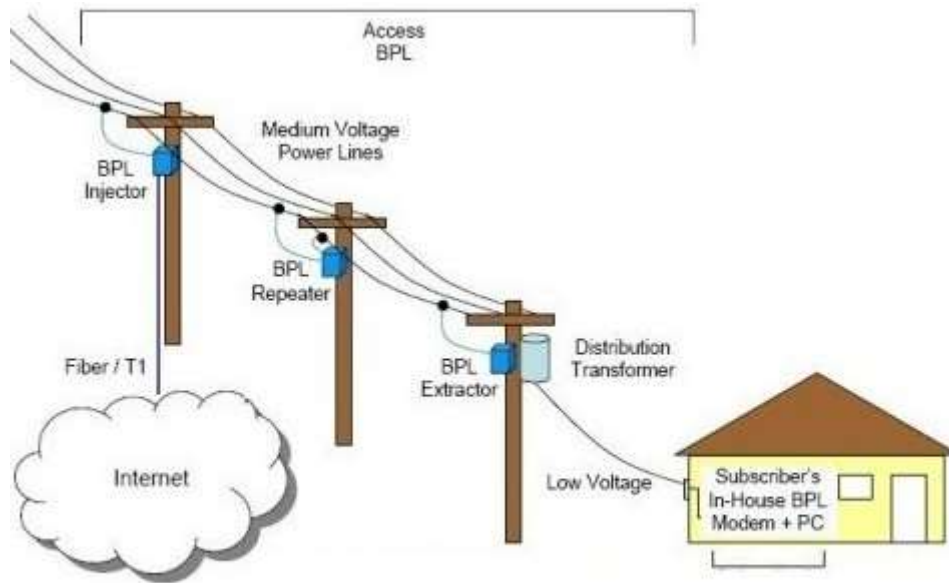
Το σημερινό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από κεντρικούς σταθμούς παραγωγής και ηλεκτρομηχανικά συστήματα διανομής που λειτουργούν από κέντρα ελέγχου. Το δίκτυο αυτό όμως μετατρέπεται σε ένα έξυπνο δίκτυο που ενσωματώνει ένα πλήθος κατανεμημένων ενεργειακών πόρων, χρησιμοποιεί σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα (τρανζίστορ, μικροεπεξεργαστές) και συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Ο κλάδος της ενέργειας, μέσω του χαμηλού κόστους της υπολογιστικής ισχύος και της έκχυσης ψηφιακής ευφυΐας σε κάθε στοιχείο του δικτύου, θα μετασηματιστεί από την παραγωγή μέχρι τη διανομή ενέργειας στον τελικό καταναλωτή. Η έκχυση πληροφορίας είναι ζωτικής σημασίας για τη μετατροπή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από ένα άκαμπτο και ιεραρχικό σύστημα, σε ένα συνεργατικό και κατανεμημένο, με γνώμονα ένα οικοσύστημα συσκευών που θα βελτιώσει τη χρήση των υποδομών και ταυτόχρονα θα αυξήσει την αξιοπιστία και την ασφάλειά του.

Η υλοποίηση της ιδέας του ευφυούς δικτύου, έχει ως βασικό χαρακτηριστικό την ενσωμάτωση στο δίκτυο μια τεχνολογίας τηλεπικοινωνιών. Μια εύρωστη και πολλά υποσχόμενη πλατφόρμα επικοινωνιών, πάνω στην οποία μπορούν να αναπτυχθούν νέες υπηρεσίες, είναι η Επικοινωνία πάνω από Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (PLC – Power Line Communications ή BPL – Broadband over Power Line).

## 1.2 Τεχνολογία PLC (Power Line Communications)

Η επικοινωνία μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, είναι μια ιδέα η οποία χρονολογείται στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Έκτοτε, επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο, έχουν χρησιμοποιήσει την τεχνολογία αυτή για απομακρυσμένες μετρήσεις και έλεγχο φορτίου, βασιζόμενες αρχικά σε υλοποιήσεις μονού φέροντος και στενής ζώνης. Οι λύσεις αυτές χρησιμοποιούσαν χαμηλές ζώνες συχνοτήτων με ταχύτητες που δεν ξεπερνούσαν τα μερικές kilobits ανά δευτερόλεπτο, όμως με την ωρίμανση της τεχνολογίας εμφανίστηκαν συστήματα PLC ευρείας ζώνης με υψηλές συχνότητες της τάξης των 2-30 MHz, επιτυγχάνοντας ταχύτητες μέχρι 200 Mb/s. Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον της βιομηχανίας έχει στραφεί σε συστήματα PLC στενής ζώνης, με πολλαπλά φέροντα και συχνότητες από 3 έως 500 kHz. Τα βασικά στοιχεία για την υλοποίηση της τεχνολογίας πρόσβασης PLC είναι οι εισαγωγείς (injectors), οι αναμεταδότες (repeaters) και οι εξαγωγείς (extractors) της πληροφορίας. Η πληροφορία κατευθύνεται μέσω των γραμμών μεταφοράς και μπορεί να γίνει αποδεκτή από τους οικιακούς καταναλωτές που διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης (modem), είτε να αποσταλεί σε σημεία που οι συσκευές PLC επικοινωνούν μέσω οπτικών ινών με το διαδίκτυο.





Σχήμα 1.2 : Τυπικό σύστημα PLC

Η τεχνολογία PLC γνωρίζει μια σημαντική βελτίωση τα τελευταία χρόνια, ως μια εναλλακτική, οικονομικά αποδοτική τεχνολογία πρόσβασης του τελευταίου μιλίου (last mile networks). Καθώς έχουν ως βάση τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν πολύ εύκολα να αναπτυχθούν σε αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές, στις οποίες δεν υπάρχουν άλλες ενσύρματες συνδέσεις, για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών διαδικτύου σε οικιακούς καταναλωτές, συνδεσιμότητα τοπικού δικτύου (LAN) σε οικιακούς και εταιρικούς καταναλωτές και δυνατότητες διαχείρισης και ελέγχου αυτοματισμών και απομακρυσμένων μετρήσεων. Εκτός από τις δυνατότητες που δίνει η τεχνολογία PLC για ποιοτικές ευρυζωνικές υπηρεσίες, σημαντικός είναι και ο έλεγχος της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά σε περιπτώσεις επείγουσας ανάγκης.

Το βασικό κίνητρο της χρήσης τεχνολογιών PLC είναι η μορφή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο είναι κατά βάση πιο εκτεταμένο και με μεγαλύτερη διείσδυση από οποιαδήποτε άλλη ασύρματη ή ενσύρματη εναλλακτική. Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά οποιαδήποτε συσκευή που τροφοδοτείται από το δίκτυο μπορεί να γίνει αποδέκτης υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας.

Παρά τα πλεονεκτήματά του και την πληθώρα υπηρεσιών που μπορεί να υποστηρίξει, η τεχνολογία PLC δεν έχει καταφέρει ακόμα να διεισδύσει με μαζικότητα στην αγορά. Ωστόσο, υπάρχει σήμερα επιτακτική ανάγκη για να επιτύχει τη μαζικότητα αυτή και αυτή είναι ο εκσυγχρονισμός του παλαιού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της έκχυσης πληροφοριών αφιερωμένων στη διαχείριση της μετάδοσης και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το αναβαθμισμένο δίκτυο που

θα προκύψει (Smart Grid), θα μπορεί να υποστηρίξει ετερογενείς δικτυακές τεχνολογίες για διαφορετικά σενάρια που απαιτούνται κατά τη λειτουργία του.

### 1.3 Προκλήσεις για τον σχεδιασμό του ευφυούς δικτύου με χρήση τεχνολογίας BB-PLC

Είναι ευρέως αποδεκτό πως η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης έχει ξεπεράσει τον ρυθμό της αύξησης της παραγωγής ενέργειας με συμβατικά μέσα. Επίσης, πολλά κράτη συμφωνούν ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου πρέπει να περιοριστούν για τον έλεγχο και την πρόληψη της κλιματικής αλλαγής. Η ανάγκη για εκμοντερνισμό της υποδομής του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι αποτέλεσμα τόσο των περιορισμένων επενδύσεων σε αυτό των τελευταίων δεκαετιών, όσο και των νέων απαιτήσεων για ασφαλή ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα μετάδοσης, της αποκεντρωμένης αποθήκευσης ενέργειας για αντιστάθμιση των μεταβλητών φυσικών συνθηκών στη λειτουργία ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πάρκων και των προγραμμάτων ελέγχου ζήτησης από την πλευρά των καταναλωτών.

Η ισορροπία ανάμεσα στην παραγωγή και τη ζήτηση ενέργειας είναι μια διαδικασία η οποία απαιτεί επιπλέον τεχνολογίες προστασίας και ελέγχου για τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου. Σήμερα τα δίκτυα είναι σχεδιασμένα ώστε να διαχειρίζονται μέσω μιας κεντρικής φυσικής υποδομής. Με τη βοήθεια των τηλεπικοινωνιών, οι οποίες είναι ένα θεμελιώδες στοιχείο του ευφυούς δικτύου, η υπάρχουσα υποδομή μπορεί να βελτιωθεί με παρακολούθηση ευρύτερων περιοχών, επικοινωνία δύο κατευθύνσεων και ενισχυμένες λειτουργίες ελέγχου που θα καλύψουν τις υπάρχουσες ελλείψεις.

Ο τρόπος υλοποίησης του ευφυούς δικτύου κινείται πάνω σε δύο διαφορετικές απόψεις. Η πρώτη υποστηρίζει το γεγονός ότι η τεχνολογία PLC είναι ένας βασικός υποψήφιος για αυτήν την υλοποίηση, ενώ η δεύτερη εκφράζει αμφιβολίες και θεωρεί πως η ασύρματη τεχνολογία πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως μια καθιερωμένη εναλλακτική. Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία πως το ευφύες δίκτυο θα εκμεταλλευτεί ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών, από τις οπτικές ίνες έως τις ασύρματες επικοινωνίες. Η βασική αντίθεση όμως στη χρήση PLC έγκειται στο γεγονός πως είναι μια τεχνολογία χωρίς ξεκάθαρη προτυποποίηση, με μικρές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, ακριβούς κωδικοποιητές και αποκωδικοποιητές (modems) και προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, προβλήματα όμως που λύνονται με τις εξελίξεις στην τεχνολογία PLC και την προτυποποίησή τους από διαφορετικούς οργανισμούς (Standards Developing Organizations).

Ένας επιπλέον λόγος υποστήριξης του PLC έναντι άλλων επικοινωνιών, είναι το γεγονός ότι το PLC είναι η μόνη ενσύρματη τεχνολογία με κόστος ανάπτυξης εφάμιλλο με τις ασύρματες, λόγω της υπάρχουσας εγκατεστημένης δομής του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι πρώτες εφαρμογές PLC που εγκαταστάθηκαν από επιχειρήσεις ηλεκτρισμού έκαναν χρήση επικοινωνιών φωνής και δεδομένων πάνω από γραμμές υψηλής τάσης (άνω των 100 kV) σε πολύ μεγάλες γεωγραφικές αποστάσεις. Οι γραμμές υψηλής τάσης χρησιμοποιούνταν ως μέσο επικοινωνιών φωνής από τη δεκαετία του 1920, όταν η τηλεφωνική κάλυψη ήταν περιορισμένη και χρειαζόταν μια εναλλακτική μορφή επικοινωνίας μεταξύ των μηχανικών για διαχειριστικές αποφάσεις στους σταθμούς παραγωγής και μεταφοράς σε αποστάσεις δεκάδων ή και εκατοντάδων χιλιομέτρων. Με την εισαγωγή αργότερα τεχνικών ψηφιακών επικοινωνιών μπορούσαν να επιτευχθούν μόνο χαμηλοί ρυθμοί δεδομένων για λόγους τηλεμετρίας. Μια ακόμα βασική εφαρμογή που οδήγησε το ενδιαφέρον των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού στις τεχνολογίες PLC ήταν ο έλεγχος φορτίου. Από το 1930 γινόταν χρήση σηματοδοσίας (Ripple Carrier Signaling) για έλεγχο της ζήτησης σε ώρες υψηλής αιχμής με την απενεργοποίηση συσκευών μεγάλης κατανάλωσης. Στη συνέχεια, και ειδικά στην Ευρώπη, χρησιμοποιήθηκε για την αλλαγή μεταξύ της χρέωσης ημερήσιου και νυχτερινού ρεύματος, καθώς και για τον έλεγχο του φωτισμού των οδών και του εξοπλισμού του δικτύου.

## 1.4 Κατηγορίες τεχνολογιών PLC

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες στην τεχνολογία PLC :

- 1) Εξαιρετικά στενής ζώνης (Ultra Narrow Band – UNB) :

Είναι τεχνολογία που λειτουργεί σε πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (100 bps) και πολύ χαμηλές συχνότητες (0.3 – 3 kHz).

- 2) Στενής ζώνης (Narrowband –NB) :

Είναι τεχνολογία που λειτουργεί στις πολύ χαμηλές, χαμηλές και μεσαίες ζώνες συχνοτήτων (VLF/LF/MF, 3-500 kHz) οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με την περιοχή. Περιλαμβάνονται ζώνες όπως η Ευρωπαϊκή CENELEC (Comité Européen de Normalisation Électrotechnique, 3 – 148.5 kHz), η Αμερικανική FCC (Federal Communications Commission, 10-490 kHz), η Ιαπωνική ARIB ( Association of Radio Industries and Businesses, 10-450 kHz) και η Κινεζική (3-500 kHz). Συγκεκριμένα μπορούν να επιτευχθούν ταχύτητες χαμηλού ρυθμού μεταφοράς (Low Data Rate), μέσω τεχνολογιών μονού φέροντος μέχρι μερικά kilobits ανά δευτερόλεπτο και

υψηλού ρυθμού μεταφοράς (High Data Rate) με τεχνολογίες πολλαπλού φέροντος που υποστηρίζουν ταχύτητες μέχρι 500 kilobits ανά δευτερόλεπτο. Οι διαφορετικές επιτροπές έχουν εκχωρήσει τις ζώνες συχνοτήτων σε διαφορετικές υπηρεσίες.

Στην Ευρώπη συγκεκριμένα ορίζονται τέσσερις ζώνες συχνοτήτων:

- 3-95 kHz : Δεσμευμένη για επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας
- 95-125 kHz : Οποιαδήποτε εφαρμογή
- 125-140 kHz : Οικιακά συστήματα δικτύωσης με υποχρεωτική χρήση του πρωτοκόλλου CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
- 140-148.5 kHz: Συστήματα συναγερμού και ασφάλειας

Σε άλλες χώρες οι κανονισμοί είναι διαφορετικοί, όπως για παράδειγμα στις Η.Π.Α. και στην Ιαπωνία όπου δεν υπάρχει καμία εκχώρηση συχνοτήτων σε συγκεκριμένες υπηρεσίες και κάθε εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε συχνότητα από 3-500 kHz.

### 3) Ευρείας ζώνης (Broadband – BB) :

Είναι τεχνολογία που λειτουργεί στις υψηλές και υπερ-υψηλές συχνότητες (HF/VHF, 1.8-250 MHz) με ταχύτητες στο φυσικό στρώμα που φτάνουν τα εκατοντάδες megabit το δευτερόλεπτο. Με τη σταδιακή επιτυχία του NB-PLC, εμφανίστηκαν ευρυζωνικές εφαρμογές, αρχικά για πρόσβαση στο διαδίκτυο και στη συνέχεια για οικιακά δίκτυα (Home Area Networks) και εφαρμογές ήχου και εικόνας. Το πρώτο ενδιαφέρον στη χρήση BB-PLC για πρόσβαση στο διαδίκτυο εκδηλώθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1997 όπου οι εταιρίες Nortel και Norweb Communications ανέπτυξαν την τεχνολογία για παροχή υπηρεσιών πρόσβασης σε οικιακούς καταναλωτές, κίνηση που τερματίστηκε δύο χρόνια αργότερα λόγω υψηλότερου κόστους από το αναμενόμενο και προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Η αποτυχία χρήσης τεχνολογιών PLC για πρόσβαση στο διαδίκτυο, οδήγησε σε ανάπτυξη εφαρμογών οικιακής δικτύωσης, με τεχνολογίες οι οποίες θα μπορούσαν να είναι συμπληρωματικές του WiFi, αλλά με πολύ μικρό μερίδιο αγοράς.

Οι ανωτέρω τεχνολογίες, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η επιλογή όμως του τύπου της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε σενάριο, δεν εξαρτάται μόνο από τεχνικούς περιορισμούς, αλλά και από ρυθμιστικές και επιχειρηματικές πτυχές. Στην πραγματικότητα, οι ρυθμιστικοί περιορισμοί για τα επιτρεπτά επίπεδα εκπομπών και τις διαθέσιμες συχνότητες οδηγούν σε διαφορετικά συμπεράσματα για την προτιμητέα τεχνολογία BPL. Για παράδειγμα η Αμερικανική αρχή FCC επιτρέπει τη χρήση τόσο στενής όσο και ευρείας ζώνης τεχνολογίας PLC σε υπαίθριες εφαρμογές σε αντίθεση με την Ε.Ε. όπου η χρήση της δεν καθίσταται ιδανική, λόγω αυστηρότερων κανονισμών στη

μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής, το οποίο σημαίνει χαμηλότερη ισχύ εκπομπής, αυξημένη χρήση αναμεταδοτών και άρα αυξημένο κόστος. Ένα διαφορετικό παράδειγμα περιορισμού της χρήσης συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι στην Ιαπωνία όπου επιτρέπεται μόνο η χρήση στενής ή εξαιρετικά στενής ζώνης PLC για εφαρμογές ευφυούς δικτύου.

## **1.5 Ο ρόλος του PLC στο ευφυές δίκτυο – Εφαρμογές και Οφέλη**

Ο ρόλος των επικοινωνιών μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι όπως αναφέρθηκε πολύ σημαντικός στην υλοποίηση του ευφυούς δικτύου προσφέροντας υπηρεσίες σε όλα τα επίπεδα τάσεων, από την υψηλή τάση, έως και τις οικιακές γραμμές.

### **1.5.1 Χρήση στα δίκτυα υψηλής τάσης (ΥΤ)**

Για το μετασχηματισμό του υπάρχοντος δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας σε ευφυές δίκτυο, οι μεγαλύτερες αλλαγές θα πραγματοποιηθούν στην πλευρά διανομής. Αλλαγές όμως πρέπει να λάβουν χώρα και στην πλευρά μεταφοράς για την υποστήριξη εφαρμογών εκτίμησης καταστάσεων του δικτύου, μεταβίβασης ενέργειας για προστασία του δικτύου και απομακρυσμένη παρακολούθηση σταθμών. Οι γραμμές υψηλής τάσης είναι καλοί κυματοδηγοί, λόγω της ζωνοπερατής και χρονικά αμετάβλητης συμπεριφοράς τους. Σε σύγκριση με τις γραμμές χαμηλής και μέσης τάσης χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη εξασθένιση. Εναλλακτικά στην πλευρά μετάδοσης χρησιμοποιούνται ως μέσα επικοινωνίας οπτικές ίνες ή μικροκυματικοί σύνδεσμοι με μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

Ένα επιπλέον όφελος εκτός της επικοινωνίας στην πλευρά μετάδοσης είναι και η απομακρυσμένη ανίχνευση βλαβών στις γραμμές, με πειράματα που έχουν διεξαχθεί επιτυχώς για την εύρεση κατεστραμμένων μονωτών, βραχυκυκλωμάτων και ανοικτοκυκλωμάτων καθώς και κομμένων καλωδίων.

### 1.5.2 Χρήση στα δίκτυα μέσης τάσης (MT)

Μια σημαντική απαίτηση για τη δημιουργία του ευφυούς δικτύου είναι επίσης η δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων που αφορούν την κατάσταση του δικτύου μέσης τάσης. Είναι αναγκαία η μεταφορά πληροφοριών των υποσταθμών του δικτύου, αναφορικά με την κατάσταση του εξοπλισμού και της συνθήκης ροής της ενέργειας μεταξύ τους. Παραδοσιακά, οι υποσταθμοί μέσης τάσης δεν είναι εξοπλισμένοι με δυνατότητες επικοινωνίας, άρα η δυνατότητα χρήσης της υπάρχουσας υποδομής είναι μια ελκυστική εναλλακτική λύση ενάντια στην εγκατάσταση νέων επικοινωνιακών συνδέσμων. Ένα από τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν από τη χρήση τεχνολογιών PLC στη μέση τάση, είναι η δυνατότητα χρήσης λειτουργιών αυτοματισμού στους υποσταθμούς. Κάποιες υπηρεσίες αυτοματισμού χρειάζονται ευφυείς ηλεκτρονικές συσκευές (IED - Intelligent Electronic Devices) εγκατεστημένες στους υποσταθμούς για την επικοινωνία μεταξύ τους. Σε περιπτώσεις βλάβης, οι IED ενός υποσταθμού επικοινωνούν με εξωτερικές IED όπως διακόπτες αυτόματης επαναφοράς ή απομόνωσης. Ένα μεγάλο μέρος του εξοπλισμού μέσης τάσης στον κόσμο έχει εγκατασταθεί ήδη πάνω από 40 χρόνια. Ο έλεγχος και ο εντοπισμός για βλάβες είναι μια διαδικασία μεγάλης σημασίας για τη διασφάλιση της διάρκειας ζωής σημείων του δικτύου που χαρακτηρίζονται κρίσιμα από λειτουργικής και οικονομικής απόψεως. Οι σημερινές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για το λόγο αυτό, απαιτούν αποστολή προσωπικού στο σημείο της βλάβης, μια διαδικασία δαπανηρή και χρονοβόρα, καθώς η διαδικασία εύρεσης του σημείου βλάβης γίνεται με μετρήσεις μερικής εκφόρτισης, σε προσωρινά αποσυνδεδεμένα κομμάτια, τα οποία τροφοδοτούνται εξωτερικά. Από λειτουργικής άποψης το όφελος δηλαδή του ευφυούς δικτύου στη μέση τάση είναι πολύ σημαντικό καθώς δημιουργούνται διαγνωστικά εργαλεία που χρησιμοποιούν συσκευές επικοινωνίας και ανίχνευσης, που πλεονεκτούν έναντι της σημερινής μεθόδου, παρακολουθώντας μετρήσεις όπως τη θερμοκρασία του λαδιού του μετασχηματιστή, τις τάσεις των δευτερευόντων τυλιγμάτων τους και της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος. Το πλεονέκτημα σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι οι διαφορετικές συσκευές που παραδοσιακά χρησιμοποιούνταν για την ανίχνευση (αισθητήρες) και την επικοινωνία έχουν συμπυκωθεί σε μια συσκευή που διαδραματίζει ταυτόχρονα το ρόλο του αισθητήρα και του modem.

Επιπλέον κρίσιμη είναι η συμβολή τους στο φαινόμενο όπου μία γεννήτρια μπορεί να συνεχίσει να τροφοδοτεί μια τοποθεσία, αν και δεν είναι συνδεδεμένη πλέον με το δίκτυο. Είναι πολύ σημαντικό να προλαμβάνονται τέτοια φαινόμενα για την προστασία τόσο του δικτύου και των συνδεδεμένων συσκευών, όσο και των εργαζομένων που αγνοούν ότι η περιοχή συνεχίζει να τροφοδοτείται. Με τη χρήση του BPL η σηματοδότηση για την αποσύνδεση των καταναμημένων γεννητριών γίνεται απλή διαδικασία.

### 1.5.3 Χρήση στα δίκτυα χαμηλής τάσης (XT)

Στην πλευρά της χαμηλής τάσης, οι βασικοί τομείς που ωφελούνται από τη χρήση BPL είναι η αυτόματη ανάγνωση μετρητών και οι προηγμένες υποδομές μέτρησης, η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και δικτύου και η διαχείριση της ζήτησης, εφαρμογές που αναλύονται στη συνέχεια.

Τα προηγμένα μετρητικά συστήματα, με τη βοήθεια της BPL τεχνολογίας, οδηγούνται από την απλή μονόδρομη μετάδοση τιμών, στη χρήση αμφίδρομων επικοινωνιών που ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ των επιχειρήσεων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και των πελατών τους. Επιτρέπουν δηλαδή στις επιχειρήσεις να αλληλεπιδρούν με τους μετρητές και να παρέχουν πληροφορίες στους πελάτες τους σχετικά με το κόστος χρήσης της υπηρεσίας τους σε πραγματικό χρόνο. Παρόλο που η εγκατάσταση ευφύων μετρητών δεν είναι ένα απαραίτητο στοιχείο του ευφυούς δικτύου, είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για τη μείωση του λειτουργικού κόστους και των απωλειών των επιχειρήσεων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μπορούν απομακρυσμένα να μειώσουν τις μη τεχνικές απώλειές τους, οι οποίες αφορούν κλοπή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τεχνολογία PLC στενής ζώνης είναι η ενδεδειγμένη για την υλοποίηση εφαρμογών μετρητικών συστημάτων που αν και υποστηρίζουν σχετικά μικρές ταχύτητες μετάδοσης, τα σήματα στενής ζώνης διαδίδονται εύκολα μέσα από μετασχηματιστές χαμηλής και μέσης τάσης, χωρίς να χρειαστεί κάποιου είδους αλλαγή στο δίκτυο. Τέτοια συστήματα είναι ικανά να καλύπτουν αποστάσεις της τάξεως των 150km ή και περισσότερο. Σε καταστάσεις επείγουσας ανάγκης, οι συμβατικές τεχνικές δικτύωσης αντιμετωπίζουν προβλήματα συμφόρησης λόγω συγκρούσεων, όταν οι μετρητές αναγκάζονται να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο ταυτόχρονα (αποστέλλοντας πληροφορίες για μια διακοπή) ή για διαχειριστικούς λόγους αποστέλλονται πολλαπλά σήματα προς τους οικιακούς μετρητές. Στις περιπτώσεις αυτές, ασύρματες υλοποιήσεις που βασίζονται στα πρότυπα ZigBee ή WiFi, αποτυγχάνουν ενώ υλοποιήσεις BPL είναι ικανές να αποφύγουν τη συμφόρηση[11].

Με τη σταδιακή αύξηση του μεριδίου αγοράς των υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία χρησιμοποιούν το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για φόρτιση των μπαταριών τους, αυξάνονται και τα νέα σενάρια για τη χρήση του δικτύου. Ένας σημαντικός λόγος ύπαρξης ενός επικοινωνιακού συνδέσμου μεταξύ οχήματος και δικτύου, είναι για παράδειγμα ο έλεγχος του φορτίου ανά περιοχή που μπορεί να προκαλέσει η αυξημένη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων. Πλεονέκτημα της χρήσης BPL τεχνολογίας σε αυτές τις εφαρμογές, είναι το γεγονός ότι δημιουργείται μια σαφής συσχέτιση ενός οχήματος και ενός σταθμού επαναφόρτισης, πράγμα μη εφικτό με ασύρματες λύσεις ακόμα και μικρής εμβέλειας. Η φυσική αυτή συσχέτιση είναι

ουσιώδης, ειδικά για λόγους ασφάλειας και πιστοποίησης των οχημάτων και με τη χρήση λύσεων που ενσωματώνουν NB-PLC τεχνολογία (όπως στα μετρητικά δίκτυα), μπορεί να διατηρηθεί ομοιογένεια στο δίκτυο.

Τέλος, μεγάλη είναι η σημασία στις εφαρμογές διαχείρισης της ζήτησης στο δίκτυο, παρέχοντας τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού να διαχειρίζονται τη ζήτηση, αναλογικά με την παραγωγή ισχύος από μορφές που είναι αδύνατο να προγραμματιστούν ντετερμινιστικά, όπως η ηλιακή και αιολική. Παρέχεται ένα μέσο, για τον καλύτερο έλεγχο των συνθηκών μέγιστης ζήτησης, τη μεγιστοποίηση της χρήσης της διαθέσιμης ισχύος, την αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου με οικονομικούς όρους μέσω δυναμικών μοντέλων τιμολόγησης και τη δυνατότητα των πελατών να προσαρμόζουν ενεργά την ενεργειακή τους συμπεριφορά. Η εφαρμογή των προηγούμενων χρειάζεται μόνο ένα σύνδεσμο ανάμεσα στο δίκτυο και τις οικιακές συσκευές και μπορεί να υλοποιηθεί τόσο με στενής όσο και ευρείας ζώνης PLC τεχνολογία. Ενώ τεχνικά και οι δύο υλοποιήσεις είναι ικανές να παρέχουν πρόσθετο όφελος μέσω της μεταφοράς δεδομένων, οι ευρυζωνικές υλοποιήσεις δεν είναι πάντα ιδανικές, λόγω αυξημένου κόστους και υψηλότερης εξασθένησης την οποία αντιμετωπίζουν τα PLC σήματα στην πλευρά χαμηλής τάσης. Σε περιπτώσεις που οι αποστάσεις μεταξύ των οικιακών συσκευών και του αντίστοιχου σημείου αποδοχής των σημάτων στο δίκτυο (π.χ. μετασχηματιστές) είναι μεγάλες, το όφελος των μικρότερων απωλειών διαδρομής του PLC στενής ζώνης καθιστά αυτές τις υλοποιήσεις ιδανικές για εφαρμογές διαχείρισης ζήτησης.



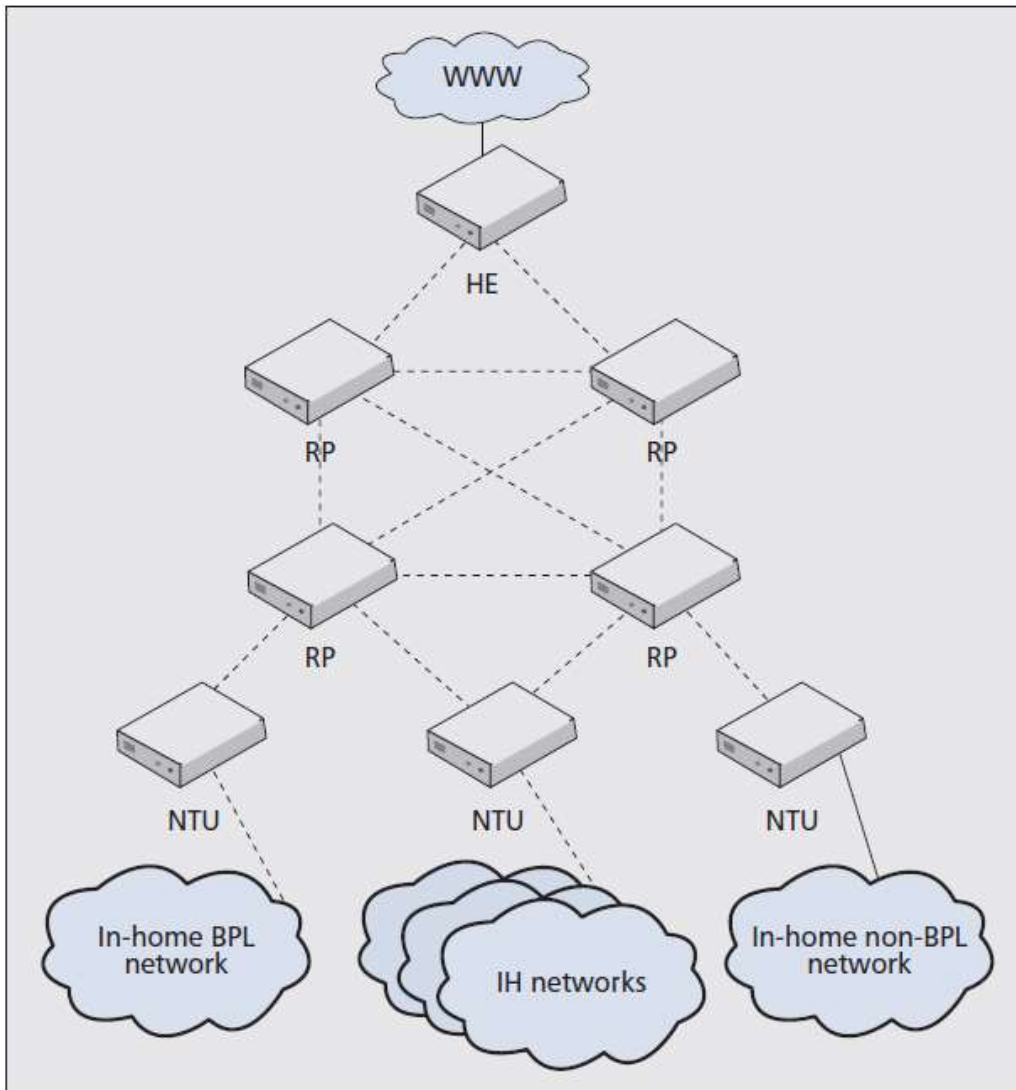
## 2 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ 1901

Τον Ιούνιο του 2005 20 εταιρίες σχημάτισαν την ομάδα εργασίας IEEE P1901, στην οποία ανατέθηκε η δημιουργία ενός διεθνούς τεχνικού προτύπου για επικοινωνία υψηλής ταχύτητας ( > 100 Mb/s στο φυσικό στρώμα) μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, ώστε εφαρμογές PLC Να λειτουργούν υπό κοινό πλαίσιο. Το πρότυπο IEEE 1901 που δημιουργήθηκε ισχύει τόσο για οικιακές εφαρμογές όσο και για εφαρμογές επιχειρήσεων ηλεκτρισμού.

### 2.1 Τοπολογία συστήματος πρόσβασης IEEE 1901

Το σύστημα πρόσβασης που ορίζεται από το πρότυπο IEEE 1901 έχει κυψελωτή δομή. Η κυψέλη είναι μια ομάδα σταθμών που διαχειρίζονται και εξουσιοδοτούνται από τον ίδιο κόμβο, συνήθως κάποιον κεντρικό ή επικεφαλής κόμβο. Εκτός από την άμεση διαχείριση, πρόσθετα δικτυακά στοιχεία τυγχάνουν έμμεσης διαχείρισης χρησιμοποιώντας διαφορετικούς σταθμούς ως πληρεξούσιους (proxies).

Το Σχ. 2.1 αποδίδει τα βασικά στοιχεία μιας κυψέλης πρόσβασης 1901, που περιλαμβάνουν τον επικεφαλής κόμβο (HE – head end), ένα πλήθος αναμεταδοτών (RP – repeating stations) και κόμβους τερματισμού του δικτύου (NTU – network termination stations). Ο επικεφαλής κόμβος διαχειρίζεται την κυψέλη και συνδέει όλο το δίκτυο πρόσβασης στο δίκτυο κορμού (backbone). Οι αναμεταδότες είναι κόμβοι με δυνατότητα επανάληψης της πληροφορίας μεταξύ διαφορετικών σταθμών. Οι κόμβοι τερματισμού του δικτύου, εκτός από αναμετάδοση της πληροφορίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως γέφυρα (bridge) μεταξύ του δικτύου πρόσβασης και εξωτερικών δικτύων όπως οικιακά δίκτυα ή δίκτυα που δεν χρησιμοποιούν BB-PLC (Broadband PLC) τεχνολογία όπως τα IEEE 802.11 (WiFi) και IEEE 802.3 (Ethernet). Με διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 2.1 απεικονίζονται οι συνδέσεις μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος και με σταθερή γραμμή οι άλλες δικτυακές συνδέσεις.



Σχήμα 2.1 : Στοιχεία κυψέλης πρόσβασης 1901

## 2.2 Επικοινωνία από άκρο σε άκρο (end to end)

Σε ένα δίκτυο πρόσβασης όπου χρησιμοποιούνται αναμεταδότες, η επικοινωνία από άκρο σε άκρο ορίζεται ως η συνολική διαδρομή μεταξύ των ακραίων κόμβων του δικτύου (πχ. του επικεφαλής κόμβου και των κόμβων τερματισμού του δικτύου που συνδέονται με κάποιο εξωτερικό δίκτυο), συμπεριλαμβάνοντας και τους αναμεταδότες που χρησιμοποιούνται ανάμεσά τους. Σε ένα τυπικό δίκτυο πρόσβασης, τα πακέτα μεταδίδονται μεταξύ των διαφόρων κόμβων του δικτύου. Οι κόμβοι αυτοί, ωστόσο, δεν είναι συνήθως οι τελικοί προορισμοί των πακέτων ούτε οι αρχικοί αποστολείς τους, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις όπου ένα πακέτο εισέρχεται στο δίκτυο μέσω ενός ακραίου κόμβου και προωθείται εκτός δικτύου από κάποιον άλλον. Προκειμένου να επιτευχθεί αξιόπιστη μεταφορά των πακέτων

από άκρο σε άκρο, το πλαίσιο (frame) των πακέτων του συστήματος πρόσβασης αποτελείται από :

- Μια εξωτερική επικεφαλίδα που καθορίζει τη διαδρομή από άκρο σε άκρο και περιλαμβάνει τις διευθύνσεις του αποστολέα και του παραλήπτη
- Μια εσωτερική επικεφαλίδα που δημιουργείται από κάθε αναμεταδότη για την επικοινωνία σημείου προς σημείο στο δίκτυο και καθορίζει τη διαδρομή προς τον ακραίο κόμβο.

### 2.3 Εξοικονόμηση ενέργειας

Τα περισσότερα συστήματα πρόσβασης είναι υπαίθρια και αποτελούνται από εκατοντάδες ή και χιλιάδες κόμβους. Αν ένας ευφυής μετρητής καταναλώνει 1 W/h, το σύνολο θα ήταν ένα μεγάλο φορτίο για το σύστημα. Προκειμένου να εξοικονομηθεί ενέργεια αλλά και να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές προς πρωτεύουσες ασύρματες υπηρεσίες, έχει καθιερωθεί η κατάσταση νάρκης (sleep mode) στο πρότυπο IEEE 1901.

Η μεγαλύτερη πρόκληση για την κατάσταση νάρκης είναι η μεγάλη απόσταση μεταξύ των σταθμών. Η πολυπλοκότητα και η καθυστέρηση του σήματος καθιστούν δύσκολο τον προγραμματισμό και τη διάρκεια των περιόδων νάρκης των κόμβων, καθώς μεγαλύτερη διάρκεια περιόδου νάρκης μπορεί να προκαλέσει απώλειες πακέτων αφού οι κόμβοι δεν θα είναι σε ενεργή κατάσταση και μικρότερη διάρκεια περιόδου νάρκης δεν θα έχει βέλτιστη εξοικονόμηση ενέργειας. Για να υποστηριχθεί η κατάσταση νάρκης, αλλά και να διασφαλιστεί η διαθεσιμότητα των υποδομών του δικτύου, το σύστημα λειτουργεί με ιεραρχικό τρόπο. Η διαδικασία για την ενεργοποίηση της κατάστασης νάρκης ξεκινάει από τον επικεφαλής κόμβο και καταλήγει στους κόμβους τερματισμού. Όποτε ένας κόμβος θέλει να εισέλθει σε κατάσταση νάρκης δημοσιοποιεί την πληροφορία μέσω μηνυμάτων φάρων (beacon messages). Οι κόμβοι που βρίσκονται κατώτερα στη δενδρική ιεραρχία από αυτόν, μπορούν να συγχρονίσουν τις δικές τους περιόδους νάρκης ανάλογα με τις περιόδους του κόμβου πατέρα. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι κόμβοι κάτω από τον κόμβο πατέρα θα βρεθούν σε κανονική λειτουργία, δηλαδή εκτός κατάστασης νάρκης τη χρονική στιγμή στην οποία αναμένεται να λάβουν μηνύματα.

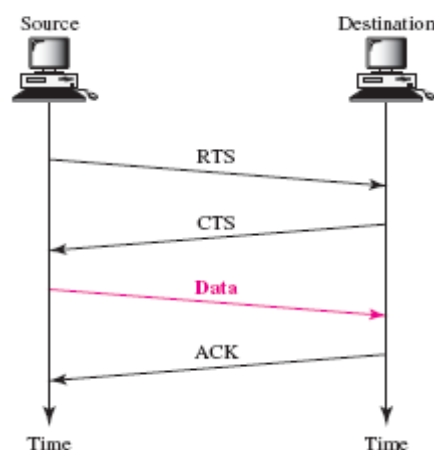
Επιπλέον, το σύστημα είναι ικανό να προσδιορίσει ένα σύνολο ή κατάλογο κόμβων που θα αποκλειστούν από την κατάσταση νάρκης λόγω της σημασίας τους στην εύρυθμη λειτουργία του δικτύου ή λόγω κρισιμότητας των εφαρμογών που υποστηρίζουν. Ο κατάλογος αυτός μπορεί να δημιουργηθεί είτε από τον

επικεφαλής κόμβο είτε από άλλους κόμβους οι οποίοι απαιτούν συνεχή λειτουργία, άρα είναι αναγκαία και η συνεχής λειτουργία του πατέρα τους.

## 2.4 Κατανομή εύρους ζώνης (Bandwidth Allocation)

Το προεπιλεγμένο MAC πρωτόκολλο των δικτύων πρόσβασης είναι το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης ανίχνευσης φέροντος με αποφυγή συγκρούσεων (CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) με προτεραιότητες. Το πρωτόκολλο αυτό δίνει σε κάθε κόμβο του δικτύου τη δυνατότητα να ανταγωνίζεται ανεξάρτητα από τους γείτονές του για την πρόσβαση στο μέσο, χωρίς να τίθεται υπό τον έλεγχο κάποιου σταθμού master. Η ανίχνευση του μέσου γίνεται με ανταλλαγή πλαισίων αίτησης αποστολής (RTS – request to send) και αποδοχής αποστολής (CTS – clear to send) πριν τη δέσμευση του μέσου και μετάδοση των δεδομένων. Επίσης, κάθε σταθμός χρησιμοποιεί πλαίσια θετικών επιβεβαιώσεων (ACK – positive acknowledgement) για την επιβεβαίωση ή μη της λήψης των δεδομένων.

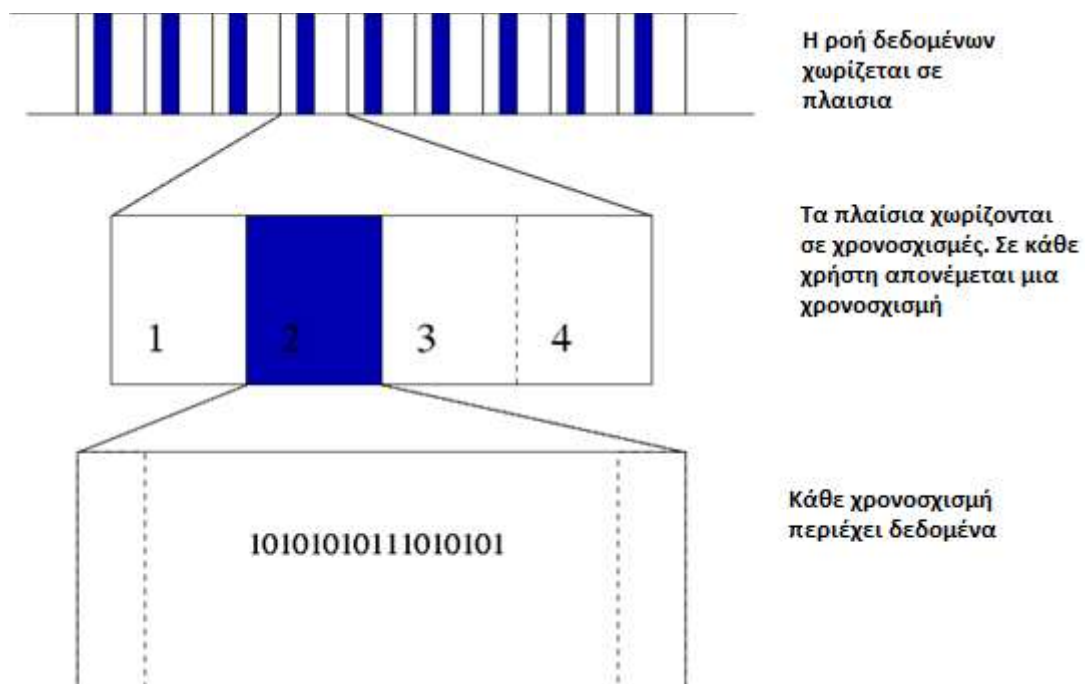
Το πρωτόκολλο CSMA/CA είναι σχεδιασμένο να μειώνει την πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ πολλαπλών σταθμών που προσπαθούν να αποκτήσουν πρόσβαση στο μέσο στο χρονικό σημείο όπου είναι περισσότερο πιθανές οι συγκρούσεις όπως αμέσως μόλις το μέσο γίνει αδρανές μετά από κάποια περίοδο όπου ήταν απασχολημένο με κάποια μετάδοση. Αυτή η δυνατότητα το καθιστά ικανό για χρήση σε δυναμικά μεταβαλλόμενες τοπολογίες με πολλαπλές αναπηδήσεις (hops). Η δυναμική φύση του δικτύου και η ασταθής τοπολογία του καθιστούν δύσκολο τον καθορισμό ενός τοπικού διαχειριστή ο οποίος θα καθορίζει τις σχέσεις μεταξύ του επικεφαλής κόμβου, των αναμεταδοτών και των κόμβων τερματισμού.



Σχήμα 2.2 : Πρωτόκολλο CSMA/CA

Εντούτοις, το πρωτόκολλο CSMA/CA στερείται ενός σημαντικού χαρακτηριστικού, το οποίο είναι η διασφάλιση συγκεκριμένου εύρους ζώνης ή ελάχιστης καθυστέρησης, καθώς ο αλγόριθμος πρόσβασης στο μέσο που χρησιμοποιεί είναι βασισμένος σε στατιστικά. Δεν μπορεί έτσι να εξυπηρετήσει υπηρεσίες και εφαρμογές που απαιτούν σαφώς καθορισμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS), όπως οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου (όπως πχ. τηλεφωνία και τηλεδιάσκεψη).

Επίσης, για εφαρμογές όπως τα συστήματα Smart Grid είναι σημαντικό να έχουν πρόσβαση στο μέσο με ντετερμινιστικό τρόπο. Το πρωτόκολλο πρόσβασης με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDMA – Time Division Multiple Access) διασφαλίζει την κατανομή εύρους ζώνης εφόσον αυτό σχεδιαστεί κατάλληλα για να λειτουργεί σε περιβάλλον multi - hop. Ο επικεφαλής κόμβος είναι υπεύθυνος για την εξουσιοδότηση της λειτουργίας ενός TDMA καναλιού μέσα στην κυψέλη. Κάθε ακραίος σταθμός που θέλει να χρησιμοποιήσει την υπηρεσία TDMA θα ζητήσει τη χρήση ενός καναλιού ανάλογα με το επίπεδο της υπηρεσίας που απαιτεί η αντίστοιχη εφαρμογή. Ο επικεφαλής κόμβος θα αποφασίσει για την ικανοποίηση του αιτήματος και θα εκκινήσει τις διαδικασίες κατανομής των χρονοσχημάτων (slots) σύμφωνα με τους φυσικούς περιορισμούς του TDMA καναλιού και τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου.



Σχήμα 2.3 : Πρωτόκολλο TDMA

Ο επικεφαλής κόμβος μπορεί να κάνει χρήση δύο μεθόδων για την κατανομή των TDMA χρονοσχισμών, όπως αναλύεται στις επόμενες ενότητες. Μπορεί να προγραμματίσει μια χρονοσχισμή ανά βήμα αναμετάδοσης (hop), από και προς τους σταθμούς, λειτουργώντας ως κεντρικός διαχειριστής. Εναλλακτικά, μπορεί να εκκινήσει μια απομακρυσμένη και κατανεμημένη διαδικασία κατά την οποία κάθε αναμεταδότης είναι υπεύθυνος για την κατανομή των χρονοσχισμών ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους σε χρόνο και εύρος ζώνης. Η πρώτη μέθοδος αναφέρεται ως συγκεντρωτικό TDMA (καθώς ο επικεφαλής κόμβος είναι υπεύθυνος για το σύνολο των ενεργειών) και η δεύτερη μέθοδος αναφέρεται ως κατανεμημένο TDMA (καθώς κάθε σταθμός διαχειρίζεται τον προγραμματισμό των χρονοσχισμών του ανεξάρτητα, αφού λάβει εξουσιοδότηση από τον επικεφαλής κόμβο).

Ο επικεφαλής κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτές τις μεθόδους παράλληλα, έχοντας έλεγχο συγκεκριμένων TDMA καναλιών και, ταυτόχρονα, παρέχοντας τη δυνατότητα σε διαφορετικά TDMA κανάλια να προσαρμόζονται αυτόνομα. Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να επιτευχθεί ένα επίπεδο προτεραιοτήτων και διαφορετικά επίπεδα υπηρεσίας μεταξύ των TDMA καναλιών.

#### **2.4.1 Συγκεντρωτικό TDMA**

Όταν ο επικεφαλής κόμβος χρησιμοποιεί τη μέθοδο του συγκεντρωτικού TDMA, καθίσταται ο μοναδικός διαχειριστής του καναλιού μεταξύ του ιδίου και των ακραίων κόμβων. Είναι υπεύθυνος για την κατανομή των TDMA χρονοσχισμών για κάθε αναμεταδότη στη διαδρομή από και προς τον ακραίο κόμβο. Ο επικεφαλής κόμβος αποστέλλει ένα μήνυμα προς κάθε αναμεταδότη στην κυψέλη και εκχωρεί τη χρονοσχισμή με βάση τις πληροφορίες που έχει για το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Χρησιμοποιώντας τη συγκεντρωτική μέθοδο μπορεί να εξασφαλιστεί συγχρονισμός της κατανομής των χρονοσχισμών σε όλη την από άκρο σε άκρο διαδρομή. Ο επικεφαλής κόμβος μπορεί να διαθέσει τις χρονοσχισμές κατά τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιηθεί η κατανομή τους στους κόμβους και να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων για όλη την κυψέλη.

#### 2.4.2 Δυναμικό TDMA με δειγματοληψία (polling)

Μια άλλη μορφή της μεθόδου του συγκεντρωτικού TDMA είναι το TDMA με δειγματοληψία (polling). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, ένας κύριος κόμβος (συνήθως ο επικεφαλής), καθορίζει το χρονοδιάγραμμα (schedule) των σχισμών κατά την έναρξη της λειτουργίας του δικτύου. Καθώς όμως η κατάσταση του διαύλου και οι πόροι του δικτύου μεταβάλλονται δυναμικά, ο πίνακας του χρονοδιαγράμματος θα τροποποιείται ταυτόχρονα, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας της κατάστασης των κόμβων και την κατάσταση του διαύλου.

Η δειγματοληψία από τον κύριο κόμβο είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις διαχείρισης μεγάλου αριθμού αυτόματων μετρητών (AMR) καθώς αποφεύγονται συγκρούσεις λόγω του CSMA. Η σηματοδοσία είναι σχεδιασμένη ώστε να κατανέμει χρονοσχισμές με ημί-επίμονο τρόπο (semi-persistent). Δηλαδή, μια κατανομή σηματοδοτείται μέσω ενός μηνύματος φάρου (beacon), και τα μηνύματα αυτά αναμένεται να έχουν μια περιοδικότητα ενός ή δύο δευτερολέπτων. Αυτό σημαίνει ότι επαναλαμβάνεται κατά τη διάρκεια αυτών των δευτερολέπτων η ίδια κατανομή χρονοσχισμών.

Αυτό το είδος της ημί-επίμονης κατανομής, είναι συνήθως χρήσιμο για ροές δεδομένων όπως φωνή ή βίντεο, τα οποία έχουν σταθερό ρυθμό δεδομένων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, για δειγματοληψία σε αυτόματους μετρητές, όπου η ροή δεδομένων στο δίκτυο αποτελείται από πακέτα μικρής διάρκειας ή μικρού όγκου (της τάξης των μερικών εκατοντάδων kilobits) με μικρή συχνότητα αποστολής, εάν το χρονοδιάγραμμα TDMA δεν οριστεί προσεκτικά, μπορεί να υπάρξει μεγάλη σπατάλη εύρους ζώνης.

#### 2.4.3 Κατανεμημένη μέθοδος TDMA

Όταν ο επικεφαλής σταθμός χρησιμοποιεί την κατανεμημένη μέθοδο TDMA ελέγχει μόνο το πρώτο βήμα (hop) προς τον ακραίο κόμβο προορισμού των πακέτων. Κάθε αναμεταδότης κατά μήκος της από άκρο σε άκρο διαδρομής είναι υπεύθυνος για την κατανομή μιας χρονοσχισμής ανάλογα με τον τοπικό χάρτη διαθέσιμων χρονοσχισμών που έχει δημιουργήσει συλλέγοντας πληροφορίες από τα μηνύματα φάρους των γειτονικών κόμβων και από τις ήδη ανατεθειμένες χρονοσχισμές στο πρόγραμμά του. Οι χρονοσχισμές κατανέμονται σειριακά σε κάθε βήμα μέχρι να δημιουργηθεί μια διαδρομή από τον επικεφαλής προς τον ακραίο κόμβο και αντίστροφα.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι, λόγω της τοπικής φύσης της διαχείρισης, κάθε κόμβος μπορεί να αναθέσει μια χρονοσχιμή ανάλογα με τους τοπικούς περιορισμούς στους οποίους υπόκειται και είναι σε θέση να εκτελέσει ταχεία ανάκαμψη κατά τη διάρκεια του αρχικού χρονοπρογραμματισμού TDMA σε περιπτώσεις σύγκρουσης των κατανομών των χρονοσχιμών του, με τις κατανομές γειτονικών κόμβων ή και γειτονικών κυψελών. Η κατανομημένη μέθοδος είναι επίσης ευκολότερη ως προς τη διαχείριση, σε περιπτώσεις όπου η διαδρομή μεταβάλλεται λόγω προσθήκης ή αφαίρεσης κόμβων και υπάρχει η ανάγκη για ταχεία αναδημιουργία μεγάλων τμημάτων του TDMA χρονοδιαγράμματος.



## 3 ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QoS)

### 3.1 Πολλαπλές υπηρεσίες σε PLC εφαρμογές (multi service)

Τα ευφυή δίκτυα είναι πολύπλοκα δίκτυα που περιλαμβάνουν ευφυές ηλεκτρονικές συσκευές, ασύρματους και ενσύρματους αισθητήρες, διεσπαρμένες πηγές και διεσπαρμένα φορτία τα οποία χρειάζονται συνεργασία και συντονισμό προκειμένου να λειτουργήσουν αποδοτικά. Για την υλοποίηση τέτοιων δικτύων πρέπει να ενσωματωθούν ετερογενείς τεχνολογίες και να ικανοποιηθεί ένα μεγάλο εύρος απαιτήσεων, διαφορετικό από άλλα δίκτυα, για παράδειγμα υψηλή διαθεσιμότητα και ταυτόχρονα μικρή καθυστέρηση.

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, το κύριο συστατικό των ευφυσών δικτύων είναι ένα δίκτυο κατανεμημένων αισθητήρων που λειτουργούν ως κόμβοι του δικτύου και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με την υπόλοιπη υποδομή του δικτύου, με σκοπό την απόκτηση, την επεξεργασία και τη μετάδοση πληροφοριών που προέρχονται από το περιβάλλον. Οι κόμβοι αυτοί πρέπει, επίσης, να διαθέτουν δυνατότητες δρομολόγησης χρησιμοποιώντας ενσύρματους ή ασύρματους διαύλους, καθώς η επεξεργασία της πληροφορίας που μεταδίδουν θα επιτρέψει τον έλεγχο της συμπεριφοράς του ηλεκτρικού δικτύου μέσω ευφυσών μηχανισμών. Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο του είναι οι ευφυείς μετρητές, που γεφυρώνουν τη συμπεριφορά των χρηστών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και τη μέτρηση της κατανάλωσης ισχύος τους.

Στο ευφυές δίκτυο διακινούνται ταυτόχρονα πληροφορίες από προηγμένες υποδομές μέτρησης, κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους, προηγμένους αυτοματισμούς διανομής καθώς και από συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών και πληροφοριών των καταναλωτών. Οι πραγματικού χρόνου πληροφορίες αυτές οι οποίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας ανάλογα με τη λειτουργία την οποία εξυπηρετούν, πρέπει να μεταδίδονται μέσω διαφορετικών συσκευών του δικτύου, πάνω από διαφορετικού τύπου διαύλους. Για παράδειγμα, επικοινωνία πραγματικού χρόνου είναι αναγκαία για την ανίχνευση βλαβών, την αποκατάσταση των υπηρεσιών και το συνεχή έλεγχο ποιότητας, ενώ περιοδική επικοινωνία χρησιμοποιείται στα μετρητικά συστήματα, στα οποία πραγματοποιείται μαζική μεταφορά δεδομένων, για την επεξεργασία αρχείων καταγραφής.

Οι ευφυείς ηλεκτρονικές συσκευές που εμπλέκονται στις ανωτέρω διαδικασίες είναι εγκατεστημένες σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές, λόγω της επιδιωκόμενης αποκεντρωμένης αρχιτεκτονικής των δικτύων. Για παράδειγμα, τα στοιχεία ενός υποσταθμού είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο Ethernet του υποσταθμού, οι αισθητήρες που εγκαθίστανται κατά μήκος των καλωδίων επικοινωνούν μεταξύ

τους μέσω ασυρμάτων πρωτοκόλλων (πχ IEEE 802.11s), και η επικοινωνία από το κέντρο ελέγχου του δικτύου με τους μετρητές ενέργειας και τους υποσταθμούς γίνεται μέσω των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (PLC).

Παρατηρείται ότι το ευφυές δίκτυο απαιτεί την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών, μέσω ετερογενών δικτύων δεδομένων και με διαφορετικούς περιορισμούς ποιότητας. Είναι αναγκαίο ένα πλαίσιο για τη διαχείριση της ποιότητας από άκρο σε άκρο, το οποίο θα επιτρέπει την αύξηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από ένα σύστημα το οποίο δεν κάνει χρήση επικοινωνιακών υποδομών. Σήμερα, κάθε νέα εφαρμογή που προστίθεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει την ανάπτυξη μιας νέας επικοινωνιακής υποδομής. Αυτό έχει ως συνέπεια ένα κατακερματισμένο σύνολο τηλεπικοινωνιακών μεθόδων το οποίο καθιστά δύσκολη τη βελτίωση της ποιότητας και του επιπέδου διαχείρισης του δικτύου. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε πλεονασμό υποδομών και λειτουργιών του δικτύου. Επομένως, ένας από τους βασικούς στόχους που θα πρέπει να ικανοποιεί το ευφυές δίκτυο είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος από το οποίο θα επωφελούνται όλες οι εφαρμογές.

### 3.2 Απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας σε ευφυή δίκτυα

Τα δίκτυα νέας γενιάς έχουν δημιουργήσει μια σειρά προκλήσεων για την υλοποίησή τους, με μια από τις κυριότερες να είναι η ποιότητα της υπηρεσίας (QoS – Quality of Service) από άκρο σε άκρο, λόγω της αύξησης του πλήθους των πολυμεσικών επικοινωνιών. Πραγματοποιούνται έρευνες για το σχεδιασμό αρχιτεκτονικών ελέγχου της QoS ώστε να υποστηρίζεται απρόσκοπτα η ίδια ποιότητα υπηρεσίας που εξυπηρετείται μέσω ετερογενών δικτύων, καθώς η διαφορετική ποιότητα υπηρεσίας που υποστηρίζουν διαφορετικά δίκτυα τείνει να γίνει ο λόγος συμφόρησης της πληροφορίας στις ροές δεδομένων από άκρο σε άκρο. Το σύστημα επικοινωνιών στο ευφυές δίκτυο μπορεί να αποτελείται από ασύρματα συστήματα ή BB-PLC συστήματα μέσω γραμμών μεταφοράς ισχύος, οι παράμετροι ποιότητας των οποίων πρέπει να αντιστοιχισθούν εσωτερικά μεταξύ τους και στη συνέχεια να συσχετισθούν με τις παραμέτρους των διαφορετικών τεχνολογιών που λειτουργούν εξωτερικά του ευφυούς δικτύου ώστε να διασφαλίσουν ενιαία ποιότητα υπηρεσίας. Η ανάγκη χρήσης ετερογενών τεχνολογιών δικτύωσης προκύπτει από το γεγονός ότι, σε πολλές χώρες, το μεγαλύτερο τμήμα του ηλεκτρικού δικτύου είναι υπόγειο, οπότε καθίσταται απαραίτητος ο συνδυασμός πολλαπλών τεχνολογιών, καθώς καμία δεν μπορεί μόνη της να εξυπηρετήσει το σύνολο του δικτύου.

Το BB-PLC και τα ασύρματα δίκτυα είναι απρόβλεπτα, καθώς η τοπολογία τους μεταβάλλεται συνεχώς και ως εκ τούτου η ποιότητα της υπηρεσίας είναι ανάγκη να εκτιμηθεί με βάση το σύνολο των εγκατεστημένων τεχνολογιών σε όλο το ευφυές δίκτυο, καθώς αν και κάθε τεχνολογία ορίζει ανεξάρτητα τις δικές της ανάγκες, δεν υπάρχει τρόπος διαχείρισης της ποιότητας της υπηρεσίας σε ετερογενή δίκτυα στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων.

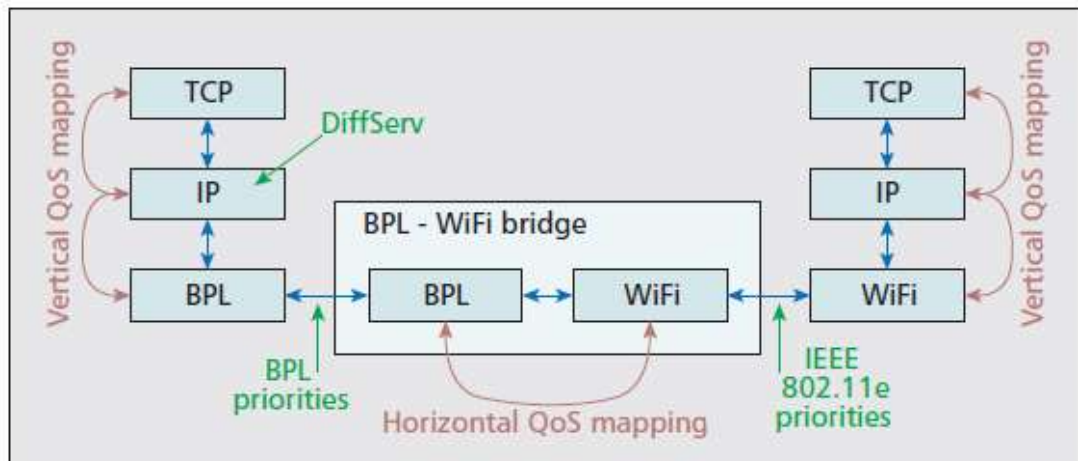
Τα ευφυή δίκτυα χαρακτηρίζονται από αμφίδρομη ροή ηλεκτρισμού αλλά και πληροφορίας, ικανής για την παρακολούθηση και την ανταπόκριση σε αλλαγές είτε από την πλευρά της παραγωγής ενέργειας είτε από την πλευρά της αλλαγής της συμπεριφοράς των καταναλωτών. Ως εκ τούτου, η αμφίδρομη αυτή επικοινωνία πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις να διαχειρίζονται δεδομένα χρηστών και ελέγχου, τα οποία πρέπει να συμμορφώνονται με πολύ αυστηρές απαιτήσεις επικοινωνίας ως προς τη διαθεσιμότητα και την καθυστέρηση. Για παράδειγμα, στο [12] ορίζονται χρόνοι μετάδοσης της τάξης των 5 ms για πληροφορίες που αφορούν την προστασία μέσα σε έναν υποσταθμό, 8-12 ms για πληροφορίες εκτός του υποσταθμού, ενώ για εφαρμογές ελέγχου και διαχείρισης ορίζεται καθυστέρηση 16 ms. Αν και μπορεί να φαίνεται λογικό ότι οι απαιτήσεις αυτές που τίθενται στους πρωτεύοντες υποσταθμούς μπορεί να γίνουν ελαστικότερες στα δίκτυα διανομής, αυτό μπορεί να γίνει μόνο μέχρι κάποιο βαθμό, καθώς το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έχει περίοδο λειτουργίας 20 ή 16.66 ms οπότε οι προδιαγραφές για τα συστήματα προστασίας και διανομής πρέπει να είναι συσχετισμένες με αυτήν. Στο Ευρωπαϊκό πρόγραμμα INTEGRIS μια εκτίμηση του χρόνου μετάδοσης για την επικοινωνία στο δίκτυο διανομής του ευφυούς δικτύου απαιτεί χρόνους μετάδοσης της πληροφορίας της τάξης των 20ms για συγκεκριμένες εφαρμογές [13].

### 3.3 Έλεγχος και ποιότητα υπηρεσίας από άκρο σε άκρο

Προκειμένου να παρέχεται απρόσκοπτη ποιότητα υπηρεσίας καθ' όλη τη διαδρομή μέσω ετερογενών τεχνολογιών, η χαρτογράφηση της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσίας (δηλαδή η συσχέτιση των παραμέτρων που αφορούν την ποιότητα υπηρεσίας ανάμεσα σε διαφορετικές τεχνολογίες) πρέπει να πραγματοποιείται στις συσκευές που βρίσκονται στα σύνορα των διαφορετικών τεχνολογιών. Στην περίπτωση του ευφυούς δικτύου αυτό πρέπει να υλοποιείται στις επικεφαλής συσκευές και τις συσκευές τερματισμού του δικτύου, έτσι ώστε κάθε ροή πληροφορίας να έχει κατάλληλες παραμέτρους σύμφωνα με τις αντίστοιχες απαιτήσεις. Οι συσκευές αυτές λαμβάνουν το ρόλο του μεσίτη και πρέπει να είναι σε θέση να αποφασίσουν εάν το δίκτυο διαθέτει επαρκείς πόρους για το χειρισμό κάθε νέου αιτήματος. Οι διαφορετικές λειτουργίες και η ποικιλία των θέσεων σε

ένα ευφυές δίκτυο καθιστούν κρίσιμη τη μετάδοση πληροφοριών από πολλαπλές συσκευές με διαφορετικές απαιτήσεις QoS μέσω ετερογενών δικτύων. Καθώς οι δυνατότητες και οι παράμετροι διαφορετικών τεχνολογιών μεταβάλλονται, είναι ανάγκη να οριστούν σαφώς οι διάφορες κατηγορίες QoS.

Η χαρτογράφηση των κατηγοριών QoS μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών κατηγοριοποιείται ευρέως σε κάθετο (Vertical) και οριζόντιο (Horizontal). Η κάθετη χαρτογράφηση των κατηγοριών αναφέρεται στον προσδιορισμό των παραμέτρων QoS μεταξύ δύο γειτονικών επιπέδων στην ίδια στοίβα πρωτοκόλλου (για παράδειγμα το επίπεδο ζεύξης δεδομένων και το επίπεδο δικτύου στο μοντέλο OSI). Η οριζόντια χαρτογράφηση αναφέρεται στον προσδιορισμό των παραμέτρων μεταξύ δυο τεχνολογιών του ίδιου επιπέδου αλλά διαφορετικών πρωτοκόλλων (για παράδειγμα το πρωτόκολλο IEEE 802.11e και το IEEE P1901).



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα κάθετης και οριζόντιας χαρτογράφησης

Η οριζόντια χαρτογράφηση QoS μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ενός ειδικευμένου αλγορίθμου μεταξύ κάθε ζεύγους τεχνολογιών επιπέδου ζεύξης δεδομένων. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η βελτιωμένη ακρίβεια που παρέχει, παρόλο που απαιτούνται  $N \times N$  χαρτογραφήσεις ( $N$  ο αριθμός των διαφορετικών τεχνολογιών). Η μέθοδος αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί και με χαρτογράφηση της QoS στο επίπεδο δικτύου, η οποία είναι λιγότερο ακριβής, αλλά απαιτεί μόνο μια αντιστοίχιση στο επίπεδο δικτύου για κάθε τεχνολογία επιπέδου ζεύξης δεδομένων. Καίτοι η χαρτογράφηση στο επίπεδο δικτύου απλοποιεί τους αλγορίθμους και, επομένως, φαίνεται κατάλληλη επιλογή για μια συσκευή διαχείρισης QoS, απαιτείται ο ορισμός συγκεκριμένων χαρτογραφήσεων με μεγάλη ακρίβεια μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών λόγω της έντονης χρήσης τους.

Οι συσκευές που έχουν το ρόλο του μεσίτη QoS στο ευφυές δίκτυο γνωρίζουν τις ανάγκες των διαφορετικών ροών πληροφορίας στο δίκτυο σχετικά με την

προτεραιότητα, το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση. Οι παράμετροι που ορίζονται για κάθε είδος τεχνολογίας που λειτουργεί σε κάθε τμήμα του δικτύου επηρεάζουν τη συνολική καθυστέρηση στο τμήμα αυτό και κατά συνέπεια επηρεάζουν την ισορροπία μεταξύ της αποτελεσματικής χρήσης του εύρους ζώνης και της μείωσης της καθυστέρησης. Μετά το συσχετισμό των παραμέτρων με τις απαιτήσεις κάθε τεχνολογίας, πρέπει να πραγματοποιηθεί αντίστοιχος υπολογισμός των παραμέτρων ώστε να πληρούν τις συμφωνίες στα διαφορετικά επίπεδα υπηρεσιών (Service Level Agreements). Το ελάχιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης προκύπτει από το άθροισμα των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης των επιμέρους δικτύων κατά μήκος της διαδρομής της πληροφορίας από άκρο σε άκρο, αν αυτά ικανοποιούν τις ελάχιστες απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης και η μέγιστη αθροιστική καθυστέρηση όλης της διαδρομής είναι το άθροισμα των καθυστερήσεων των διαφορετικών τμημάτων στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων.

### 3.3.1 Απαιτήσεις της αρχιτεκτονικής ελέγχου QoS

Μια προσέγγιση της αρχιτεκτονικής QoS πρέπει να παρέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

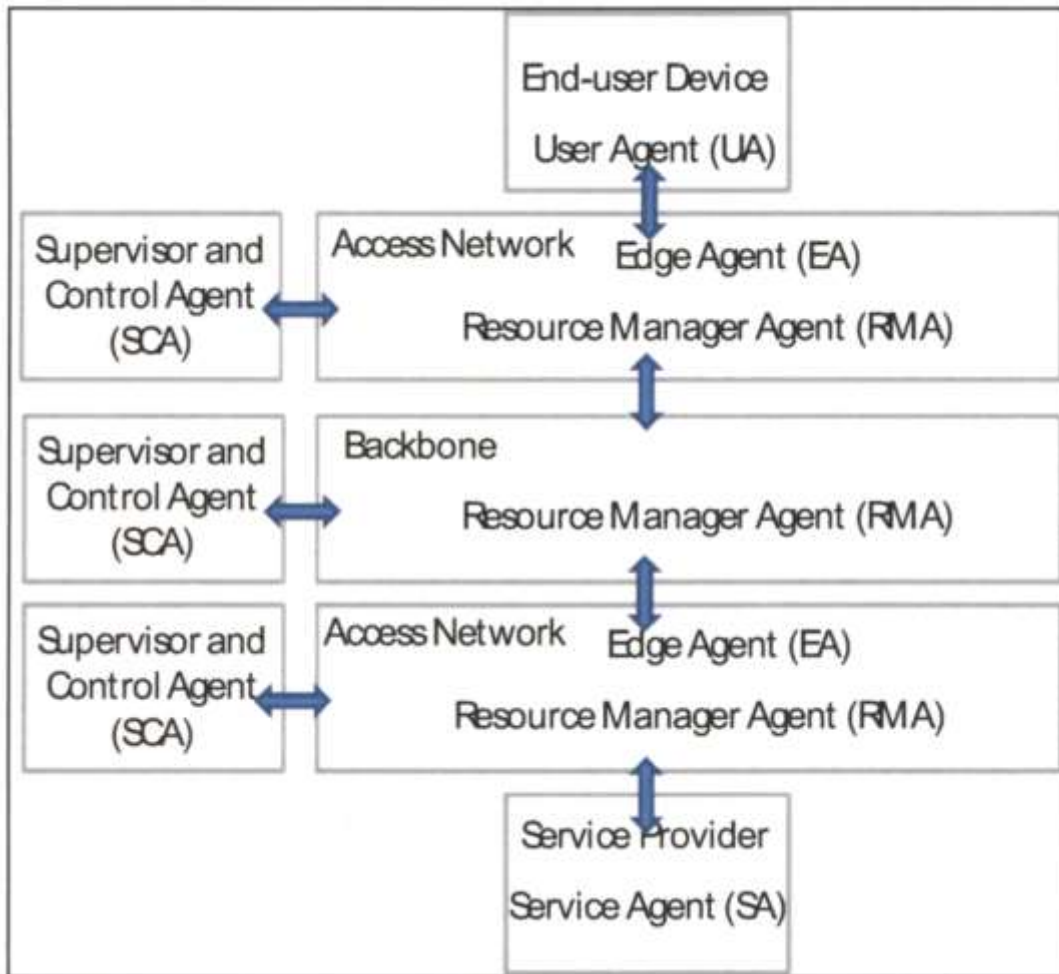
- Επίγνωση του αναγκαίου QoS : Παρακολούθηση και διαχείριση των στοιχείων της υπηρεσίας με βάση της συμφωνίες σε επίπεδο υπηρεσίας (SLA)
- Επίγνωση της θέσης : Δυνατότητα αποφάσεων πραγματικού χρόνου, βασισμένων στην τοπολογία του δικτύου και τους διαθέσιμους πόρους
- Προσαρμογή σε συγκεκριμένα τμήματα : Συσχέτιση των υπηρεσιών διανομής με τις δυναμικές αλλαγές του περιβάλλοντος
- Προσαρμογή στις παραμέτρους του δικτύου : Μετάφραση των απαιτήσεων του χρήστη σε παραμέτρους QoS κάθε δικτυακής τεχνολογίας
- Διαφάνεια : Οι εφαρμογές δεν πρέπει να εξετάζουν τη διαδικασία διαχείρισης και ελέγχου της QoS
- Ενσωμάτωση (Integration) : Η QoS είναι μια προδιαγραφή που αφορά εφαρμογές οι οποίες υποστηρίζονται από διαφορετικές συσκευές και μονάδες στο δίκτυο (οι οποίες εξυπηρετούν διαφορετικά πρωτόκολλα), άρα πρέπει να είναι ρυθμίσιμη, προβλέψιμη και διατηρήσιμη πάνω από όλα τα επίπεδα των πρωτοκόλλων
- Διαχωρισμός (Separation) : Οι υπηρεσίες δημιουργούνται για διαφορετικούς σχετικούς παραλήπτες, οι οποίοι μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα επικοινωνιακών υποδομών
- Προγραμματισμός : Οι κόμβοι (agents) πρέπει να διαχειρίζονται το πρόγραμμα της ροής δεδομένων του δικτύου

- Διαμόρφωση : Οι κόμβοι πρέπει να διαθέτουν τεχνικές βασισμένες στις συμφωνίες QoS για τη ρύθμιση των ροών δεδομένων
- Αστυνόμευση : Οι κόμβοι πρέπει να εξακριβώνουν εάν οι εγγυήσεις QoS γίνονται σεβαστές

### 3.3.2 Λειτουργίες των κόμβων (agents) της αρχιτεκτονικής QoS

Οι διαχειριστές του δικτύου και των υπηρεσιών πρέπει να διαθέτουν μια σειρά από αντίστοιχες πολιτικές που πρέπει να εφαρμόζονται για τον καθορισμό των συμφωνιών QoS στις περιοχές που διαχειρίζονται. Ο εξοπλισμός των χρηστών πρέπει να διαπραγματευτεί την QoS για κάθε σύνδεση που απαιτούν οι υπηρεσίες που χρησιμοποιεί, διαπραγμάτευση η οποία θα πραγματοποιηθεί στη συσκευή του χρήστη κατά την εκκίνηση κάθε νέας υπηρεσίας. Για το λόγο αυτό, κάθε συσκευή-κόμβος του δικτύου πρέπει να είναι διαθέσιμη για την απόφαση της αποδοχής μιας νέας σύνδεσης με βάση τις υπάρχουσες απαιτήσεις QoS. Οι κόμβοι αυτοί κατηγοριοποιούνται ως εξής :

- Κόμβος χρήστη (User Agent) : Υπεύθυνος για τη διαπραγμάτευση και επαλήθευση των απαιτήσεων QoS σε κάθε ροή δεδομένων
- Ακραίος κόμβος (Edge Agent) : Υπεύθυνος για τη διαπραγμάτευση των παραμέτρων QoS μεταξύ του κόμβου χρήστη και του κόμβου διαχείρισης πόρων
- Κόμβος αστυνόμευσης (Policy Agent) : Υπεύθυνος για την ενημέρωση και διαπίστωση της τήρησης των πολιτικών QoS από τους υπόλοιπους κόμβους
- Κόμβος διαχείρισης πόρων (Resource Management Agent) : Υπεύθυνος για τον καθορισμό διαθέσιμων πόρων στις υπηρεσίες κατά τη χρονική διάρκεια λειτουργίας τους και τη διαπραγμάτευση της αποστολής ή όχι πληροφορίας από κάποια συσκευή
- Κόμβος υπηρεσιών (Service Agent) : Υπεύθυνος για τη διαπραγμάτευση των παραμέτρων QoS κάθε υπηρεσίας και εφαρμογής
- Κόμβος εποπτείας και ελέγχου (Supervisor and Control Agent) : Υπεύθυνος για την παρακολούθηση και επίλυση προβλημάτων μεταξύ των υπόλοιπων κόμβων



Σχήμα 3.2: Ιεραρχία Κόμβων

Η επικοινωνία των κόμβων για τον καθορισμό του QoS εκκινεί από τον κόμβο χρήστη, ο οποίος διαπραγματεύεται με όλους τους διαθέσιμους ακραίους κόμβους για τη χρήση μιας υπηρεσίας. Οι ακραίοι κόμβοι γνωρίζοντας τις πιθανές διαδρομές και την πιθανότητα αυτών να υποστηρίξουν το φορτίο της συγκεκριμένης υπηρεσίας μπορούν να δεσμεύσουν πόρους του δικτύου χωρίς να συμβουλευτούν κάποιο κεντρικό σύστημα. Η αίτηση εκκινεί από τον κόμβο του χρήστη και τερματίζει στον κόμβο υπηρεσιών. Ο κόμβος διαχείρισης πόρων διαχειρίζεται τους διαθέσιμους πόρους, αλληλεπιδρά με το υπόλοιπο δίκτυο και ρυθμίζει τους μηχανισμούς QoS ώστε να υποδεχτεί τη νέα ροή πληροφορίας. Η δυνατότητα του κόμβου αυτού να μην χρειάζεται να βρίσκεται φυσικά σε κάποιο σημείο του δικτύου είναι πολύ σημαντική, καθώς, αν ο εξοπλισμός του δικτύου δεν είναι ικανός να υποστηρίξει έναν τέτοιο κόμβο, πρέπει να λειτουργήσει εικονικά και με τέτοιο τρόπο να αποστέλλει τις ρυθμιστικές εντολές στον εξοπλισμό του δικτύου.

Ο διαχειριστής του δικτύου έχει τις δικές του πολιτικές QoS μέσα στο δίκτυο δικαιοδοσίας του. Όλοι οι κόμβοι πρέπει να ακολουθούν και να συμμορφώνονται

με αυτές τις πολιτικές, για τις οποίες ενημερώνονται από τον κόμβο αστυνόμευσης και οι οποίες μπορούν να δράσουν ως κατώφλια. Για παράδειγμα, στις περιπτώσεις όπου κάποιος χρήστης απαιτήσει τη δέσμευση πόρων του δικτύου πέραν του επιτρεπομένου ορίου του διαχειριστή, η αίτηση δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή από κανένα κόμβο.

Ο κόμβος υπηρεσιών είναι παρόμοιος με τον κόμβο χρήστη, αλλά ελέγχει τις συμφωνίες σε επίπεδο υπηρεσίας των εφαρμογών του παρόχου. Είναι υπεύθυνος για την επαλήθευση της συμφωνίας QoS από την πλευρά του παρόχου και την επαναδιαπραγμάτευσή της σε περίπτωση υποβάθμισης ή αποτυχίας της σύνδεσης.



## 4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΔΜΑ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

### 4.1 Ανάλυση των απαιτήσεων

Με βάση τις αναλύσεις των προηγούμενων κεφαλαίων, παρατηρείται ότι μια σημαντική πρόκληση για τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού είναι η παροχή αξιόπιστων και αποδοτικών υπηρεσιών στο ευφυές δίκτυο με κατάλληλη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) για τον έλεγχο και τη διαχείριση πληθώρας συσκευών που βρίσκονται διασκορπισμένες σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικών προγραμμάτων μετάδοσης. Η ροή δεδομένων που δημιουργείται σε ένα ευφυές δίκτυο είναι ένα σύνολο δεδομένων που παράγεται από ποικίλες συσκευές, μετρητές και αισθητήρες που είναι διεσπαρμένοι σε όλο το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με τη σημασία και τις προτεραιότητες που έχουν τεθεί για τα δεδομένα που διακινούνται μέσω του ευφυούς δικτύου και τις σχετικές απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης, είναι αναγκαίος ο ορισμός μιας ποικιλίας κλάσεων υπηρεσιών με αντίστοιχα ορισμένους περιορισμούς QoS. Κάθε κόμβος του δικτύου μπορεί να υποστηρίζει διαφορετικές υπηρεσίες ταυτόχρονα, με διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και διαφορετικές προτεραιότητες, από κόμβους μετρητές, οι οποίοι αποστέλλουν περιοδικά μικρή ποσότητα δεδομένων, μέχρι κόμβους παρακολούθησης οι οποίοι αποστέλλουν δεδομένα πολυμέσων πραγματικού χρόνου και έχουν ανάγκη πολλαπλάσιου εύρους ζώνης. Η κατηγοριοποίηση των απαιτήσεων των πολλαπλών υπηρεσιών που θα υποστηρίξει το ευφυές δίκτυο εξαρτάται άμεσα από το είδος των εφαρμογών οι οποίες μπορεί να είναι ίδιου τύπου αλλά να απαιτούν διαφορετικό ρυθμό μετάδοσης για την εξυπηρέτηση της επικοινωνίας, να είναι υπηρεσίες διαφορετικού τύπου (π.χ. υπηρεσίες δεδομένων, φωνής, βίντεο) οι οποίες έχουν διαφορετική ανέχεια σε καθυστέρηση ή σε σφάλματα στην παράδοση πακέτων. Ο συνδυασμός ετερογενών υπηρεσιών στο ευφυές δίκτυο οδηγεί στην ανάγκη συσχετισμού τους με συγκεκριμένους περιορισμούς QoS ώστε να ενσωματωθούν στο δίκτυο και να μην επηρεάσουν την αξιόπιστη λειτουργία τους.

Ανάλογα με την εφαρμογή, οι ροές δεδομένων είναι δυνατόν να συναθροίζονται σε μια ροή δεδομένων (aggregation) ή όχι. Στην παρούσα υλοποίηση εξετάζονται τόσο πλήρως συναθροισμένες (fully aggregated) όσο και μη συναθροισμένες (non aggregated) ροές δεδομένων, οι οποίες παράγονται από ένα ευφυές δίκτυο εγκατεστημένο σε αγροτικές ή αστικές περιοχές.

Λαμβάνοντας υπόψη τη δενδρική δομή των περισσότερων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, το ευφυές δίκτυο μπορεί να αντιμετωπιστεί ως δενδρικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Με αυτήν την προσέγγιση, η κίνηση δεδομένων που παράγεται από τις υπηρεσίες σε ένα Smart Grid συλλέγεται από τους κόμβους του δικτύου και προωθείται στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink) κάθε κόμβου με προορισμό την πύλη δικτύου (gateway), δηλαδή τη ρίζα του δένδρου (tree root). Αυτό το είδος κίνησης δεδομένων ονομάζεται convergecast στη βιβλιογραφία [2] και αναφέρεται κυρίως σε δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες και μεταδίδονται σε μια κοινή πύλη δικτύου.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος TDMA λαμβάνει υπόψη του την τοπολογία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και τα εγγενή χαρακτηριστικά του που επηρεάζουν τη μετάδοση πληροφορίας, συνδυάζοντάς τα με την ανάγκη να δίνεται προτεραιότητα στα δεδομένα με βάση τη σημασία τους, την ικανοποίηση των απαιτήσεων τους σε καθυστέρηση και επιτυχία των μεταδόσεων ή τις ανάγκες τους σε εύρος ζώνης.

Οι περιοριστικοί παράγοντες που αλλοιώνουν τη μετάδοση δεδομένων μέσω του ευφυούς δικτύου, μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες :

#### 1. Η τοπολογία και η φύση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

Καίτοι η PLC τεχνολογία μπορεί θεωρητικά να υποστηρίξει ευρυζωνικές επικοινωνίες σε πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ο ρυθμός μετάδοσης που καταγράφεται σε πραγματικά δίκτυα Smart Grid παρουσιάζει σοβαρές διακυμάνσεις. Όταν οι γραμμές μεταφοράς θεωρηθούν ως μέσο μετάδοσης, επηρεάζονται από ένα πλήθος δυσμενών παραγόντων όπως σοβαρή εξασθένηση, επιδείνωση από διάφορους τύπους θορύβου και επιλεκτικότητα ως προς τη συχνότητα λόγω διάδοσης πολλαπλών οδεύσεων (multipath propagation). Η μεταβλητή ποιότητα των PLC συνδέσεων, η πολύπλοκη τοπολογία και το μεγάλο πλήθος μετασηματιστών και άλλου εξοπλισμού που συναντάται στο δίκτυο, εμποδίζουν τις επικοινωνίες υπό δεδομένο QoS και καθιστούν απαραίτητη τη δημιουργία μιας ευέλικτης τηλεπικοινωνιακής πλατφόρμας για την κατάλληλη διαχείριση των προβλημάτων που εμφανίζονται.

#### 2. Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή που σχετίζεται με την τεχνολογία PLC

Εκτός από την επίδραση διαφόρων ασυρμάτων μεταδόσεων που αυξάνουν τα επίπεδα θορύβου τοπικά, η μετάδοση PLC προκαλεί ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI – electromagnetic interference) σε ασύρματους χρήστες που χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων 1-100 MHz. Για τη συμμόρφωση με τους σχετικούς κανονισμούς, πρέπει να επιβληθεί κατάλληλη διαμόρφωση ή συγκάλυψη της εγγεόμενης ισχύος.

Βασιζόμενο στην εργασία [1], ο προτεινόμενος αλγόριθμος TDMA χρησιμοποιεί προσαρμοστικό έλεγχο ισχύος ώστε να καταστεί δυνατό οι κόμβοι του δικτύου να ανακαλύψουν τους γείτονές τους, δηλαδή κόμβους που βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψής τους, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που επιβάλλονται είτε από εξωτερικούς παράγοντες λόγω κανονισμών EMI είτε λόγω περιορισμών εντός του δικτύου, δηλαδή αμοιβαία παρεμβολή μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Η δενδρική δομή που προκύπτει για το ευφυές δίκτυο, που βασίζεται στην τοπολογία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και της ποιότητας του μέσου μετάδοσης, μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τη δομή του ίδιου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αφού καθοριστεί η κατάλληλη δενδρική τοπολογία, οι χρονοσχισμές (timeslots) κατανέμονται βέλτιστα στους κόμβους του ευφυούς δικτύου.

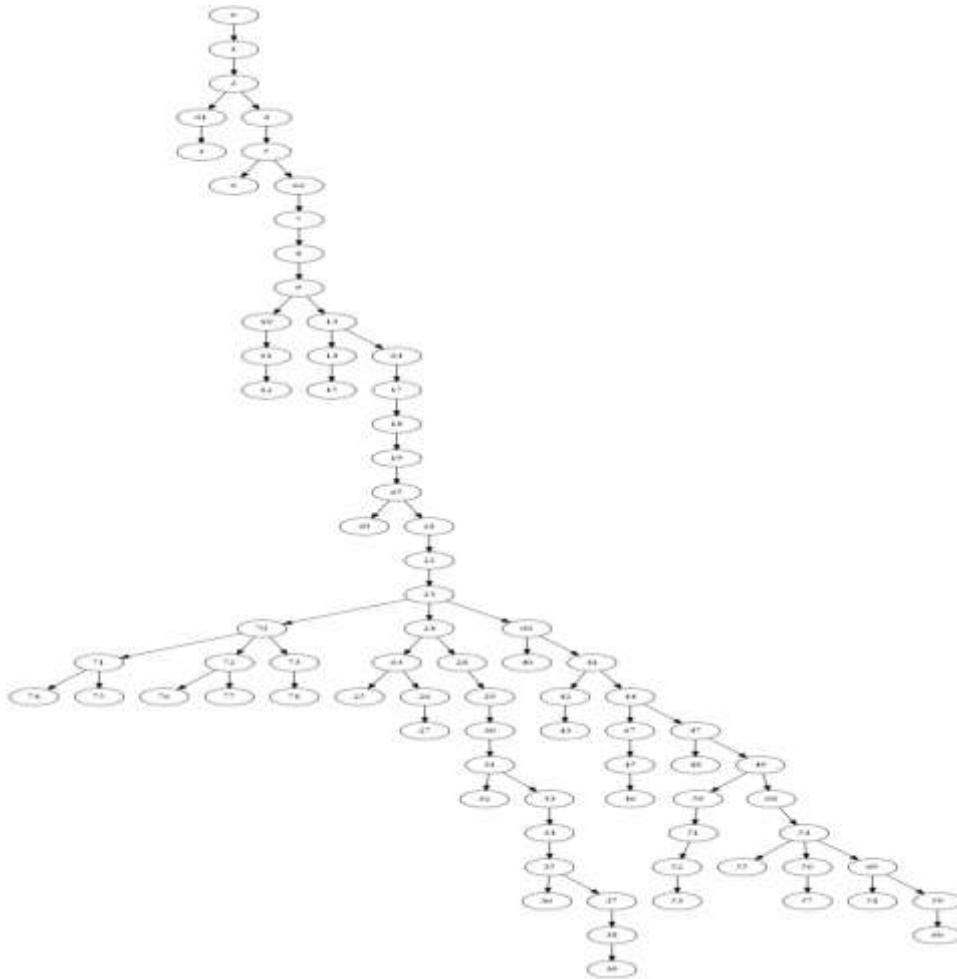
Το ευφυές δίκτυο που δημιουργείται μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά σε όλα τα είδη απαιτήσεων από τις υπηρεσίες και να προσφέρει συνδεσιμότητα σε όλους τους κόμβους χωρίς τη χρήση άλλων μεθόδων μετάδοσης. Η δυναμική του φύση προσφέρει προσαρμογή σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, καθώς ελαχιστοποιεί το εύρος παρεμβολών των κόμβων και κατά συνέπεια μεγιστοποιεί τις ταυτόχρονες μεταδόσεις από διαφορετικούς κόμβους. Η εφαρμογή του στο δίκτυο προσφέρει δραστικά αυξημένο ρυθμό διέλευσης (throughput), μειώνει την καταναλισκόμενη ενέργεια από τους κόμβους και όταν χρησιμοποιηθεί μέθοδος συνάθροισης (aggregation) μειώνεται σημαντικά η καθυστέρηση στη μετάδοση.

#### 4.1.1 Σχηματισμός τοπολογιών σε ένα ευφυές δίκτυο

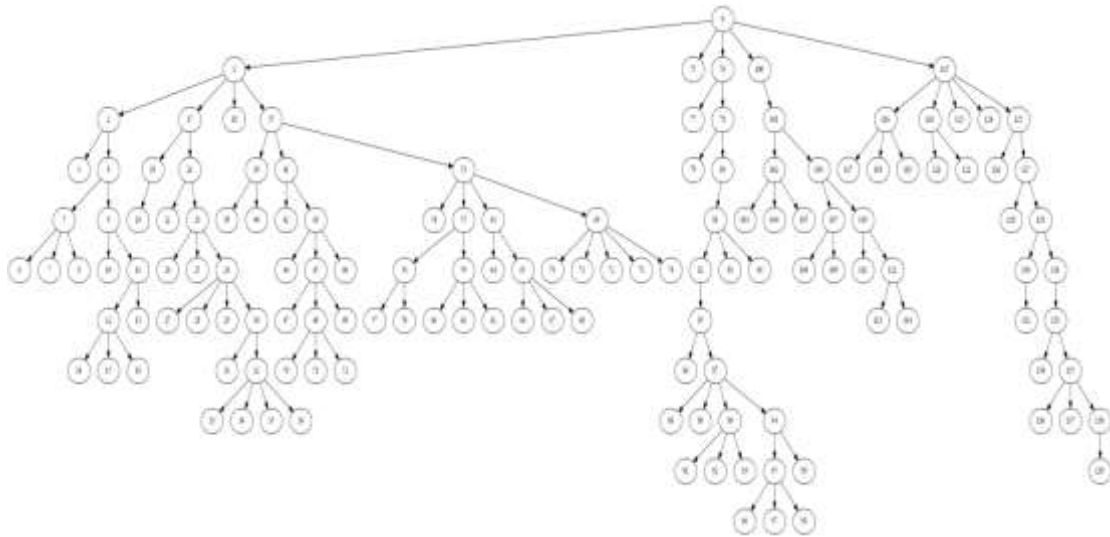
Η δομή του δικτύου πρόσβασης σε ένα Smart Grid σχηματίζει ένα δένδρο το οποίο περιγράφεται από τη συνάρτηση  $T=(V,E)$ , όπου το  $V$  υποδηλώνει το σύνολο των κόμβων του δικτύου (για παράδειγμα όλες τις μονάδες BPL ανεξαρτήτως τύπου) και το  $E$  υποδηλώνει το σύνολο των ακμών του δένδρου. Η ρίζα του δένδρου λαμβάνει το ρόλο του επικεφαλής κόμβου, δηλαδή του κόμβου στον οποίο προωθούνται όλα τα πακέτα. Κάθε υποδένδρο το οποίο έχει ως επικεφαλής κόμβο κάποιο παιδί της ρίζας του δένδρου ονομάζεται υποδένδρο κορυφής (top subtree). Ως ακμή μεταξύ δύο κόμβων ορίζεται η PLC ζεύξη μεταξύ τους. Σε κάθε ακμή αντιστοιχίζεται μια τιμή (κόστος της ζεύξης) που ισούται με την κανονικοποιημένη τιμή της εξασθένησης μεταξύ των δύο ακρών της ως προς μια υποθετική ζεύξη (αντίστοιχη με ζεύξη Line of Sight σε ασύρματες επικοινωνίες). Η τιμή αυτή είναι ένα μέγεθος που λαμβάνει υπόψη την ποιότητα της PLC ζεύξης και υποδεικνύει την ελάχιστη έκχυση ισχύος που απαιτείται για την επιτυχή μετάδοση των μηνυμάτων. Το μέγεθος αυτό λαμβάνει υπόψη την εξασθένηση λόγω της ηλεκτρικής απόστασης και οποιουσδήποτε άλλους δυσμενείς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα μιας PLC ζεύξης.

Η δομή των δένδρων του ευφυούς δικτύου επηρεάζεται καθοριστικά από την έκχυση ισχύος και την ποιότητα των συνδέσεων PLC. Στα δίκτυα πρόσβασης, διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες δένδρων :

- Τα δένδρα λεπτής διαστρωμάτωσης ή αραιά, τα οποία είναι επιμήκη και διεισδυτικά (Σχ. 4.1)
- Τα δένδρα πυκνής διαστρωμάτωσης ή πυκνά, τα οποία είναι ρηχά και πλατιά (Σχ. 4.2)



Σχήμα 4.1 : Αραιό δένδρο



Σχήμα 4.2: Πυκνό δένδρο

Με βάση τα Σχ. 4.1 και Σχ. 4.2 παρατηρείται ότι σε ακραίες περιπτώσεις τα αραιά δένδρα μπορούν να θεωρηθούν ως σειριακοί δίαυλοι, ενώ τα πυκνά δένδρα θεωρούνται ως αυτόνομες γειτονιές μιας μετάβασης (1 – hop neighborhood). Τα αραιά δένδρα συναντώνται ως επί το πλείστον σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αγροτικών περιοχών ενώ τα πυκνά δένδρα σε δίκτυα αστικών περιοχών.

#### 4.1.2 Ανάλυση συστήματος ελέγχου ισχύος

Με βάση το [1], η εγχεόμενη φασματική πυκνότητα ισχύος (IPSD – injected power spectral density) ενός κόμβου  $i$ , εάν ποσοτικοποιηθεί είναι :

$$IPSD_i(k) = k * P_{min} \leq P_{TH}, k = 1, 2, \dots, K \quad (4.1)$$

Όπου το  $P_{min}$  αντιπροσωπεύει την ελάχιστη φασματική πυκνότητα ισχύος που απαιτείται για μια επιτυχή μετάδοση ενός μηνύματος και το  $P_{TH}$  είναι η μέγιστη φασματική πυκνότητα ισχύος που επιτρέπεται από τοπικούς κανονισμούς EMI.

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου που αφορούν την κανονικοποιημένη εξασθένιση των διαφόρων PLC συνδέσεων η επιλογή του  $P_{min}$  επηρεάζει δραστικά τον αριθμό των παρεμβαλλόμενων συνδέσεων στο δίκτυο. Μια υψηλή τιμή αυξάνει τον αριθμό των παρεμβαλλόμενων συνδέσεων ανά κόμβο, όμως παρ'όλο που οι χαμηλές τιμές ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές, καθιστούν το δίκτυο πιο ευαίσθητο σε τοπικές ή χρονικές μεταβολές των συνθηκών μετάδοσης του καναλιού. Δεδομένου ότι η σταθερότητα είναι υψίστης σημασίας στα Smart Grid δίκτυα, ο καθορισμός του κατάλληλου επιπέδου του  $P_{min}$  πρέπει να βασίζεται στη βέλτιστη

διαχείριση της αντιστάθμισης (trade-off) μεταξύ σταθερότητας και αποτελεσματικότητας.

Ένας κόμβος επικοινωνεί με τον κόμβο πατέρα (parent node) χρησιμοποιώντας την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ που καθορίζεται από την κανονικοποιημένη εξασθένιση της αντίστοιχης σύνδεσης. Για παράδειγμα ένας κόμβος που έχει κανονικοποιημένη εξασθένιση από τον πατέρα του ίση με 1, θα εκπέμψει με  $P_{min}$ , ενώ αντίστοιχα ο κόμβος με εξασθένιση 5 θα εκπέμψει με  $5 * P_{min}$ .

Από τα παραπάνω προκύπτουν οι εξής ορισμοί :

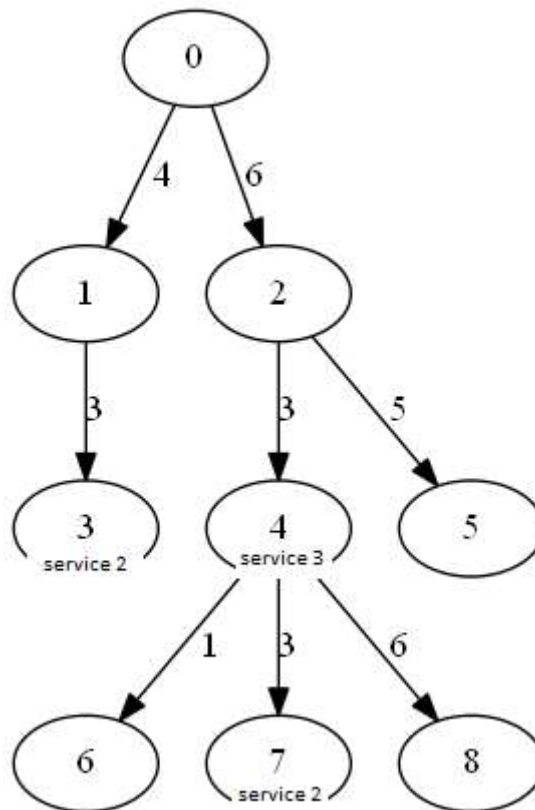
- Ένα k-μήνυμα, στέλνεται από έναν κόμβο με  $IPSD_i(k)$
- Ένας κόμβος  $n_m$  είναι k-γείτονας ενός κόμβου  $n_i$  εάν μπορεί να εκπέμψει επιτυχώς ένα k-μήνυμα στον κόμβο  $n_i$ . Στην περίπτωση αυτή ο  $n_i$  είναι k-πατέρας του  $n_m$
- Η k-γειτονιά του κόμβου  $n_i$  είναι το σύνολο όλων των k-γειτόνων του
- Ο επικεφαλής κόμβος (HE) είναι ο κόμβος από ή προς τον οποίο εγχέεται το σήμα από τον PLC δίαυλο και είναι η ρίζα του δένδρου που σχηματίζεται στο Smart Grid δίκτυο

## 4.2 Περιγραφή αλγορίθμου TDMA

### 4.2.1 Εύρεση γειτονικών κόμβων - αρχές σχεδιασμού του TDMA schedule

Οι βασικές αρχές με τις οποίες πραγματοποιείται η εύρεση των γειτονικών κόμβων είναι :

- Κάθε κόμβος εντοπίζει και αναγνωρίζει τους κόμβους με τους οποίους έχει απόσταση μιας μετάβασης (1 hop) υπό διαφορετικές στάθμες ισχύος έκχυσης και είναι σε θέση να μεταβάλλει την ισχύ του σύμφωνα με την ποιότητα των συνδέσεων που προέρχονται από αυτόν προς το υπόλοιπο δίκτυο
- Κάθε κόμβος προσδιορίζει τόσο τον γονέα του (parent node) όσο και τους απογόνους του (descendants, children nodes), αποκτώντας δυνατότητες δρομολόγησης
- Η ρίζα του δένδρου (root node) είναι σε θέση να εξάγει το διάγραμμα επικοινωνιών του δένδρου υπό διάφορα επίπεδα εγχεόμενης ισχύος



Σχήμα 4.3 : Παράδειγμα μορφής δένδρου

Αφού λάβει όλες τις ειδοποιήσεις από τους υπόλοιπους κόμβους για τους γείτονές τους, ο root node εκκινεί την φάση του προγραμματισμού (schedule) TDMA. Το βέλτιστο TDMA schedule είναι αυτό το οποίο ελαχιστοποιεί σε όλο το δένδρο τη μέση καθυστέρηση, λαμβάνοντας υπόψη τον έλεγχο ισχύος και τα διαφορετικά επίπεδα service των κόμβων, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το πλήθος των ταυτόχρονων μεταδόσεων.

Το προτεινόμενο TDMA schedule για εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών βασίζεται στις ακόλουθες αρχές σχεδίασης :

- Οι γειτονικοί κόμβοι που έχουν απόσταση μιας μετάβασης (1 hop neighbors) όπως οι κόμβοι 1-3 ή 4-8 του Σχ. 4.3 πρέπει να χρησιμοποιούν διαφορετικές χρονοσχισμές (slots) στο πρόγραμμα TDMA. Οι γειτονικοί κόμβοι ανήκουν στα ίδια ανεξάρτητα τμήματα του δένδρου, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να μην επιτρέπονται οι ταυτόχρονες μεταδόσεις τους καθώς επηρεάζουν ο ένας τον άλλον
- Τα διάφορα επίπεδα υπηρεσίας (service) καθορίζονται με βάση το απαιτούμενο εύρος ζώνης και κανονικοποιούνται με βάση την υπηρεσία με την ελάχιστη απαίτηση σε εύρος ζώνης και, επομένως, την ελάχιστη απαίτηση σε χρονοσχισμές στο TDMA schedule. Η ελάχιστη υπηρεσία

απαιτεί μια χρονοσχισμή, οπότε αναλογικά αυξάνονται και οι απαιτήσεις των υπηρεσιών μεγαλύτερου εύρους ζώνης

- Οι υπηρεσίες με απαίτηση σε χρονοσχισμές μεγαλύτερη της μιας πρέπει να χρησιμοποιήσουν συνεχόμενες χρονοσχισμές στο schedule για την αποστολή των μηνυμάτων τους με ταυτόχρονη ικανοποίηση της πρώτης αρχής σχεδίασης (Σχ. 4.4)
- Η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων είναι απλής ή μονόδρομης κατεύθυνσης (half-duplex)
- Ένας κόμβος δεν μπορεί να λάβει περισσότερα του ενός μηνύματα ταυτόχρονα
- Όλοι οι κόμβοι αλληλεπιδρούν μόνο με τους άμεσα συνδεδεμένους σε αυτούς κόμβους γονείς ή παιδιά ή απογόνους



Σχήμα 4.4 : Προτεινόμενη αρχή σχεδίασης TDMA

Καίτοι που κατά τη διαδικασία εύρεσης των γειτονικών κόμβων διασφαλίζεται ότι δεν παρεμβάλλει ένας κόμβος προς κόμβους που βρίσκονται σε ανώτερα επίπεδα στο δένδρο από αυτόν, δεν διασφαλίζεται ότι ο κόμβος αυτός δεν παρεμβάλλει στους κόμβους που βρίσκονται σε κατώτερο ή το ίδιο επίπεδο με αυτόν στο δένδρο. Αυτό προκύπτει από τον έλεγχο ισχύος εκπομπής ενός κόμβου (ενότητα 4.1.2) που διασφαλίζεται η ελάχιστη ισχύς εκπομπής για επικοινωνία μόνο με τον κόμβο πατέρα του. Η ισχύς εκπομπής αυτή όμως, δεν εξασφαλίζει ότι ο κόμβος αυτός δεν θα παρεμβάλλει σε κάποιον απόγονό του. Άρα το TDMA schedule που θα προκύψει δεν μπορεί να είναι αποκλειστικά βασισμένο στους περιορισμούς γειννίας και συνάφειας (κόμβοι με ίδιο κόμβο πατέρα), καθώς προκύπτουν περιορισμοί λόγω παρεμβολών κάτι το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη στο χρονοπρογραμματισμό κόμβων που έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε χρονοσχισμές, άρα και καταλαμβάνουν πολλαπλές θέσεις στο πρόγραμμα TDMA.

Κατά τη διάρκεια του προγράμματος ο root node καθορίζει το μέγιστο πλήθος ανεξαρτήτων τμημάτων του δένδρου. Με βάση τα προηγούμενα δύο κόμβοι ανήκουν στο ίδιο ανεξάρτητο τμήμα (δηλαδή δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν ταυτόχρονα την ίδια χρονοσχισμή) αν είναι προσκείμενοι κόμβοι (δηλαδή κόμβοι που έχουν τον ίδιο πατέρα ή έχουν σχέση γονέα-παιδιού) ή αν



$$A_n(i, u) \leq \max_j = \{A_n(i, j)\} \quad (4.2)$$

όπου το  $n_j$  υποδηλώνει ένα παιδί του  $n_i$  και το  $A_n(i, u)$  υποδηλώνει τη συσσωρευμένη κανονικοποιημένη εξασθένηση των ενδιαμέσων συνδέσμων που βρίσκονται ανάμεσα στους δύο κόμβους. Αυτό σημαίνει πως αν η κανονικοποιημένη εξασθένηση μεταξύ ενός κόμβου  $i$  και του πατέρα του  $u$  είναι μικρότερη ή ίση από την από την κανονικοποιημένη εξασθένηση των συνδέσμων ανάμεσα στον κόμβο  $i$  και ένα παιδί του  $j$ , τότε οι κόμβοι  $i, j, u$  ανήκουν στο ίδιο ανεξάρτητο τμήμα του δένδρου και δεν είναι δυνατό να αποστείλουν πακέτα ταυτόχρονα.

Γίνεται κατανοητό ότι το πλήθος των ανεξάρτητων δένδρων μειώνεται όταν οι κόμβοι λειτουργούν σε υψηλά επίπεδα έκχυσης ισχύος καθώς η παρεμβολή μεταξύ των κόμβων αυξάνεται. Στην περίπτωση αυτή τα ανεξάρτητα δένδρα περιλαμβάνουν περισσότερους κόμβους και είναι περισσότερα. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, ο αριθμός των δυνατών ανεξάρτητων δένδρων μεγιστοποιείται καθώς οι κόμβοι επιτρέπεται να επικοινωνούν μόνο με τους άμεσα συνδεδεμένους γείτονές τους.

Ένα παράδειγμα της εφαρμογής των προηγούμενων αρχών σχεδίασης στη δενδρική τοπολογία του Σχ. 4.3 αναλύεται στη συνέχεια. Το δένδρο του Σχ. 4.3 αποτελείται από 9 κόμβους με κανονικοποιημένες εξασθενίσεις όπως αναγράφονται στις ακμές των κόμβων. Ο κόμβος 0 είναι ο επικεφαλής κόμβος στον οποίο καταλήγει κάθε μετάδοση πακέτων από τους υπόλοιπους κόμβους. Οι κόμβοι 1,2,5,6,8 έχουν τη βασική υπηρεσία, με απαίτηση μιας χρονοσχισμής ενώ οι κόμβοι 3,4,7 έχουν διαφορετικές υπηρεσίες με απαιτήσεις δύο και τριών χρονοσχισμών όπως αναφέρονται στο σχήμα. Με βάση τις αρχές σχεδίασης του προτεινόμενου αλγόριθμου TMDA συνεπάγεται ότι οι κόμβοι 3 και 5 μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα με τους 6, 7, 8 καθώς ανήκουν σε διαφορετικά ανεξάρτητα δένδρα. Οι κόμβοι 6, 7, 8 όμως ανήκουν στο ίδιο ανεξάρτητο δένδρο, καθώς οποιαδήποτε ταυτόχρονη μετάδοση προς τον πατέρα τους (κόμβος 4) θα οδηγήσει σε συγκρούσεις και αύξηση της καθυστέρησης. Απαιτείται επιπλέον έλεγχος στις μεταδόσεις των συγκεκριμένων κόμβων, διότι ο κόμβος 7 απαιτεί δύο χρονοσχισμές για τη λειτουργία της υπηρεσίας που υποστηρίζει, άρα υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα σύγκρουσης με τους κόμβους 6 και 8 στο πρόγραμμα.

## 4.2.2 Λειτουργία μη συναθροισμένων δεδομένων (Non aggregated traffic)

Κατά τη λειτουργία μη συναθροισμένης κίνησης δεδομένων, κάθε μήνυμα, για παράδειγμα η μέτρηση κάποιου αισθητήρα, είναι εξίσου σημαντικό. Τότε η συνάθροιση δεδομένων μπορεί να μην είναι επιθυμητή ή δυνατή. Για το λόγο αυτό, κάθε ένα από τα πακέτα που δημιουργούνται πρέπει να προωθηθεί σε κόμβο ανώτερου επιπέδου έως ότου συναντήσει τον root node. Κάθε μετάβαση προς τον root node πρέπει να καταλαμβάνει συνεχόμενες χρονοσχισμές στο TDMA schedule. Ο στόχος του προγραμματισμού είναι η ελαχιστοποίηση του χρονικού μήκους του TDMA schedule, το οποίο είναι ένα πρόβλημα NP – complete ακόμα και με τη χρήση του μοντέλου πρωτοκόλλων παρεμβολών (Protocol interference model) που προκύπτει από το Partition Problem [14].

### 4.2.2.1 Εκχώρηση χρονοσχισμών

Στον αλγόριθμο που ακολουθεί περιγράφεται υπό μορφή ψευδοκώδικα η διαδικασία εκχώρησης χρονοσχισμών που εκτελείται από κάθε κόμβο για κάθε χρονοσχισμή. Η βασική ιδέα της μεθόδου αυτής είναι ο προγραμματισμός ταυτόχρονων μεταδόσεων παράλληλα για πολλαπλά υποδένδρα του δικτύου και η συνεχής απασχόληση του root node ώστε να αποδέχεται πακέτα για όσο περισσότερες χρονοσχισμές είναι δυνατό χωρίς να αδρανεί.

Καθώς ο root node μπορεί να λάβει κάθε φορά πακέτο μόνο από ένα παιδί του πρέπει να γίνεται επιλογή από πιο υποδένδρο θα λάβει πακέτο. Ο root node είναι ενήμερος για το πλήθος των κόμβων κάθε υποδένδρου που σχηματίζουν τα παιδιά του, ενώ κάθε κόμβος διατηρεί έναν buffer και γνωρίζει την κατάστασή του η οποία μπορεί να είναι γεμάτη (full) ή άδεια (empty) ανάλογα με το αν περιέχει πακέτα ή όχι. Καθώς οι κόμβοι υποστηρίζουν πολλαπλές υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις σε χρονοσχισμές οι buffer αρχικοποιούνται ως γεμάτοι (καθώς θεωρείται πως υπάρχει επικοινωνία για τον έλεγχο της ορθότητας του χρονοπρογραμματισμού TDMA) και αποθηκεύουν πακέτα αντίστοιχα με τις απαιτήσεις τους.

Αλγόριθμος 1. Εκχώρηση χρονοσχισμών χωρίς συνάθροιση (non aggregated timeslot assignment)

1 For each node in the tree

```

2 node.buffer=full //Περιέχει τον αριθμό των απαιτούμενων πακέτων από την
υπηρεσία

3 if (node = root) then

4     Από τα διαθέσιμα υποδένδρα που σχηματίζουν τα παιδιά του, γίνεται
επιλογή αυτού με το μεγαλύτερο συνολικό αριθμό υπολειπόμενων πακέτων
για αποστολή από όλους τους κόμβους, έστω το παιδί MaxChild
5     Γίνεται έλεγχος των περιορισμών που προκύπτουν από τις παρεμβολές μεταξύ
των κόμβων, τις σχέσεις γονέων παιδιών που προκύπτουν και της ύπαρξης ή
μη των κόμβων αυτών στο τρέχον slot
6     Εάν οι περιορισμοί αυτοί δεν ικανοποιούνται, η διαδικασία διακόπτεται
και επαναλαμβάνεται από την αρχή σε επόμενο κόμβο ή εάν δεν βρεθεί, σε
επόμενο slot

7     if ( Περιορισμοί = true) then

8         Προγραμματισμός του MaxChild στο τρέχον slot
9         MaxChild.Buffer -- // Αφαίρεση ενός πακέτου από τον buffer του

10        While (Buffer.Empty =false)

11            Slot++
12            Προγραμματισμός του MaxChild στο τρέχον slot
13            MaxChild.Buffer -- // Αφαίρεση ενός πακέτου από τον buffer
endif

14 else

15     if (node.buffer = empty) then

16         Επιλογή ενός τυχαίου παιδιού του οποίου ο buffer είναι γεμάτος
17         Γίνεται έλεγχος των περιορισμών που προκύπτουν από τις παρεμβολές
μεταξύ των κόμβων, τις σχέσεις γονέων παιδιών που προκύπτουν και
της ύπαρξης ή μη των κόμβων αυτών στο τρέχον slot
18         Εάν οι περιορισμοί αυτοί δεν ικανοποιούνται, η διαδικασία
διακόπτεται και επαναλαμβάνεται για διαφορετικό παιδί του οποίου
ο buffer είναι γεμάτος ή για επόμενο slot

19         if ( Περιορισμοί = true) then

20             Προγραμματισμός του node.child στο τρέχον slot
21             Node.child.Buffer -- // Αφαίρεση ενός πακέτου από τον
buffer του παιδιού
22             Node.Buffer ++ //Αύξηση ενός πακέτου στον buffer του
πατέρα

23             While (Buffer.Empty =false)

24                 Slot++
25                 Προγραμματισμός του MaxChild στο τρέχον slot

26                 Node.child.Buffer -- // Αφαίρεση ενός πακέτου
από τον buffer του παιδιού
27                 Node.Buffer ++ //Αύξηση ενός πακέτου στον
buffer του πατέρα

28         endif
29     endif
30 endif

```

Οι γραμμές από 2-13 του ανωτέρω αλγορίθμου δίνουν τους κανόνες για το scheduling μεταξύ του root κόμβου και των παιδιών του. Εάν τα παιδιά του root node έχουν τουλάχιστον ένα πακέτο προς μετάδοση, επιλέγεται για προγραμματισμό το παιδί του οποίου το υποδένδρο έχει για δοθείσα χρονοσχισμή το μεγαλύτερο αριθμό υπολειπόμενων πακέτων για αποστολή. Εάν κανένα από τα παιδιά δεν μπορούν να επιλεγούν, ο root node δεν λαμβάνει κανένα πακέτο στη συγκεκριμένη χρονοσχισμή. Αφού γίνει η επιλογή του παιδιού, λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί του συγκεκριμένου κόμβου σε σχέση με τις παρεμβολές του από άλλους κόμβους ή άμεσους γείτονες και στην περίπτωση που η χρονοσχισμή δεν περιλαμβάνει ήδη κάποιον από αυτούς τους κόμβους, ο κόμβος αυτός προστίθεται στο TDMA schedule. Στη συνέχεια, εάν ο κόμβος αυτός απαιτεί υπηρεσία με ζήτηση άνω της μιας χρονοσχισμής, προστίθεται στις επόμενες χρονοσχισμές του TDMA schedule και ο buffer του αδειάζει, έως ότου βρεθεί στην κατάσταση empty.

Ο κόμβοι που δεν γειτνιάζουν άμεσα με τον root node προγραμματίζονται στις γραμμές 14-30 του αλγορίθμου. Ένα υποδένδρο ορίζεται ως ενεργό εάν υπάρχουν υπολειπόμενα πακέτα σε αυτό για μετρίβηση. Στην περίπτωση ενεργού υποδένδρου, επιλέγεται τυχαία ένα παιδί για προγραμματισμό με την προϋπόθεση να μην είναι άδειος ο buffer του και να ικανοποιούνται τόσο οι περιορισμοί παρεμβολών και γειτνίασης, όσο και την μη ύπαρξη των κόμβων αυτών στη συγκεκριμένη χρονοσχισμή. Εάν ο κόμβος απαιτεί υπηρεσία με ζήτηση άνω της μιας χρονοσχισμής προστίθεται στις επόμενες χρονοσχισμές του TDMA schedule, ο buffer του αδειάζει έως ότου βρεθεί στην κατάσταση empty και ταυτόχρονα γεμίζει αντίστοιχα ο buffer του πατέρα του.

Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι θα υπάρχει πάντα ένα παιδί του οποίου ο buffer δεν θα είναι άδειος και κάθε κόμβος όταν αδειάζει τον buffer του θα λάβει ένα πακέτο στην επόμενη χρονοσχισμή καθώς οι buffer θα αδειάζουν από τη βάση του δένδρου προς την κορυφή.

#### **4.2.3 Λειτουργία πλήρως συναθροισμένων δεδομένων (Full aggregated traffic)**

Κατά τη λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται μια τεχνική η οποία μπορεί να εξαλείψει τον πλεονασμό και να ελαχιστοποιήσει το πλήθος των μεταδόσεων, με στόχο να εξοικονομηθεί ενέργεια και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Η συναθροίση μπορεί να υλοποιηθεί με πολλούς τρόπους, όπως με καταστολή διπλότυπων μηνυμάτων χρησιμοποιώντας συμπίεση δεδομένων και τεχνικές συγχώνευσης πακέτων ή με εκμετάλλευση της συσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων διαφορετικών αισθητήρων σε γειτονικές περιοχές.

Είναι δυνατή η συνάθροιση σε εφαρμογές συνεχούς ελέγχου όπου κάθε κόμβος είναι σε θέση να συναθροίζει όλα τα πακέτα που λαμβάνει από τα παιδιά του καθώς και εκείνα τα πακέτα που δημιουργεί ο ίδιος (λόγω των υπηρεσιών που εξυπηρετεί) σε ένα ενιαίο πακέτο πριν το αποστείλει στον γονέα του. Το μέγεθος των συναθροισμένων δεδομένων σε ένα ενιαίο πακέτο που μεταδίδεται από κάθε κόμβο είναι σταθερό και δεν εξαρτάται από το μέγεθος των ανεπεξέργαστων αναγνώσεων από τους μετρητές (τυπικά παραδείγματα μετρήσεων είναι συναρτήσεις μεγίστου, ελαχίστου, μέσου όρου, αρίθμησης κτλ). Κατά τη λειτουργία αυτή εγκαθίσταται μια μορφή σωλήνωσης το οποίο σημαίνει πως μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου ο επικεφαλής κόμβος λαμβάνει σε κάθε πλαίσιο (frame) πληροφορία από όλους τους κόμβους που βρίσκονται σε κατώτερα επίπεδα. Κάθε κόμβος μεταδίδει μόνο μια φορά στο TDMA schedule και με τον τρόπο αυτό κόμβοι που ανήκουν σε διαφορετικά ανεξάρτητα δένδρα είναι δυνατόν να μεταδίδουν ταυτόχρονα καθώς τα δεδομένα τους δεν είναι απαραίτητο να προωθούνται προς τον root node σε κάθε χρονοσχισμή.

#### 4.2.3.1 Εκχώρηση χρονοσχισμών

Στον αλγόριθμο που ακολουθεί περιγράφεται σε ψευδοκώδικα η διαδικασία εκχώρησης χρονοσχισμών που εκτελείται από τους κόμβους.

Αλγόριθμος 2. Εκχώρηση χρονοσχισμών με πλήρη συνάθροιση (full aggregated timeslot assignment)

```
1 Εισαγωγή δένδρου  $T=(V,E)$ 
2 Δημιουργία σειράς BFS
3 Για κάθε κόμβο στη σειρά BFS
4 While (δεν έχουν ελεγχθεί όλες οι ακμές της σειράς BFS) do
5     e <- (η επόμενη ακμή από τη σειρά BFS)
6     Γίνεται έλεγχος των περιορισμών που προκύπτουν από τις παρεμβολές μεταξύ
    των κόμβων, τις σχέσεις γονέων παιδιών και της ύπαρξης ή μη των κόμβων αυτών
    στο τρέχον slot
7     Εάν οι περιορισμοί αυτοί δεν ικανοποιούνται, η διαδικασία διακόπτεται
    και επαναλαμβάνεται από την αρχή για επόμενο slot ή αν δεν βρεθεί, για επόμενο
    κόμβο
8         if ( Περιορισμοί = true) then
9             Εκχωρείται στην ακμή αυτή το ελάχιστο slot t
            e.Buffer -- // Αφαίρεση ενός πακέτου από τον buffer
10             While (Buffer.Empty =false)
```

```

11             Slot++
12             Προγραμματισμός του e στο τρέχον slot
13             e.Buffer -- // Αφαίρεση ενός πακέτου από τον
buffer
                endif
14     Αφαίρεση της τρέχουσας ακμής από τη σειρά BFS
15 endwhile

```

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, επιλέγεται μια ακμή από την ουρά BFS (Breadth First Search) που έχει δημιουργηθεί ξεκινώντας από οποιονδήποτε κόμβο και της εκχωρείται η ελάχιστη χρονοσχισμή η οποία είναι διαφορετική από όλες τις γειτονικές ακμές και ικανοποιεί τους περιορισμούς των παρεμβολών μεταξύ των κόμβων και την μη ύπαρξη αυτών στην τρέχουσα χρονοσχισμή. Εάν υπάρχει απαίτηση περισσότερων χρονοσχισμών αυτές εκχωρούνται αντίστοιχα στις επόμενες χρονοσχισμές. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμες συνεχόμενες χρονοσχισμές για την εκχώρηση σε μια σύνδεση, εκχωρούνται στην υπηρεσία οι χρονοσχισμές μετά την τελευταία χρησιμοποιούμενη.

#### 4.2.4 Λειτουργία σταθερής κατάστασης

Η κατάσταση προγραμματισμού του TDMA υλοποιείται από την αναδρομική εφαρμογή των ανωτέρω αλγορίθμων. Τα TDMA schedules για το υποθετικό δένδρο του Σχ. 4.3 απεικονίζονται στους παρακάτω πίνακες.

Μετά την ολοκλήρωση της εκτέλεσης των αλγορίθμων TDMA ο root node έχει καθορίσει το βέλτιστο TMDA schedule και εκκινεί τη λειτουργία σταθερής κατάστασης μεταδίδοντας το πρόγραμμα στους κόμβους των κατώτερων επιπέδων, οι οποίοι το εκτελούν έως ότου ένα νέο πρόγραμμα καθίσταται αναγκαίο λόγω αλλαγών στη διαχείριση του δικτύου, βλάβες στις συνδέσεις ή εισαγωγή νέων κόμβων στο Smart Grid δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή το νέο πρόγραμμα εκδίδεται από τον root node καθιστώντας τη δενδρική λειτουργία προσαρμοζόμενη στις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

TS	No aggregation							
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7	Node 8
1		x						
2	x			x				
3			x	x				
4			x	x				
5		x						
6		x						
7		x						
8	x				x	x		
9	x							
10		x						
11				x				
12		x						
13							x	
14							x	
15				x				
16				x				
17		x						
18		x						
19								x
20				x				
21		x						

Σχήμα 4.5 : TDMA Schedule για λειτουργία μη συνάθροισης

TS	Full aggregation							
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 7	Node 8
1	x				x	x		
2		x	x					
3			x	x				
4				x				
5				x				
6							x	
7							x	
8								x

Σχήμα 4.6 : TDMA Schedule για λειτουργία πλήρους συνάθροισης





## 5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MULTI SERVICE TDMA SCHEDULE ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 Χαρακτηριστικά προσομοίωσης

Η τεχνολογία BB-PLC είναι προορισμένη για λειτουργία τόσο σε αστικές όσο και σε αγροτικές περιοχές. Οι αγροτικές περιοχές συνήθως περιλαμβάνουν PLC συνδέσεις υψηλής ποιότητας ενώ το πυκνά δομημένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας στις αστικές περιοχές προκαλεί δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης στο δίαυλο. Ο προσδιορισμός του βέλτιστου TDMA χρονοπρογραμματισμού προσομοιώθηκε σε δύο βασικά σενάρια Smart Grid δικτύου με τυπικά χαρακτηριστικά των αγροτικών και αστικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, αντίστοιχα με των δικτύων των Σχ. 4.1 και 4.2.

Οι βασικές προδιαγραφές για τη σχεδίαση των υποθετικών αυτών δικτύων για το αγροτικό ευφυές δίκτυο περιλαμβάνουν μικρό μέσο αριθμό παιδιών το οποίο σημαίνει πως μόνο λίγο κόμβοι έχουν περισσότερα από ένα παιδιά σχεδίαση η οποία συνάδει με την τυπική δομή ενός πραγματικού αγροτικού δικτύου. Το αστικό δίκτυο σε σύγκριση με το αγροτικό έχει πυκνότερα τοποθετημένους κόμβους ενώ η ποιότητα των PLC συνδέσεων είναι δυσμενέστερη λόγω της διάδοσης πολλαπλών οδεύσεων.

Επίσης, τα αγροτικά ευφυή δίκτυα σχηματίζουν λεπτά δένδρα με λίγους κλάδους, το οποίο έχει ληφθεί υπόψη στην προσομοίωση δημιουργώντας δένδρα με μικρό μέσο αριθμό παιδιών και μεγάλο βάθος διείσδυσης (περίπου 30 μεταπηδήσεις). Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, στα αστικά δίκτυα τα οποία σχηματίζουν πυκνά δένδρα η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με πολύ μικρότερο βάθος διείσδυσης (περίπου 10 μεταπηδήσεις) καθώς και μεγαλύτερο αριθμό διακλαδώσεων στο δένδρο που οφείλεται στο μεγάλο μέσο πλήθος παιδιών.

Για την εκτίμηση του βαθμού βελτίωσης διαφόρων σημαντικών μέτρων επίδοσης των ευφυών δικτύων λόγω χρήσης πλήρους συνάθροισης δεδομένων έναντι της μη συνάθροισης δεδομένων στο TDMA πρόγραμμα, χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης ποσοστιαίας μεταβολής :

$$X(\%) = \frac{X_{Full\ aggregation} - X_{No\ Aggregation}}{X_{No\ Aggregation}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

όπου το X αντιπροσωπεύει κάθε φορά το αντίστοιχο μέτρο επίδοσης δηλαδή :

- Το συνολικό αριθμό των χρονοσχισμών (Slots) του TDMA schedule
- Το ρυθμό διέλευσης (Throughput – πακέτα/χρονοσχισμή)
- Την καταναλισκόμενη ισχύ από τους κόμβους (Power)

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων τόσο σε αγροτικά όσο και αστικά δίκτυα έγινε χρήση διαφορετικών σεναρίων :

- Με βάση την κατανομή των διαφορετικών υπηρεσιών αποκλειστικά σε κόμβους που αποτελούν φύλλα (leafs) του δένδρου, δηλαδή δεν έχουν κανένα παιδί και σε κόμβους που αποτελούν κεντρικούς κόμβους (hubs) του δένδρου και έχουν πολλαπλές συνδέσεις με άλλους κόμβους. Η ακραία κατανομή αυτή επιλέχθηκε για την εξέταση της συμπεριφοράς του δένδρου στην εισαγωγή νέας υπηρεσίας υψηλότερων απαιτήσεων από τη βασική σε συγκεκριμένους μόνο κόμβους. Τέτοιες ακραίες περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν η αναβάθμιση όλων των τερματικών σταθμών στο ευφυές δίκτυο (κόμβοι φύλλα) με σταθμούς αυξημένων δυνατοτήτων (π.χ. μετρητές πολλαπλών μέτρων επίδοσης, ή η αναβάθμιση των κεντρικών σταθμών (κεντρικοί κόμβοι) οι οποίοι βρίσκονται σε σημαντικές για το δίκτυο τοποθεσίες με σταθμούς που υποστηρίζουν νέες υπηρεσίες για παρακολούθηση και επικοινωνία (π.χ. συσκευές για αποστολή συνεχούς ροής βίντεο για λόγους ασφάλειας).
- Με βάση το ποσοστό της τυχαίας κατανομής των διαφορετικών υπηρεσιών στο δένδρο, δηλαδή τη συνύπαρξη υπηρεσιών διαφορετικών απαιτήσεων στο ίδιο δένδρο με διαφορετικά ποσοστά κατανομής τους. Σε ένα πραγματικό ευφυές δίκτυο είναι πιθανότερο οι νέες υπηρεσίες υψηλότερων απαιτήσεων είναι πιθανότερο να κατανεμηθούν με τυχαίο τρόπο ανάλογα με τις ανάγκες κάθε κόμβου του δικτύου για αναβάθμιση και υποστήριξη νέων τεχνολογιών. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας είναι φυσιολογικές οι συνεχείς αναβαθμίσεις των συσκευών του ευφυούς δικτύου και ο έλεγχος της συμπεριφοράς του μελετήθηκε για την περίπτωση που σταδιακά αναβαθμίζεται το σύνολο του δικτύου με μια δεύτερη τεχνολογία που αντικαθιστά πλήρως την αρχική.

Οι προσομοιώσεις τόσο για αγροτικά όσο και για αστικά ευφυή δίκτυα βασίστηκαν στις ακόλουθες αρχές :

- Δημιουργία τυχαίων δένδρων παρόμοιων χαρακτηριστικών (με παρόμοια μεγέθη αποστάσεων μεταξύ των κόμβων και μέσου πλήθους παιδιών με βάση την ανωτέρω ανάλυση για αγροτικά και αστικά ευφυή δίκτυα)
- Κατανομή των υπηρεσιών μεταβάλλοντας το ποσοστό διείσδυσης τους στο δένδρο από 0-100%, δηλαδή από την τυχαία κατανομή στο δένδρο μιας μόνο βασικής υπηρεσίας (με ελάχιστη απαίτηση μια χρονοσχισμή) και την εισαγωγή μιας δεύτερης υπηρεσίας (αυξανόμενης απαίτησης σε χρονοσχισμές), μέχρι την πλήρη κάλυψη του δένδρου από αυτήν
- Μεταβολή του τύπου των υπηρεσιών που εισάγονται στο δένδρο με βάση τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης, άρα και σε χρονοσχισμές

## 5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

### 5.2.1 Κατανομή υπηρεσιών με βάση το είδος του κόμβου (leaf-hub)

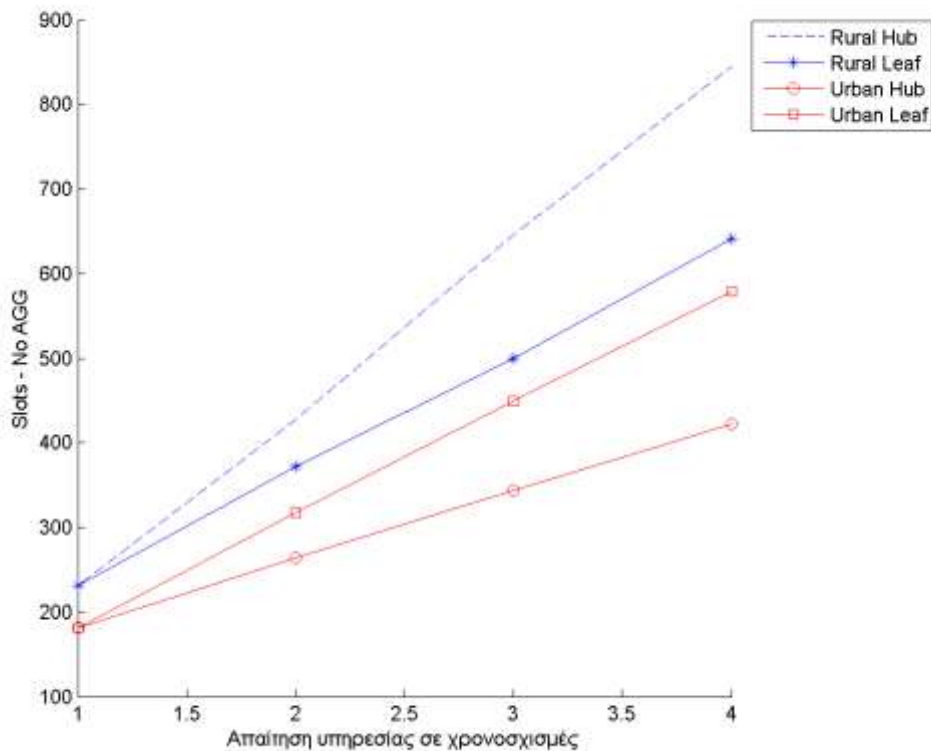
Αρχικά θεωρήθηκε σύστημα προσομοίωσης με κατανομή των υπηρεσιών στο ευφυές δίκτυο με βάση το είδος του κόμβου. Τα τυχαία δένδρα για αγροτικό και αστικό ευφυές δίκτυο βασίστηκαν στα δένδρα των Σχ. 4.1 και 4.2. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση της εισαγωγής δεύτερης υπηρεσίας στο δένδρο, διαφορετικής από τη βασική (η οποία έχει απαίτηση μιας χρονοσχισμής). Η νέα υπηρεσία με απαιτήσεις σε χρονοσχισμές αυξανόμενες από 1 έως 4, κατανεμήθηκε σε διαφορετικούς κόμβους με βάση τη θέση τους στο δένδρο, δηλαδή εάν ήταν κόμβοι φύλλα (leaf nodes) τα οποία δεν είχαν κανένα παιδί και τερμάτιζαν το δίκτυο ή κεντρικοί κόμβοι (hub nodes) οι οποίοι έχουν πολλαπλές συνδέσεις με άλλους κόμβους παιδιά. Η κατανομή της υπηρεσίας έγινε για τις ακραίες περιπτώσεις της εισαγωγής της μόνο σε κόμβους φύλλα ή μόνο σε κεντρικούς κόμβους. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε τόσο για αγροτικό (rural, με ποσοστά 30% κόμβων φύλλων και 70% κεντρικών κόμβων) όσο και για αστικό (urban, με ποσοστά 60% κόμβων φύλλων και 40% κεντρικών κόμβων) δίκτυο και για συνάθροιση ή μη των δεδομένων.

Οι διαφορετικές περιπτώσεις όπως αναφέρονται στις ακόλουθες προσομοιώσεις είναι:

- Rural Hub : Εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας (με απαιτήσεις σε χρονοσχισμές από 1 έως 4) μόνο σε κεντρικούς κόμβους αγροτικής τοπολογίας
- Rural Leaf : Εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας (με απαιτήσεις σε χρονοσχισμές από 1 έως 4) μόνο σε κόμβους φύλλα αγροτικής τοπολογίας
- Urban Hub : Εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας (με απαιτήσεις σε χρονοσχισμές από 1 έως 4) μόνο σε κεντρικούς κόμβους αστικής τοπολογίας
- Urban Leaf : Εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας (με απαιτήσεις σε χρονοσχισμές από 1 έως 4) μόνο σε κόμβους φύλλα αγροτικής τοπολογίας

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα ακόλουθα σχήματα.

### 5.2.1.1 Μη συναθροισμένη ροή δεδομένων (Non aggregated traffic)

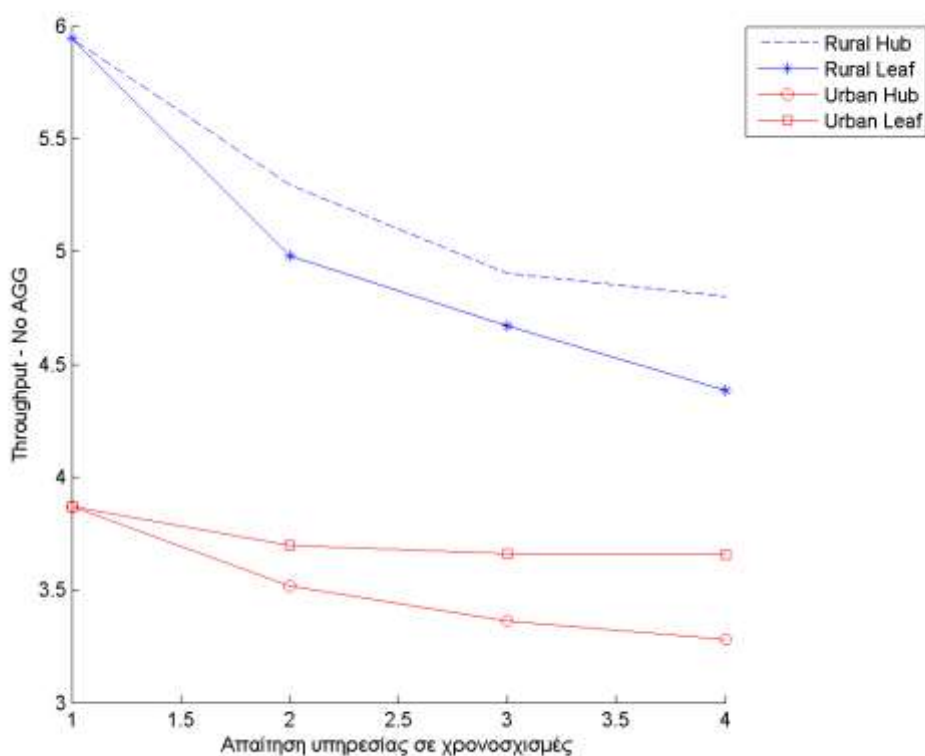


Σχήμα 5.1 : Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης συνολικού πλήθους χρονοσχιμών (slots)-απαιτήσης της υπηρεσίας σε χρονοσχιμές σε αγροτικό και αστικό δίκτυο

Το Σχ. 5.1 καταδεικνύει ότι υπάρχει γραμμική αύξηση του συνολικού πλήθους των χρονοσχιμών (δηλαδή του συνολικού μήκους του TDMA schedule) που απαιτεί η εκτέλεση του αλγορίθμου σε γραμμική αύξηση της απαίτησης των υπηρεσιών του δικτύου σε χρονοσχιμές. Η αύξηση των απαιτούμενων χρονοσχιμών είναι μεγαλύτερη σε αγροτικά δίκτυα, καθώς λόγω του μεγαλύτερου βάθους διείσδυσης και των περισσότερων προωθήσεων που προκύπτουν, απαιτούνται περισσότερα βήματα και άρα περισσότερος χρόνος να προωθηθούν όλα τα πακέτα από τους ακραίους κόμβους προς τον επικεφαλής κόμβο. Αντιθέτως, σε αστικά δίκτυα απαιτούνται συνολικά λιγότερες χρονοσχιμές, καθώς οι κόμβοι είναι πλησιέστερα στον επικεφαλής κόμβο λόγω της πυκνής μορφής του δικτύου και δεν απαιτούνται τόσες προωθήσεις.

Διαφορά παρατηρείται μεταξύ των δύο τοπολογιών όταν οι υπηρεσίες κατανέμονται σε κόμβους φύλλα ή κεντρικούς. Καίτοι και στις δύο περιπτώσεις προκαλείται αύξηση του συνολικού πλήθους των χρονοσχιμών με αντίστοιχη αύξηση των απαιτήσεων της δεύτερης υπηρεσίας, στα αγροτικά δίκτυα όπου ο μέσος όρος παιδιών ανά κόμβο είναι σχετικά μικρός, η αύξηση των απαιτούμενων

χρονοσχισμών είναι μεγαλύτερη όταν οι υπηρεσίες κατανέμονται σε κεντρικούς κόμβους διότι απαιτούνται περισσότερες προωθήσεις πακέτων, ενώ στην περίπτωση των κόμβων φύλλων αναμενόμενα η αύξηση είναι μικρότερη, καθώς ο μικρός σχετικά αριθμός τους δεν προκαλεί την ίδια επιβάρυνση στο δίκτυο. Αναλογικά, στα αστικά δίκτυα λόγω του μεγαλύτερου σχετικού αριθμού των κόμβων φύλλων παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση των απαιτούμενων χρονοσχισμών σε σχέση με την περίπτωση της κατανομής σε κεντρικούς κόμβους.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης ρυθμού διέλευσης (throughput – packets/slot)-απαιτήσης της υπηρεσίας σε χρονοσχιμές σε αγροτικό και αστικό δίκτυο

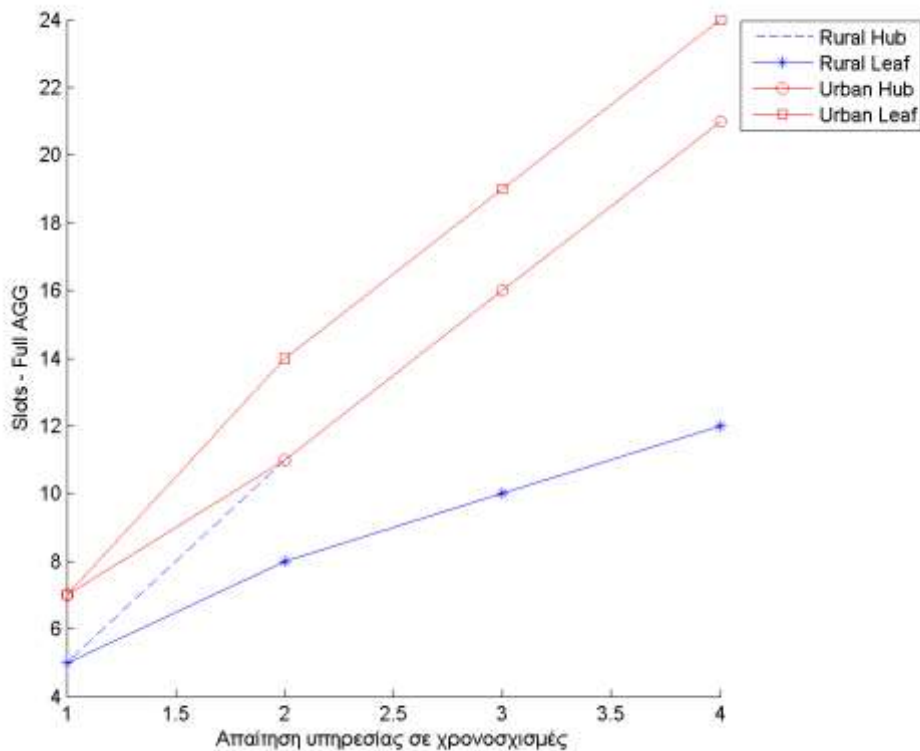
Η απόδοση του δικτύου σε σχέση με το ρυθμό διέλευσης (throughput), ο οποίος αφορά συνολικά όλους τους κόμβους του δένδρου σε κάθε μια από τις περιπτώσεις και αποτελεί το μέσο ρυθμό διέλευσης των κεντρικών και κόμβων φύλλων, εξαρτάται άμεσα από το συνολικό αριθμό των χρονοσχισμών σε κάθε περίπτωση. Τόσο στην περίπτωση του αγροτικού όσο και του αστικού δικτύου, παρατηρείται ότι υπάρχει μείωση του ρυθμού διέλευσης. Αυτό προκαλείται από την αύξηση των χρονοσχισμών που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του προγράμματος. Καίτοι ο ρυθμός διέλευσης απεικονίζει τα πακέτα που αποστέλλονται ανά χρονοσχιμή, η

αύξηση του συνολικού αριθμού των πακέτων δεν συνεπάγεται αύξηση του ρυθμού διέλευσης, καθώς αυτά λόγω πολλαπλών συγκρούσεων (οι οποίες προκύπτουν κατά τη διάρκεια του αρχικού χρονοπρογραμματισμού TDMA μεταξύ κόμβων που βρίσκονται σε ίδια ανεξάρτητα τμήματα του δένδρου όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.1) κατανέμονται πολύ αραιά στο πρόγραμμα και ως εκ τούτου προκύπτουν πολλές χρονοσχισμές. Με την αύξηση της απαίτησης των υπηρεσιών, επιβαρύνεται το δίκτυο και κάθε προσθήκη περισσότερων πακέτων είναι δυσμενής για την απόδοση του δικτύου.

Ο ρυθμός διέλευσης στα αγροτικά δίκτυα είναι υψηλότερος σε σχέση με τα αστικά, διότι χωρίς συνάθροιση δεδομένων, απαιτείται η προώθηση περισσότερων πακέτων προς τον επικεφαλής κόμβο. Στη διαδικασία αυτή λόγω της μορφής του αγροτικού δικτύου συμμετέχουν όλοι οι κόμβοι, προκαλώντας τη διακίνηση μεγάλου πλήθους πακέτων μέσα στο δίκτυο, άρα και μεγαλύτερο ρυθμό διέλευσης. Στα αστικά δίκτυα πραγματοποιούνται λιγότερες προωθήσεις, άρα παρατηρείται και μικρότερος ρυθμός διέλευσης.

Λόγω της συσχέτισης του ρυθμού διέλευσης με τις χρονοσχισμές, στα αγροτικά δίκτυα παρατηρείται για τους ίδιους λόγους με πριν μεγαλύτερος ρυθμός διέλευσης στην περίπτωση κατανομής των υπηρεσιών στους κεντρικούς κόμβους (λόγω μεγαλύτερου αριθμού πακέτων) και μικρότερος όταν κατανέμονται στους κόμβους φύλλα. Αντίστοιχα, στα αστικά δίκτυα λόγω του σχετικά μεγαλύτερου πλήθους των κόμβων φύλλων (άρα και των πακέτων που αποστέλλουν) παρατηρείται υψηλότερος ρυθμός διέλευσης από ότι στην περίπτωση της κατανομής στους κεντρικούς κόμβους

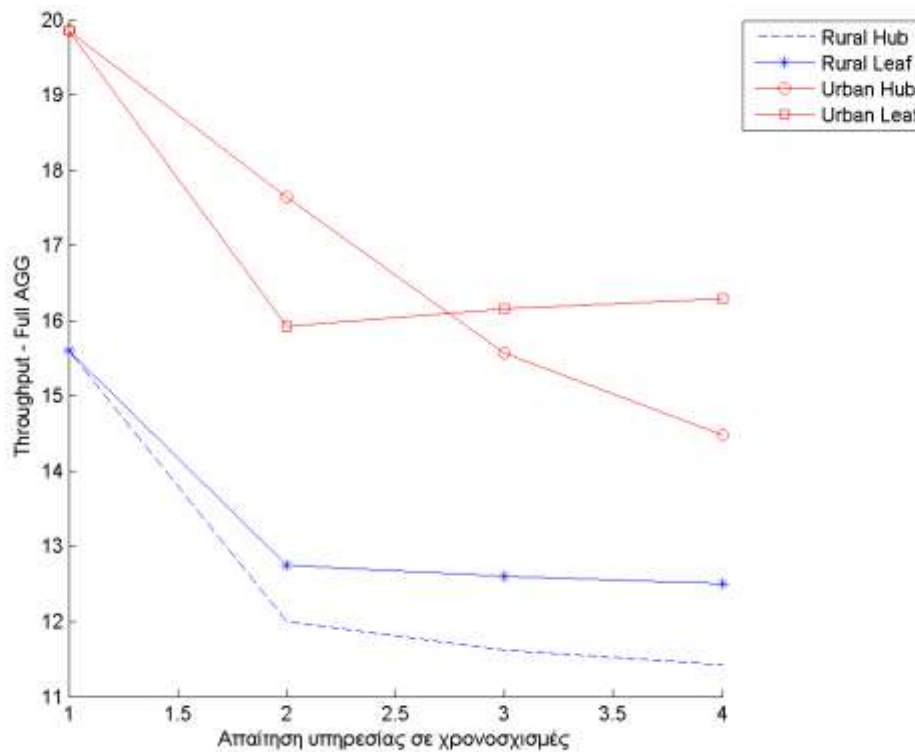
### 5.2.1.2 Συναθροισμένη ροή δεδομένων (Full aggregated traffic)



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης συνολικού πλήθους χρονοσχιμαμών (slots)-απαιτήσης της υπηρεσίας σε χρονοσχιμαμές σε αγροτικό και αστικό δίκτυο

Στην περίπτωση της πλήρως συναθροισμένης ροής δεδομένων, δηλαδή την περίπτωση που κάθε κόμβος δημιουργεί ένα ενιαίο πακέτο που αποτελείται από πακέτα δικά του και των απογόνων του για να προωθήσει στον κόμβο πατέρα του (ενότητα 4.2.3), παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά του δικτύου και στις δύο τοπολογίες. Η βασική παρατήρηση είναι η σημαντική μείωση του πλήθους των απαιτούμενων χρονοσχιμαμών για την ολοκλήρωση μιας πλήρους εκτέλεσης του αλγορίθμου TDMA τόσο στην περίπτωση αγροτικού όσο και αστικού δικτύου. Μια επιπλέον διαφορά εντοπίζεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση της συνάθροισης απαιτείται μεγαλύτερο πλήθος χρονοσχιμαμών σε αστικά δίκτυα σε σχέση με αγροτικά δίκτυα, αντίδραση η οποία είναι διαφορετική σε σχέση με τα αποτελέσματα του Σχ. 5.1. Αυτό δικαιολογείται λόγω της μορφής των δύο τοπολογιών. Λόγω της πυκνότερης μορφής του αστικού δικτύου και της ύπαρξης μεγάλου μέσου πλήθους παιδιών κάθε κόμβου, προκαλούνται περισσότερες συγκρούσεις (όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2.1.1) μεταξύ των παιδιών των κόμβων και άρα μεγαλύτερη απαίτηση σε χρονοσχιμαμές. Καθώς κάθε κόμβος προγραμματίζεται να αποστέλλει πακέτα μια φορά στη διάρκεια κάθε πλαισίου

(frame) του αλγορίθμου TDMA, θα προκαλείται μεγαλύτερη επιβάρυνση στο δίκτυο όταν κατανεμηθούν υπηρεσίες μεγαλύτερων απαιτήσεων σε περισσότερους κόμβους. Άρα, δικαιολογείται το μεγαλύτερο πλήθος χρονοσχισμών που απαιτεί η λειτουργία σε κόμβους φύλλα (περισσότεροι από τους κεντρικούς) στο αστικό δένδρο και ο μικρότερος αριθμός που απαιτεί η λειτουργία σε κόμβους φύλλα στο αγροτικό αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4 : Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης ρυθμού διέλευσης (throughput – packets/slot)-απαίτησης της υπηρεσίας σε χρονοσχισμές σε αγροτικό και αστικό δίκτυο

Λαμβάνοντας υπόψη τη δομή του αστικού δικτύου δικαιολογείται ο αυξημένος ρυθμός διέλευσης σε σχέση με το αγροτικό, καθώς υπάρχουν πολλά διαφορετικά τμήματα του δένδρου που δεν παρεμβάλλουν μεταξύ τους, άρα μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα. Η ταυτόχρονη αυτή μετάδοση περισσότερων πακέτων ανά χρονοσχιμή είναι η αιτία του μεγαλύτερου ρυθμού που παρουσιάζεται έναντι του αγροτικού δικτύου, στο οποίο ναί μεν χρειάζονται λιγότερες χρονοσχιμές, αλλά δεν μεταδίδονται ταυτόχρονα πολλά πακέτα. Ενδιαφέρον, όμως, στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζει ότι ο ρυθμός διέλευσης δεν παρουσιάζει την ίδια ακριβώς συμπεριφορά με την περίπτωση μη συνάθροισης.

Στην περίπτωση του αγροτικού δικτύου παρατηρείται μείωση, για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Εντούτοις, ο ρυθμός διέλευσης είναι υψηλότερος όταν η δεύτερη υπηρεσία κατανέμεται στους κόμβους φύλλα σε σχέση με τους κεντρικούς κόμβους κάτι που είναι αντίθετο με την

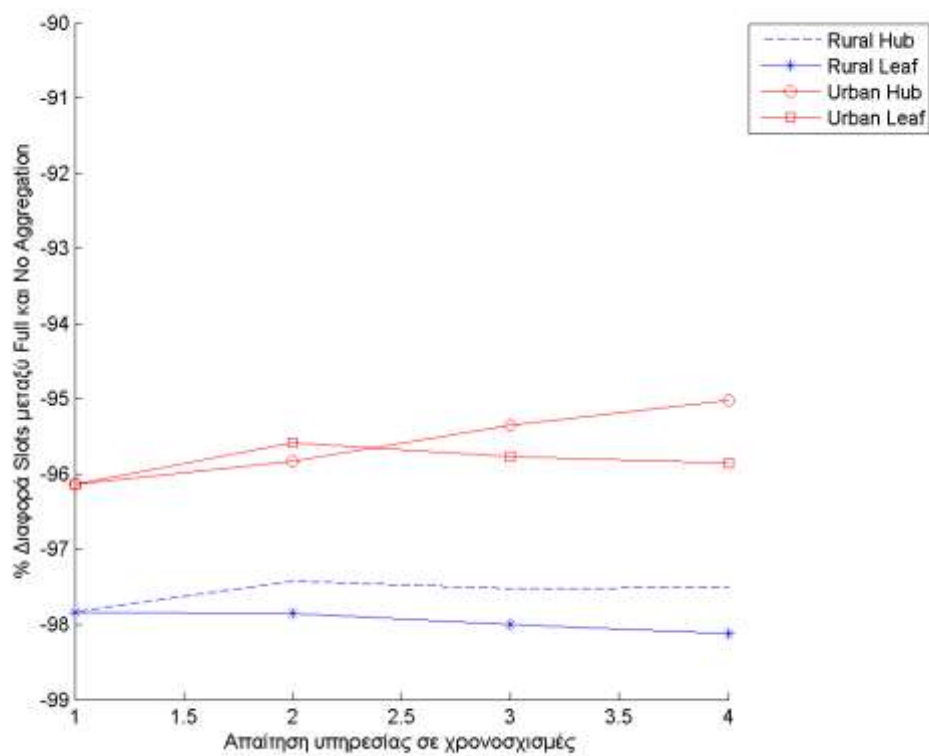


αντίστοιχη εικόνα του πλήθους των απαιτούμενων χρονοσχισμών (Σχ. 5.3), όπου οι κεντρικοί κόμβοι καταλαμβάνουν περισσότερες χρονοσχιμές. Αυτό δικαιολογείται καθώς στην περίπτωση της κατανομής της δεύτερης υπηρεσίας στους κόμβους φύλλα γίνεται αποστολή περισσότερων πακέτων (λόγω της δεύτερης υπηρεσίας) από πολύ λίγους κόμβους (λόγω της μορφής της αγροτικής τοπολογίας) και λόγω της συνάθροισης δεν υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο, άρα μεγαλύτερος ρυθμός διάδοσης. Στους κεντρικούς κόμβους, αντίθετα, οι οποίοι είναι περισσότεροι σε πλήθος στην αγροτική τοπολογία η προσθήκη αυξημένων απαιτήσεων προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στο δίκτυο, καθώς περισσότεροι κόμβοι αναγκάζονται να στείλουν πλέον περισσότερα πακέτα (λόγω της δεύτερης υπηρεσίας) το οποίο οδηγεί σε συμφόρηση και μικρότερο ρυθμό διάδοσης.

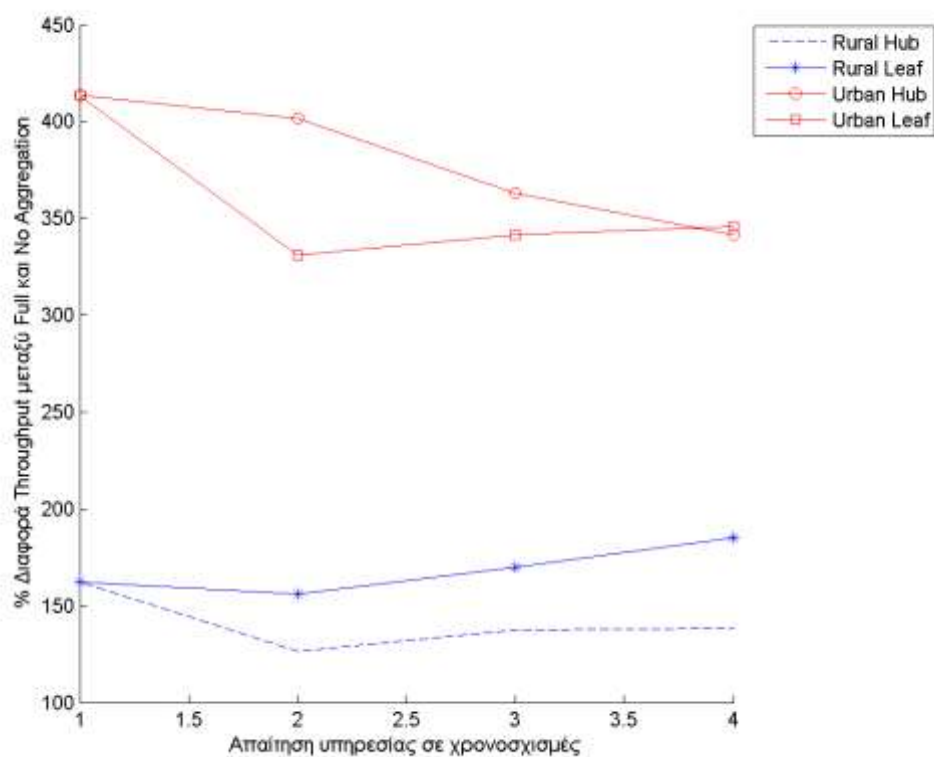
Στην περίπτωση του αστικού δικτύου, παρατηρείται μείωση στους κεντρικούς κόμβους, καθώς αναγκάζονται λόγω πολλαπλών συγκρούσεων να κατανέμονται πολύ αραιά στο χρονοπρογραμματισμό TDMA. Άξια παρατήρησης είναι η συμπεριφορά του δικτύου στην κατανομή υπηρεσιών στους κόμβους φύλλα. Ενώ αρχικά υπάρχει μείωση του ρυθμού διέλευσης για τον ίδιο λόγο με πριν, παρατηρείται μια οριακή αύξηση στη συνέχεια η οποία είναι αντίθετη από τη συμπεριφορά του δικτύου για κεντρικούς κόμβους. Καίτοι η κατανομή υπηρεσιών στους κόμβους φύλλα προκαλεί την αποστολή περισσότερων πακέτων από περισσότερους κόμβους, αξιοποιεί τη συνάθροιση των πακέτων και προκαλεί μείωση της χρήσης των πόρων του δικτύου. Στην αποστολή περισσότερων πακέτων από τους κόμβους φύλλα, τα οποία προωθούνται με πολύ λιγότερα πακέτα από τους κεντρικούς κόμβους υπάρχει αύξηση ρυθμού, σε σχέση με την περίπτωση που λιγότερα πακέτα από κόμβους φύλλα αναγκάζονται να προωθηθούν από πολύ περισσότερα στους κεντρικούς κόμβους προκαλώντας καθυστέρηση.

### ***5.2.1.3 Ποσοστιαία σύγκριση των δύο μεθόδων(Full Aggregation - No Aggregation)***

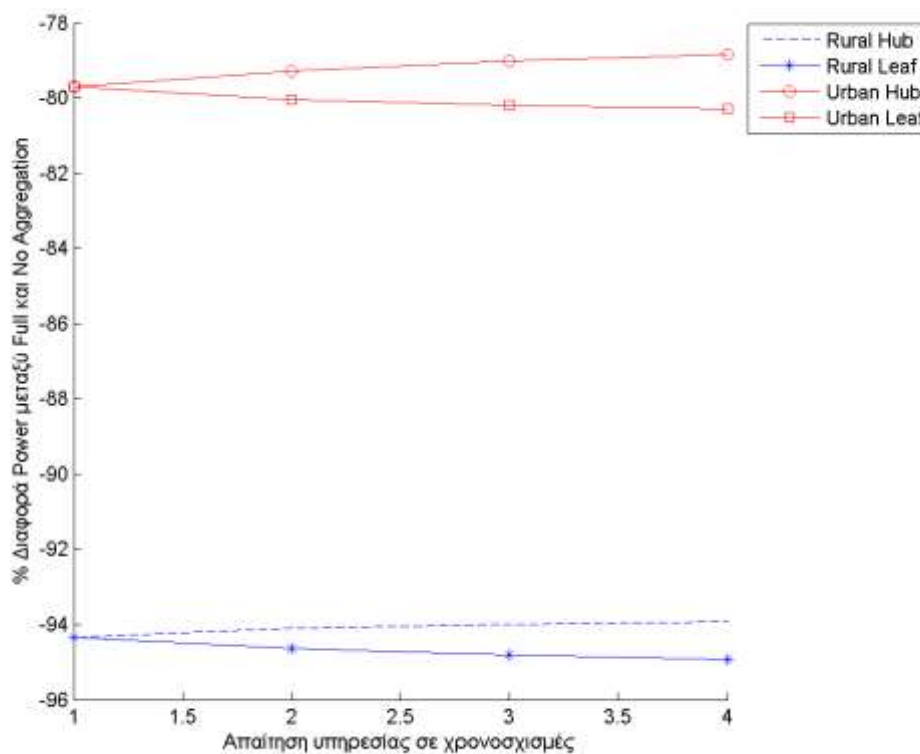
Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται η ποσοστιαία μεταβολή των χαρακτηριστικών μέτρων επίδοσης του δικτύου με χρήση ή όχι συνάθροισης.



Σχήμα 5.5 : Ποσοστιαία μεταβολή των απαιτούμενων χρονοσχιμών με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης



Σχήμα 5.6 : Ποσοστιαία μεταβολή του ρυθμού διέλευσης με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης



Σχήμα 5.7 : Ποσοστιαία μεταβολή της απαιτούμενης ισχύος λειτουργίας με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης

Στα ανωτέρω διαγράμματα φαίνεται καθαρά η επίδραση που έχει η συνάθροιση στην απόδοση της λειτουργίας τόσο της τοπολογίας αγροτικού όσο και της τοπολογίας αστικού ευφυούς δικτύου.

Στο Σχ. 5.5 παρατηρείται πως υπάρχει σχεδόν σταθερή βελτίωση για γραμμική αύξηση της απαίτησης της υπηρεσίας σε χρονοσχιμές, δηλαδή του μήκους του TDMA προγράμματος. Για την περίπτωση των αγροτικών δικτύων από τη χρήση της πλήρους συνάθροισης των δεδομένων προκύπτει μείωση της τάξεως του 96% στις χρονοσχιμές που απαιτεί το TDMA πρόγραμμα τόσο για κατανομές σε κεντρικούς κόμβους όσο και σε κόμβους φύλλα. Αντίστοιχη βελτίωση παρατηρείται για τα αστικά δίκτυα που υπάρχει μείωση 98% στις χρονοσχιμές.

Στο Σχ. 5.6 για αγροτικές τοπολογίες, παρατηρείται αύξηση από 125% έως 175% στον ρυθμό διέλευσης για περιπτώσεις κατανομής της δεύτερης υπηρεσίας σε κεντρικούς κόμβους και κόμβων φύλλα αντίστοιχα. Στην περίπτωση αστικής τοπολογίας η αύξηση του ρυθμού απόδοσης είναι πολλαπλάσια και κυμαίνεται από 400% έως περίπου 350% με μικρές διαφορές ανάμεσα στις κατανομές κεντρικών κόμβων και κόμβων φύλλων που δικαιολογούνται στις ενότητες 5.2.1.1 και 5.2.1.2.

Τέλος στο Σχ. 5.7 παρατηρείται αναμενόμενη και σαφής μείωση της κατανάλωσης ισχύος από τους κόμβους του δικτύου, γεγονός που οφείλεται στη μείωση των

χρονοσχισμών που απαιτούνται για την εκτέλεση του αλγορίθμου και άρα του χρόνου χρήσης του. Οι αστικές τοπολογίες παρουσιάζουν μείωση της κατανάλωσης που αντιστοιχεί σε ποσοστό 80% και οι αγροτικές τοπολογίες παρουσιάζουν μείωση κατανάλωσης σε ποσοστό 94-95%. Η διαφορά αυτή, οφείλεται στο γεγονός ότι στις αγροτικές τοπολογίες χωρίς συνάθροιση, σχεδόν κάθε κόμβος απαιτεί την αποστολή των δικών του πακέτων αλλά και την προώθηση των πακέτων των κόμβων που βρίσκονται σε χαμηλότερα επίπεδα. Με τη χρήση της συνάθροισης, η λειτουργία των κόμβων περιορίζεται ιδανικά στην αποστολή ενός πακέτου και τη λειτουργία του μια φορά μόνο μέσα στο πρόγραμμα. Η περίπτωση της αστικής τοπολογίας απαιτούσε από πριν λιγότερες προωθήσεις από τους κόμβους, λόγω μικρότερης διείσδυσης άρα και εμφάνισε σχετικά μικρότερο ποσοστό μείωσης στην κατανάλωση.

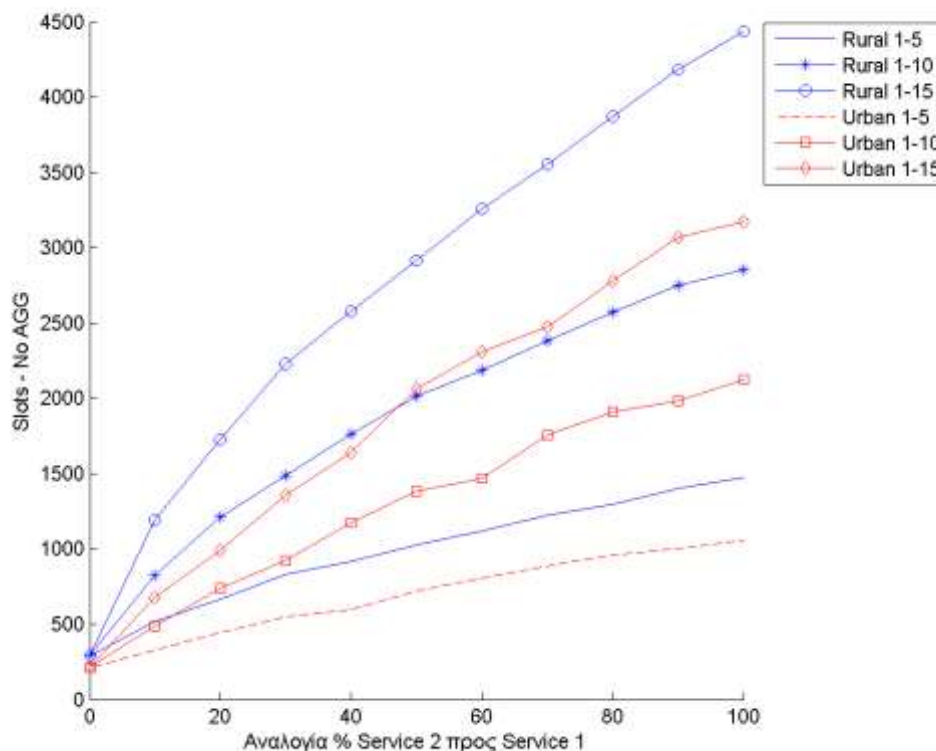
### 5.2.2 Τυχαία κατανομή των υπηρεσιών στο δένδρο με διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης

Στην περίπτωση αυτή προσομοιώθηκε ένα σύστημα τυχαίων δένδρων (τα οποία δημιουργήθηκαν με βάση τα δένδρα του Σχ. 4.1 και 4.2) τα οποία είχαν μεταξύ τους παρόμοια χαρακτηριστικά με τις περιπτώσεις αστικού και αγροτικού δικτύου. Ως τυχαία δένδρα θεωρήθηκαν στην περίπτωση του αστικού δικτύου τα δένδρα των οποίων οι κόμβοι είχαν μεταξύ τους μικρότερες αποστάσεις και μεγαλύτερο μέσο πλήθος παιδιών και στην περίπτωση του αγροτικού δικτύου δένδρα των οποίων οι κόμβοι είχαν μεταξύ τους μεγαλύτερες αποστάσεις και μικρότερο μέσο πλήθος παιδιών. Η δεύτερη υπηρεσία κατανεμήθηκε τυχαία στο δένδρο τόσο σε κόμβους φύλλα όσο και σε κεντρικούς κόμβους με βάση τα διαφορετικά ποσοστά διείσδυσής της σε σχέση με τη βασική υπηρεσία (με απαίτηση μιας χρονοσχισμής), με εύρος από 0% (για την ύπαρξη μόνο της βασικής υπηρεσίας) έως 100% (για την ύπαρξη μόνο της δεύτερης υπηρεσίας). Τα διαφορετικά επίπεδα υπηρεσιών με βάση τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης (άρα και χρονοσχισμές) ήταν 1, 5, 10 και 15 χρονοσχισμές. Οι διαφορετικές περιπτώσεις όπως αναφέρονται στις ακόλουθες προσομοιώσεις είναι :

- Rural 1-5 : Εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας (με απαίτηση 5 χρονοσχισμών) σε τυχαίους κόμβους αγροτικής τοπολογίας
- Rural 1-10 : Εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας (με απαίτηση 10 χρονοσχισμών) σε τυχαίους κόμβους αγροτικής τοπολογίας
- Rural 1-15 : Εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας (με απαίτηση 15 χρονοσχισμών) σε τυχαίους κόμβους αγροτικής τοπολογίας
- Urban 1-5 : Εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας (με απαίτηση 5 χρονοσχισμών) σε τυχαίους κόμβους αστικής τοπολογίας

- Urban 1-10 : Εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας (με απαίτηση 10 χρονοσχισμών) σε τυχαίους κόμβους αστικής τοπολογίας
- Urban 1-15 : Εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας (με απαίτηση 15 χρονοσχισμών) σε τυχαίους κόμβους αστικής τοπολογίας

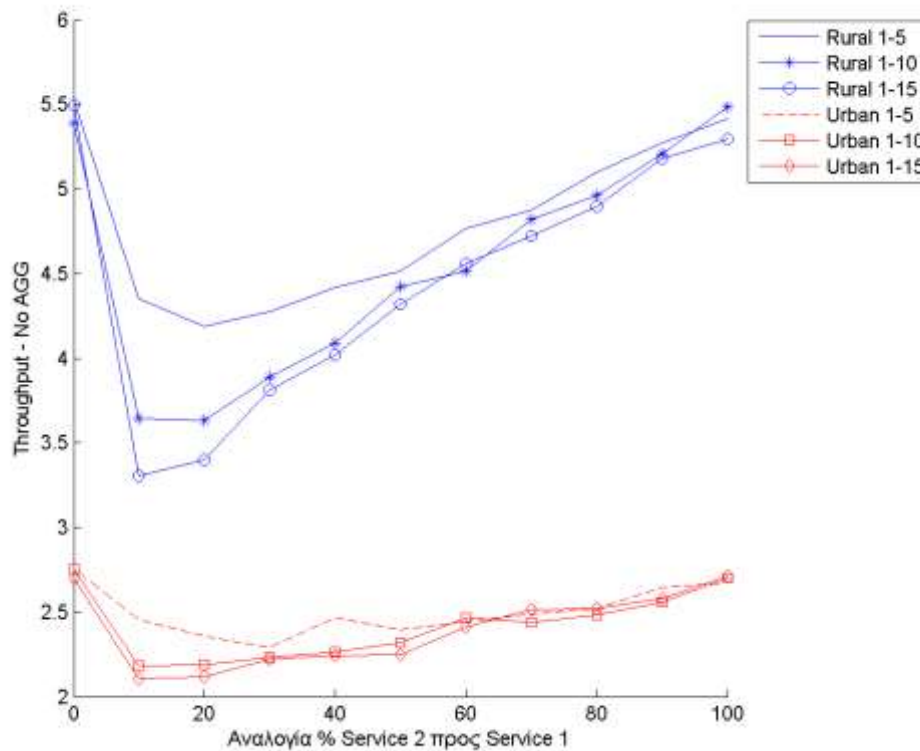
### 5.2.2.1 Μη συναθροισμένη ροή δεδομένων (Non aggregated traffic)



Σχήμα 5.8 : Διάγραμμα περιγραφής του συνολικού πλήθους χρονοσχισμών (slots)-ποσοστού διείσδυσης της δεύτερης υπηρεσίας σε σχέση με την πρώτη σε αγροτικό και αστικό δίκτυο

Το ανωτέρω διάγραμμα παρουσιάζει τη λογαριθμική αύξηση του συνολικού πλήθους των χρονοσχισμών του TDMA schedule σε σχέση με εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας στο δίκτυο και γραμμική αύξηση της διείσδυσης της έως το 100%. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι λογικά και για τα τρία διαφορετικά επίπεδα της δεύτερης υπηρεσίας (απαιτήσεων 5, 10 και 15 slot αντίστοιχα). Ανά επίπεδο υπηρεσίας το πλήθος των χρονοσχισμών είναι μεγαλύτερο στην αγροτική τοπολογία σε σχέση με την αστική, γεγονός που δικαιολογείται από την ύπαρξη μεγαλύτερου αριθμού κεντρικών κόμβων, περισσότερων μεταπηδήσεων για να φθάσει ένα πακέτο στον επικεφαλής κόμβο και περισσότερων προωθήσεων πακέτων. Είναι λογικό, λοιπόν, με την αύξηση της κυκλοφορίας πακέτων τυχαία μέσα στο δίκτυο να

προκύψουν περισσότερες συγκρούσεις, καθυστερήσεις και τελικά TDMA schedule περισσότερων χρονοσχημάτων.



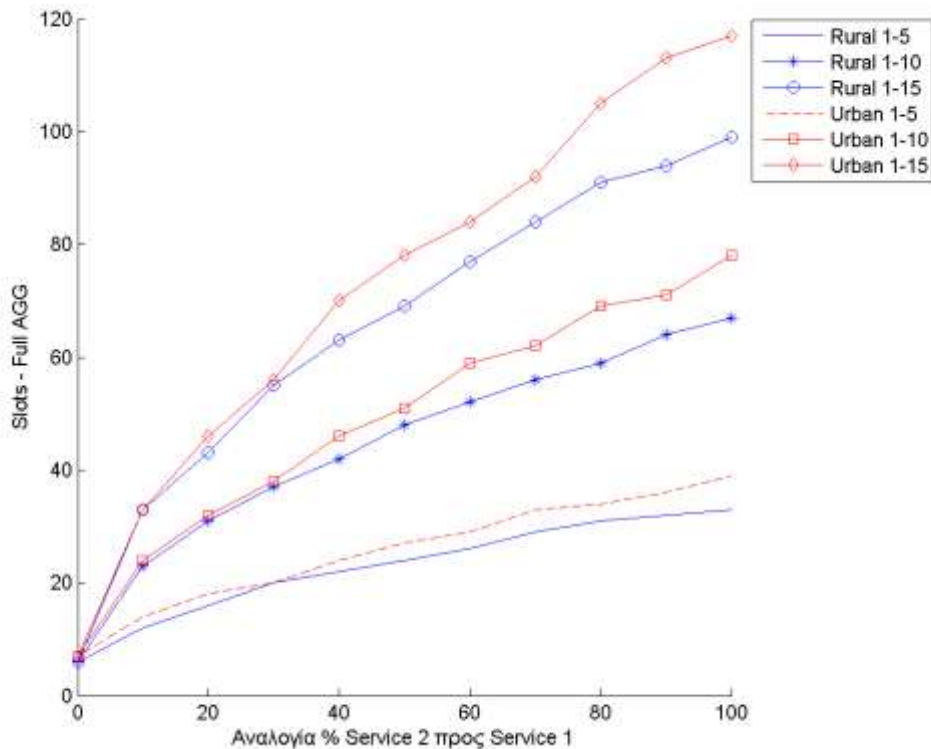
Σχήμα 5.9 : Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης ρυθμού διέλευσης (throughput – packets/slot)- ποσοστού διείσδυσης της δεύτερης υπηρεσίας σε σχέση με την πρώτη σε αγροτικό και αστικό δίκτυο

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός διέλευσης στην περίπτωση του αγροτικού δικτύου σε σχέση με το αστικό δίκτυο και για τα τρία επίπεδα υπηρεσίας, κάτι που οφείλεται στα αποτελέσματα του Σχ. 5.8. Ο ρυθμός διέλευσης αντιστοιχεί στις υπηρεσίες αναλογικά με βάση το ποσοστό τους (δηλαδή στην περίπτωση ποσοστού διείσδυσης 20% το 80% της τιμής του ρυθμού διέλευσης αντιστοιχεί στη βασική υπηρεσία και το 20% αντιστοιχεί στη δεύτερη υπηρεσία). Η τυχαία κατανομή των υπηρεσιών στους κόμβους και το αυξημένο πλήθος προωθήσεων εξασφαλίζουν την κυκλοφορία μεγαλύτερου αριθμού πακέτων στο δίκτυο και αυξημένο ρυθμό διέλευσης.

Σημαντική είναι η ομοιότητα στη μορφή των διαγραμμάτων των δύο περιπτώσεων. Τόσο στην περίπτωση του αγροτικού όσο και του αστικού δικτύου, το διάγραμμα ξεκινά από το ίδιο σημείο που αντιστοιχεί στην ύπαρξη μίας μόνο υπηρεσίας και με

την εισαγωγή της δεύτερης υπηρεσίας μειώνεται μέχρι το ποσοστό διείσδυσής της να φθάσει περίπου στο 15%. Στη συνέχεια, και τα δύο διαγράμματα αυξάνονται και καταλήγουν στο αρχικό επίπεδο ρυθμού διέλευσης. Η πτώση του ρυθμού διέλευσης είναι μεγαλύτερη στο αγροτικό δίκτυο ενώ η μεταβολή του στο αστικό δίκτυο είναι ομαλότερη. Ο λόγος της συμπεριφοράς αυτής των καμπυλών οφείλεται αρχικά στην εισαγωγή της δεύτερης υπηρεσίας στο δίκτυο. Στα αρχικά ποσοστά διείσδυσής της δεύτερης υπηρεσίας, το πλήθος των χρονοσχισμών που απαιτούνται είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το πλήθος των πακέτων που εισάγονται στο δίκτυο, με αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού διέλευσης. Με την αύξηση όμως της αναλογίας, αυξάνεται αντίστοιχα σημαντικά και ο αριθμός των πακέτων που εισάγονται στο δίκτυο αλλά όπως παρατηρείται από το προηγούμενο διάγραμμα δεν υπάρχει αντίστοιχα σημαντική αύξηση του αριθμού των χρονοσχισμών που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του TDMA χρονοπρογραμματισμού. Αυτό οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού διέλευσης (πακέτα/χρονοσχισμή) και το σύστημα αρχίζει να ισορροπεί καταλήγοντας στην αρχική του κατάσταση. Το σύστημα καταλήγει στην αρχική κατάσταση, καθώς ο λόγος πακέτα προς χρονοσχισμή παραμένει σταθερός όταν υπάρχει μόνο η πρώτη υπηρεσία στο δίκτυο και όταν υπάρχει μόνο η δεύτερη. Καίτοι που η δεύτερη υπηρεσία απαιτεί σημαντικά περισσότερες χρονοσχισμές, εισάγει ανάλογο αριθμό πακέτων στο δίκτυο με αποτέλεσμα τη συμπεριφορά που περιγράφεται στα ανωτέρω διαγράμματα. Το ποσοστό της απομάκρυνσης από την αρχική κατάσταση στα αρχικά στάδια εξαρτάται αναλογικά με τις ανάγκες της υπηρεσίας που εισάγεται.

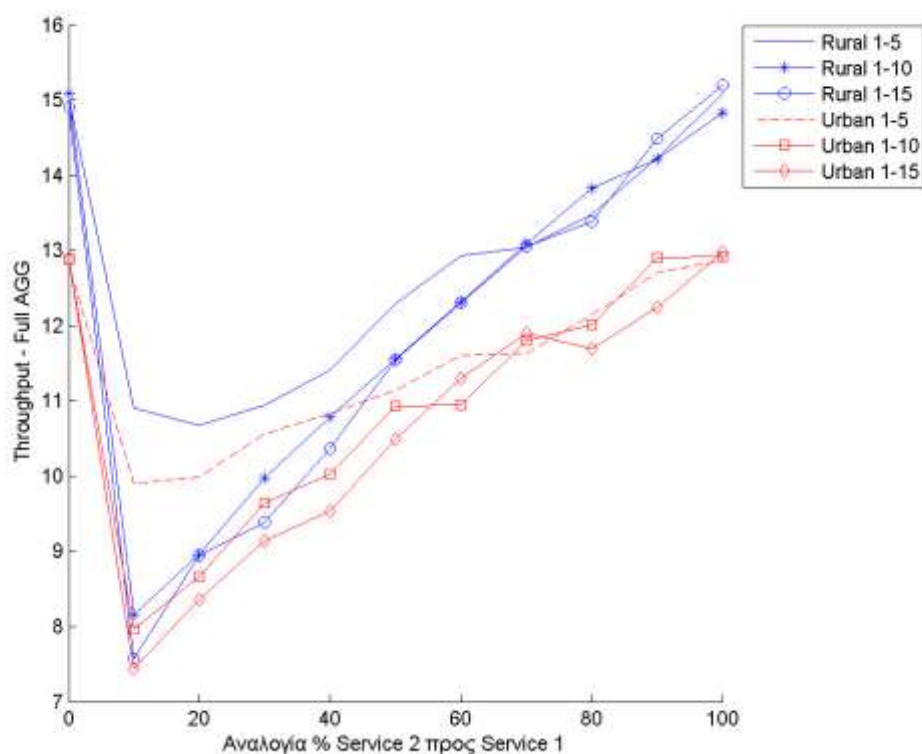
### 5.2.2.2 Συναθροισμένη ροή δεδομένων (Full aggregated traffic)



Σχήμα 5.10 : Διάγραμμα περιγραφής του συνολικού πλήθους χρονοσχισμών (slots)- ποσοστού διείσδυσης της δεύτερης υπηρεσίας σε σχέση με την πρώτη σε αγροτικό και αστικό δίκτυο

Όμοια με την περίπτωση μη συνάθροισης το ανωτέρω διάγραμμα καταδεικνύει λογαριθμική αύξηση του συνολικού αριθμού των χρονοσχισμών του TDMA χρονοπρογραμματισμού το οποίο αναμένεται και για τα τρία διαφορετικά επίπεδα της δεύτερης υπηρεσίας. Άξιο παρατήρησης είναι η σχετικά μικρή διαφορά μεταξύ των δύο τοπολογιών για κάθε επίπεδο υπηρεσίας. Και στις τρεις περιπτώσεις τα διαγράμματα των αγροτικών και αστικών δικτύων συμβαδίζουν και παρουσιάζουν μικρές διαφορές όσο η δεύτερη υπηρεσία διεισδύει περισσότερο στο δίκτυο. Η επίδραση του αλγορίθμου συνάθροισης είναι σημαντική καθώς κατορθώνει να οδηγήσει σε παρόμοια αποτελέσματα για πολύ διαφορετικές τοπολογίες. Η μικρή διαφορά που προκαλεί στα αστικά δίκτυα μεγαλύτερο αριθμό χρονοσχισμών, οφείλεται στην τοπολογία του δικτύου αφού τα αστικά δίκτυα έχουν μεγάλο μέσο αριθμό παιδιών - άρα η τυχαία κατανομή των υπηρεσιών είναι πιο πιθανό να αντιστοιχιστεί σε κόμβους φύλλα οι οποίοι θα ανταγωνιστούν μεταξύ τους για να στείλουν στον πατέρα τους. Με τον τρόπο αυτό οι συγκρούσεις αυξάνονται και έχουν ως αποτέλεσμα περισσότερες χρονοσχισμές. Στην περίπτωση των αγροτικών δικτύων μεγαλύτερη πιθανότητα παρουσιάζει η κατανομή υπηρεσιών σε κεντρικούς κόμβους, οι οποίοι μπορούν να πραγματοποιήσουν συνάθροιση δεδομένων των κόμβων σε χαμηλότερα επίπεδα, άρα κυκλοφορία λιγότερων πακέτων και λιγότερων χρονοσχισμών.





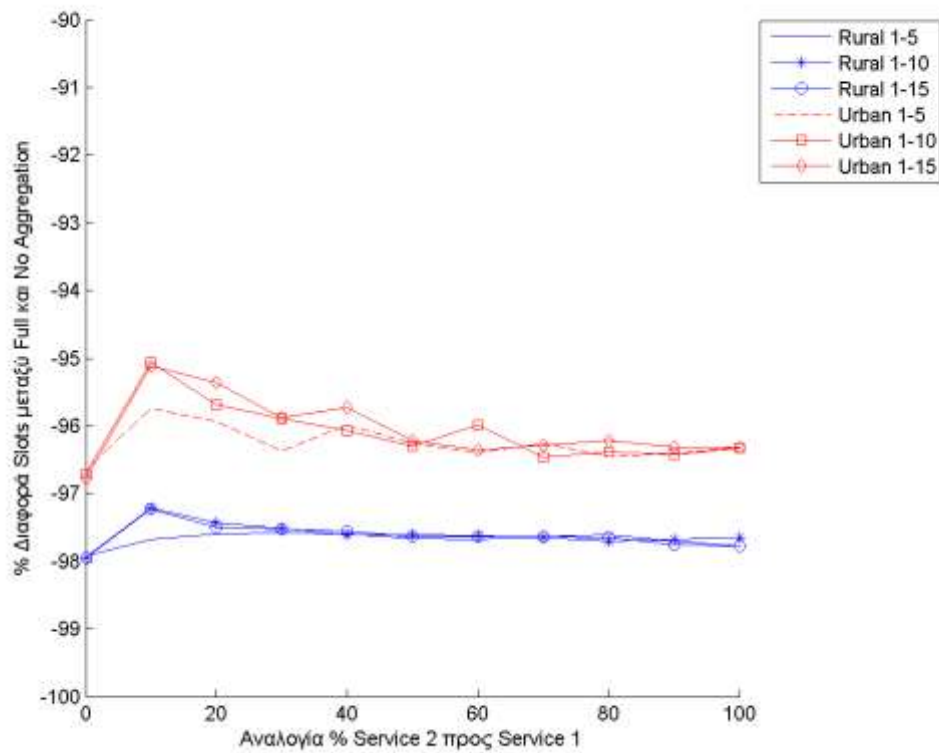
Σχήμα 5.11 : Διάγραμμα περιγραφής της σχέσης ρυθμού διέλευσης (throughput – packets/slot)- ποσοστού διείσδυσης της δεύτερης υπηρεσίας σε σχέση με την πρώτη σε αγροτικό και αστικό δίκτυο

Στην περίπτωση συνάθροισης δεδομένων παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά του διαγράμματος του ρυθμού διέλευσης για διαφορετικές υπηρεσίες με την περίπτωση της μη συνάθροισης. Για τους ίδιους λόγους με την προηγούμενη περίπτωση υπάρχει πτώση του ρυθμού διέλευσης έως το 15%. Λόγω της σχετικά μικρής διαφοράς των χρονοσχισμών μεταξύ των δύο τοπολογιών για κάθε επίπεδο υπηρεσίας τα διαγράμματα ρυθμού διέλευσης έχουν σχετικά μικρές διαφορές μεταξύ τους και όμοια με πριν το ποσοστό της απομάκρυνσης από την αρχική κατάσταση στα αρχικά στάδια εξαρτάται αναλογικά με τις ανάγκες τις υπηρεσίας που εισάγεται.

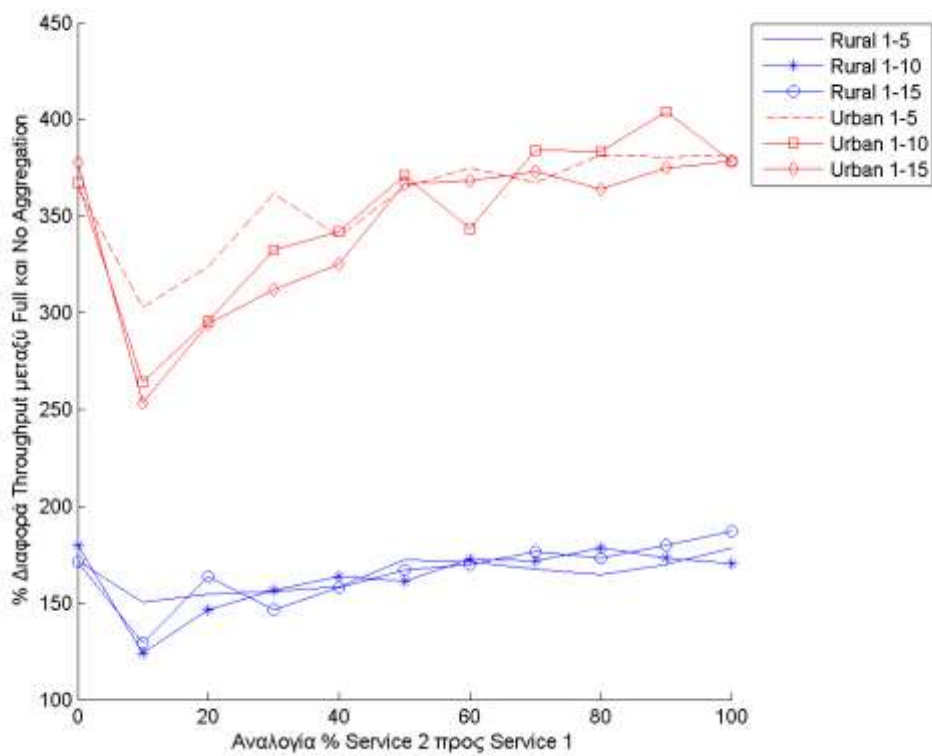
Η βασικότερη διαφορά σε σχέση με την περίπτωση μη συνάθροισης είναι πως ενώ στο αστικό δίκτυο παρατηρείται μεγαλύτερος αριθμός χρονοσχισμών αντίθετα ο μεγαλύτερος ρυθμός διέλευσης παρατηρείται για τα αγροτικά δίκτυα. Αυτό οφείλεται στη μορφή των τοπολογιών και στο ότι ο αριθμός των πακέτων που θα κυκλοφορήσουν στο δίκτυο λόγω της συνάθροισης είναι παρόμοιος. Όμως, λόγω της διαφοράς των χρονοσχισμών υπέρ των αγροτικών δικτύων, ο συνολικός ρυθμός διέλευσης θα είναι μεγαλύτερος, καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογος των χρονοσχισμών.

### 5.2.2.3 Ποσοστιαία σύγκριση των δύο μεθόδων (Full Aggregation - No aggregation)

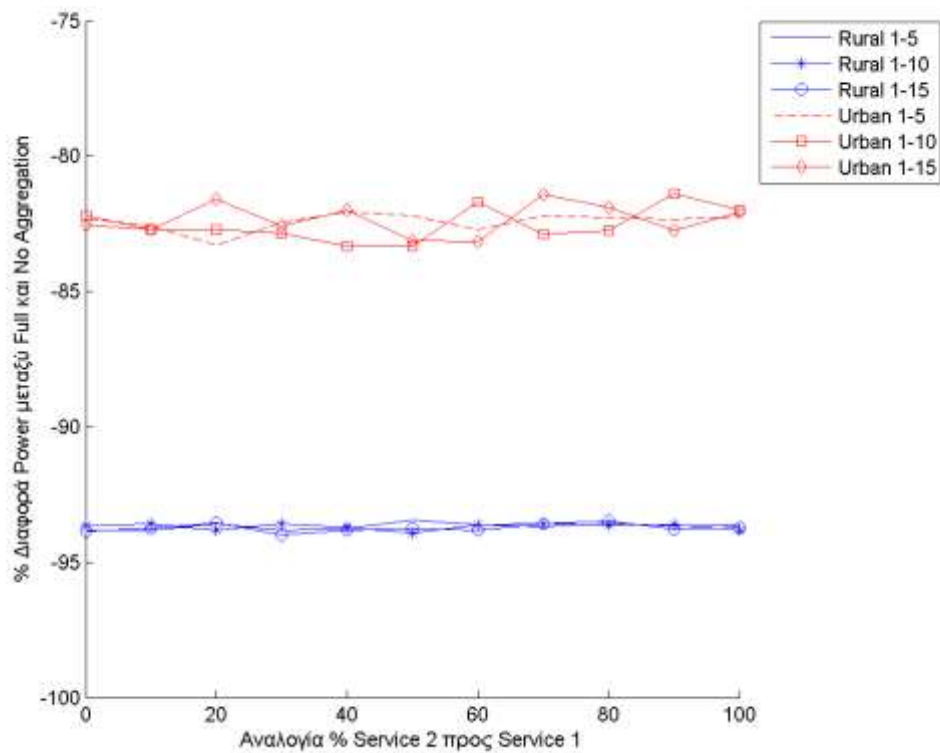
Στα ακόλουθα διαγράμματα συγκεντρώνεται η ποσοστιαία μεταβολή των χαρακτηριστικών μετρητικών απόδοσης του δικτύου με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης.



Σχήμα 5.12: Ποσοστιαία μεταβολή των απαιτούμενων χρονοσχημάτων με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης



Σχήμα 5.13 : Ποσοστιαία μεταβολή του ρυθμού διέλευσης με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης



Σχήμα 5.14 : Ποσοστιαία μεταβολή της απαιτούμενης ισχύος λειτουργίας με χρήση συνάθροισης έναντι μη συνάθροισης

Στα ανωτέρω διαγράμματα φαίνεται ευδιάκριτα η επίδραση που έχει η συνάθροιση στην απόδοση της λειτουργίας τόσο της τοπολογίας αγροτικού όσο και της τοπολογίας αστικού ευφυούς δικτύου με την εισαγωγή διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών.

Στο Σχ. 5.12 παρατηρείται πως υπάρχει σχεδόν σταθερή βελτίωση για γραμμική αύξηση της διείσδυσης της δεύτερης υπηρεσίας σε σχέση με την πρώτη στο δίκτυο. Για την περίπτωση των αστικών δικτύων από τη χρήση της πλήρους συνάθροισης των δεδομένων προκύπτει μείωση της τάξεως του 96% στις χρονοσχισμές που απαιτεί το TDMA πρόγραμμα. Η αρχική μείωση του ποσοστού από 97% σε 95% οφείλεται στη λογαριθμική αύξηση των χρονοσχισμών για τα ποσοστά διείσδυσης μέχρι το 15%. Ο ρυθμός αύξησης των χρονοσχισμών ήταν πολύ μεγαλύτερος μέχρι του ποσοστού αυτού και μειωνόταν σταδιακά στη συνέχεια. Ως αποτέλεσμα η βελτίωση μετά το 20% της διείσδυσης σταθεροποιείται στο 96%. Αντίστοιχη βελτίωση παρατηρείται για τα αγροτικά δίκτυα που υπάρχει μείωση 98% στις χρονοσχισμές με την ίδια συμπεριφορά στη διείσδυση μέχρι το 20%.

Στο Σχ. 5.13 για αστικές τοπολογίες, παρατηρείται αύξηση από 250% έως 400% στον ρυθμό διέλευσης για γραμμική αύξηση της διείσδυσης της δεύτερης υπηρεσίας σε σχέση με την πρώτη στο δίκτυο. Στην περίπτωση της αγροτικής τοπολογίας η αύξηση του ρυθμού απόδοσης είναι μικρότερη και κυμαίνεται κοντά στο 150%. Οι διαφορές που παρατηρούνται στα ποσοστά βελτίωσης για διείσδυση υπηρεσίας μέχρι 20%, δικαιολογούνται στις ενότητες 5.2.2.1 και 5.2.2.2.

Τέλος στο Σχ. 5.14 παρατηρείται αναμενόμενη και σαφής μείωση της κατανάλωσης ισχύος από τους κόμβους του δικτύου, γεγονός που οφείλεται στη μείωση των χρονοσχισμών που απαιτούνται για την εκτέλεση του αλγορίθμου και άρα του χρόνου χρήσης τους. Οι αστικές τοπολογίες παρουσιάζουν μείωση της κατανάλωσης που αντιστοιχεί σε ποσοστό 82.5% και οι αγροτικές τοπολογίες παρουσιάζουν μείωση κατανάλωσης σε ποσοστό 94%. Η διαφορά αυτή, οφείλεται όπως και στην προηγούμενη περίπτωση στο γεγονός ότι στις αγροτικές τοπολογίες χωρίς συνάθροιση, σχεδόν κάθε κόμβος απαιτεί την αποστολή των δικών του πακέτων αλλά και την προώθηση των πακέτων των κόμβων που βρίσκονται σε χαμηλότερα επίπεδα. Με τη χρήση της συνάθροισης, η λειτουργία των κόμβων περιορίζεται ιδανικά στην αποστολή ενός πακέτου και τη λειτουργία του άπαξ μέσα στο πρόγραμμα. Η περίπτωση της αστικής τοπολογίας απαιτούσε αρχικά λιγότερες προωθήσεις από τους κόμβους, λόγω μικρότερης διείσδυσης επομένως εμφάνισε σχετικά μικρότερο ποσοστό μείωσης στην κατανάλωση.

### 5.3 Αξιολόγηση μετρήσεων

Με την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων τα συμπεράσματα που εξαγονται είναι σημαντικά για τη λειτουργία και ανάπτυξη των ευφυών δικτύων. Καθώς το δίκτυο εξελίσσεται οι διαφορετικές νέες υπηρεσίες που υποστηρίζει αυξάνονται. Αυτό σημαίνει ότι εισάγονται υπηρεσίες με διαφορετική σημασία και διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης ή καθυστέρηση μετάδοσης. Όπως ήταν αναμενόμενο, επιβεβαιώθηκε μέσω προσομοιώσεων τόσο σε αγροτικές όσο και σε αστικές περιοχές η τεράστια βελτίωση που προσφέρει η χρησιμοποίηση τεχνικών συνάθροισης σε οποιοδήποτε χαρακτηριστικό της απόδοσης του δικτύου για εισαγωγή δεύτερης υπηρεσίας διαφορετικής από τη βασική που υποστήριζε αρχικά το δίκτυο. Η απόδοση του δικτύου εξαρτάται άμεσα από το είδος των διαφορετικών υπηρεσιών που εξυπηρετεί και οι απαιτήσεις των υπηρεσιών καθορίζουν αντίστοιχα τόσο τη συνολική καθυστέρηση μετάδοσης, όσο και το ρυθμό διέλευσης και την κατανάλωση ενέργειας. Εξετάζοντας περιπτώσεις εισαγωγής πρόσθετων υπηρεσιών σε οποιονδήποτε κόμβο του δικτύου με πολλαπλάσιες απαιτήσεις από τις υπάρχουσες κατανεμημένες τυχαία ή σε συγκεκριμένους κόμβους με βάση τη θέση και σημασία τους, η λειτουργία του δικτύου βελτιώνεται σημαντικά.

Ο προτεινόμενος προγραμματισμός των χρονοσχισμών του αλγορίθμου TDMA πραγματοποιείται δυναμικά και το δίκτυο ανταποκρίνεται άμεσα σε αλλαγές που οφείλονται σε προσθαφαίρεση κόμβων ή παρουσία ελαττωματικών συνδέσεων. Ο αλγόριθμος λειτουργεί επιτρέποντας ταυτόχρονες μεταδόσεις από κόμβους που δεν παρεμβάλλουν μεταξύ τους και ανήκουν σε διαφορετικές και ανεξάρτητες περιοχές του δικτύου. Δίνεται δηλαδή στους σχεδιαστές ευφυών δικτύων η δυνατότητα χρήσης μιας μεθόδου η οποία μπορεί να λειτουργήσει και να ικανοποιήσει διαφορετικές απαιτήσεις πρόσθετων υπηρεσιών και να προσαρμοστεί σε οποιαδήποτε αλλαγή του δικτύου αποδοτικά.

Με βάση τις πιθανές εφαρμογές χρήσης στα ευφυή δίκτυα, οι οποίες όπως αναλύθηκε είναι ετερογενείς, με διαφορετικές απαιτήσεις και προτεραιότητες, ο προτεινόμενος αλγόριθμος TDMA επιτυγχάνει να συνδυάσει τόσο την εισαγωγή υπηρεσιών πολλαπλών απαιτήσεων όσο και τις απαιτήσεις ποιότητας και καθυστέρησής τους. Με στόχο τη μείωση της καθυστέρησης, η οποία συνεπάγεται λιγότερο χρόνο λειτουργίας των κόμβων, μειώνεται δραστικά η κατανάλωση ενέργειάς των κόμβων πράγμα πολύ σημαντικό καθώς συνεπάγεται αύξηση του χρόνου ζωής των συσκευών του ευφυούς δικτύου και μείωση του κόστους λειτουργίας τους. Με το επιπλέον αυτό πλεονέκτημα οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας με ελάχιστο κίνδυνο επένδυσης είναι δυνατόν να μετατρέψουν τα υπάρχοντα δίκτυα μεταφοράς ενέργειας σε δίκτυα τα οποία με τη χρήση τεχνολογιών BB-PLC ενσωματώνουν αποτελεσματικά εναλλακτικές πηγές ενέργειας,

βελτιώνουν την παρεχόμενη ενέργεια και με την αποτελεσματική διαχείριση του δικτύου η εξοικονόμηση ενέργειας προσφέρει εκτός από οικονομικά οφέλη για τις επιχειρήσεις και τους πελάτες και πολλαπλά περιβαλλοντικά οφέλη.

## 6 Βιβλιογραφία

- [1] A. Sarafi, A. Voulikidis and P. Cottis, "Routing and optimal TDMA Scheduling in Tree-Based Power Line Access Networks"
- [2] Durmaz Incel, O.; Ghosh, A.; Krishnamachari, B.; Chintalapudi, K.; , "Fast Data Collection in Tree-Based Wireless Sensor Networks," *Mobile Computing, IEEE Transactions on* , vol. 11, no. 1, pp.86-99, Jan. 2012
- [3] M.P. Anastasopoulos , A.C. Voulikidis , Athanasios V. Vasilakos , P.G. Cottis , "A secure network management protocol for SmartGrid BPL networks: Design, implementation and experimental results", *Computer Communications* 31 (2008) 4333–4342
- [4] Sinem Coleri Ergen , Pravin Varaiya "TDMA scheduling algorithms for wireless sensor networks", *Wireless Netw* (2010)
- [5] Rodrigo Filev Maia, Denis Gabos, Moacyr Martucci Jr., "A Distributed QoS Control Architecture for Heterogeneous Networks Applied to PLC Networks", IEEE 2008
- [6] Agustin Zaballos, Alex Vallejo, and Josep M. Selga, "Heterogeneous Communication Architecture for the Smart Grid", IEEE 2011
- [7] *Alex Vallejo, Agustín Zaballos, Josep Maria Selga, and Jordi Dalmau*, "Next-Generation QoS Control Architectures for Distribution Smart Grid Communication Networks", IEEE 2012
- [8] *Shmuel Goldfisher, Shinji Tanabe*, "IEEE 1901 Access System: An Overview of Its Uniqueness and Motivation", IEEE 2010 *Communications Magazine*
- [9] *Md. Mustafizur Rahman, Choong Seon Hong, and Sungwon Lee, Jaejo Lee, Md. Abdur Razzaque and Jin Hyuk Kim*, "Medium Access Control for Power Line Communications: An Overview of the IEEE 1901 and ITU-T G.hn Standards", IEEE 2011 *Communications Magazine* June 2011
- [10] Angeliki M. Sarafi, Athanasios E. Drougas, and Panayotis G. Cottis, "Cross-Layer Resource Allocation in Medium-Voltage Broadband Over Power-Line Networks", IEEE 2012, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 27, NO. 4, OCTOBER 2012
- [11] Real-Time Energy Management via Powerlines and Internet (REMPLI). [Online]. Available: <http://www.rempli.org/>
- [12] IEEE Std 1646-2004, "IEEE Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation."
- [13] S. Repo *et al.*, "Use Case Analysis of Real-Time Low Voltage Network Management," *IEEE PES Int'l. Conf. Innovative Smart Grid Technologies*, Manchester, U.K., Dec. 5–7, 2011.
- [14] H. Choi, J. Wang, and E. Hughes, "Scheduling for Information Gathering on Sensor Network," *Wireless Networks*, vol. 15, pp. 127-140, 2009.
- [15] <http://www.smartgrids.eu/FAQ#12> [Ηλεκτρονικό]

[16] Sinem Coleri Ergen and Pravin Varaiya, "TDMA Scheduling Algorithms for Wireless Sensor Networks", March 12, 2009

[17] Nicos Gollan, Jens B. Schmitt, "Energy-Efficient TDMA Design Under Real-Time Constraints in Wireless Sensor Networks"

[18] Yong-Hee Jeon, "QoS Requirements for the Smart Grid Communications System", IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.11 No.3, March 2011

[19] *Jayant G. Deshpande, Eunyoung Kim, and Marina Thottan*, "Differentiated Services QoS in Smart Grid Communication Networks", Bell Labs Technical Journal 16(3), 61–82 (2011) © 2011 Alcatel-Lucent



