



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΥΛΛΟΓΗΣ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΔΙΚΤΥΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΜΑΡΓΑΡΙΤΗ ΙΩΑΝΝΗ**

Επιβλέπων: Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΥΛΛΟΓΗΣ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΔΙΚΤΥΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΜΑΡΓΑΡΙΤΗ ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13^η Οκτωβρίου 2021.

Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Γεώργιος Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Μαργαρίτης Ιωάννης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Μαργαρίτης Ιωάννης, 2021.

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

Στην εργασία αυτή μελετώνται οι τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται από τα συστήματα ευφυούς μέτρησης για διάφορες περιπτώσεις εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τα πληθυσμιακά και πολεοδομικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής, αλλά και την τοπολογία του δικτύου, και αντιστοιχίζονται στις κατάλληλες τηλεπικοινωνιακές λύσεις.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες των συστημάτων ευφυούς μέτρησης. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά του έξυπνου δικτύου, καθώς και του Mobile Edge Computing. Τέλος αναφέρονται ορισμένες εφαρμογές του ευφυούς ενεργειακού δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται και αναλύονται οι τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο έξυπνο δίκτυο. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι διάφορες τοπολογίες δικτύου (mesh, star, tree topology) και, τέλος, αναλύονται ορισμένες βασικές λειτουργίες των ευφύων μετρητών που χρησιμεύουν στην ομαλή μετάδοση των δεδομένων στο δίκτυο.

Στο Κεφάλαιο 3 μελετώνται οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας του κάθε δικτύου και της κάθε εφαρμογής, και συγκρίνονται οι τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στα Κεφάλαια 4 αναλύονται οι περιπτώσεις λειτουργίας συστημάτων ευφυούς μέτρησης σε αστικό περιβάλλον. Γίνεται, επίσης, διαφοροποίηση των ευφύων μετρητών νερού από τους αντίστοιχους ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 γίνεται ανάλυση της περίπτωσης επικοινωνίας χωρίς τη χρήση συγκεντρωτών μέσω των κυψελωτών δικτύων.

Λέξεις Κλειδιά

Έξυπνος μετρητής, έξυπνο δίκτυο, δίκτυο πρόσβασης, δίκτυο κορμού, συγκεντρωτής δεδομένων, τοπολογίες δικτύου, κυψελωτά δίκτυα, PLC, 4G/5G, έξυπνος μετρητής νερού

Abstract

The scope of thesis is to study the telecommunication networks used by smart metering systems for various application cases. Cases are categorized according to the population and urban characteristics of each area and the network topology. Then, an appropriate telecommunication solution is applied.

1st Section is an introduction to the basic concepts of smart metering. Some characteristics of smart grid and Mobile Edge Computing are also analyzed. Finally, applications of smart energy grid are discussed.

2nd Section presents and analyzes the telecommunication technologies used in smart grid. In addition, network topologies (mesh, star, tree topology) are presented and, finally, some basic smart meter functions for smooth data transmission are discussed.

3rd Section studies the quality of service requirements of each network and each application, and compares the telecommunication technologies studied in the previous section.

4th Section analyzes the function of smart metering systems in urban environment. The differentiation of smart water meters from the corresponding electricity and gas is also discussed.

Finally, 5th Section studies the case of communication without the use of data concentrators, and through cellular networks.

Key Words

Smart meter, smart grid, access network, backhaul network, data concentrator, network topologies, cellular networks, PLC, 4G/5G, smart water meter

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Παναγιώτη Κωττή για την ευκαιρία να πραγματοποιήσω τη διπλωματική μου εργασία υπό την επίβλεψή του. Η βοήθεια και η καθοδήγησή του ήταν απαραίτητες για την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις ευκαιρίες και τις συμβουλές που μου προσέφερε, οι οποίες θα με βοηθήσουν στην πορεία μου ως μηχανικός.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλους όσους ήταν δίπλα μου αυτά τα χρόνια των σπουδών μου στο ΕΜΠ. Την οικογένειά μου που με στήριζαν και θα με στηρίζουν σε όλη τη ζωή μου, και όλους όσους μοιράστηκαν μαζί μου πολλές από τις στιγμές τα 5 αυτά χρόνια.

Περιεχόμενα

1	Κεφάλαιο: Εισαγωγή στους έξυπνους μετρητές	9
1.1	Χαρακτηριστικά των έξυπνων μετρητών	9
1.2	Το έξυπνο δίκτυο και η θέση των έξυπνων μετρητών σε αυτό .	10
1.3	Mobile Edge Computing-MEC, Cloud Computing	11
1.4	Κατάσταση και εξέλιξη των έξυπνων μετρητών σε διάφορες χώρες	12
1.5	Άλλες εφαρμογές των ευφυών μετρητών	13
2	Κεφάλαιο: Τεχνολογίες έξυπνων μετρητών	14
2.1	Advanced Metering Infrastructure	14
2.2	Τρόποι επικοινωνίας στο Smart Grid	15
2.2.1	Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο πρόσβασης	16
2.2.2	Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο κορμού .	19
2.2.3	Διεπαφή μεταξύ δικτύου πρόσβασης και δικτύου κορμού	21
2.3	Τοπολογίες Δικτύου	22
2.4	Βασικές λειτουργίες έξυπνου μετρητή	24
2.4.1	Έλεγχος δρομολόγησης κίνησης	24
2.4.2	Καταμερισμός φορτίου	25
2.4.3	Περιορισμός φορτίου	25
2.4.4	Διασπορά χρόνων μετάδοσης	26
2.4.5	Έλεγχος προτεραιότητας	27
2.4.6	Λειτουργία πολλαπλών καναλιών	27
2.4.7	Διαχείριση Δικτύου	28
2.5	Ασφάλεια και ιδιωτικότητα	28
2.5.1	Αδυναμίες στο έξυπνο δίκτυο	29
2.5.2	Στόχοι ασφάλειας	30
2.5.3	Στόχοι ιδιωτικότητας	31
3	Κεφάλαιο: Προδιαγραφές έξυπνων μετρητών	32
3.1	Απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας	32
3.1.1	Απαιτήσεις ποιότητας ανά δίκτυο	32
3.1.2	Απαιτήσεις ποιότητας ανά εφαρμογή	33
3.2	Σύγκριση τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών	35
3.3	Περιοχές εφαρμογής	36
4	Κεφάλαιο: Έξυπνοι μετρητές στις αστικές περιοχές	38
4.1	Χαρακτηριστικά αστικών περιοχών	38
4.2	Τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες στις αστικές περιοχές	38
4.2.1	Περιοχές υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας	38
4.2.2	Περιοχές μέτριας πληθυσμιακής πυκνότητας	41
4.2.3	Περιοχές μικρής πληθυσμιακής πυκνότητας	42

4.3	Διαχείριση κίνησης	43
4.3.1	Σημεία εγκατάστασης μετρητών και συγκεντρωτών . . .	43
4.3.2	Υπολογισμός όγκου παραγόμενης κίνησης	44
4.3.3	Λειτουργία σε περίπτωση βλάβης	46
4.4	Έξυπνοι μετρητές φυσικού αερίου	47
4.5	Έξυπνοι μετρητές νερού	47
4.5.1	Πλεονεκτήματα SWM	47
4.5.2	Επισκόπηση τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών	48
5	Κεφάλαιο: Επικοινωνία χωρίς συγκεντρωτές	52
5.1	Θέση εγκατάστασης και τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες SM . .	52
5.2	P2P έξυπνοι μετρητές	52
5.3	Πλεονεκτήματα χρήσης κυψελωτών δικτύων στο smart grid . .	53
5.4	5G κυψελωτά δίκτυα	54

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Mobile Edge Computing	12
2.1	Advanced Metering Infrastructure	14
2.2	Τα κύρια μέρη του SG[6]	16
2.3	Διεπαφή μεταξύ δικτύου πρόσβασης και δικτύου κορμού	21
2.4	Εναλλακτική δρομολόγηση σε περίπτωση δικτύου τοπολογίας πλέγματος[1]	22
2.5	Δίκτυο τοπολογίας αστέρα[1]	23
2.6	Εναλλακτική διαδρομή σε περίπτωση αστοχίας	26
2.7	Διασπορά χρόνων μετάδοσης	26
2.8	Εισαγωγή προτεραιότητας	27
2.9	Λειτουργία πολλαπλών καναλιών	28
3.1	Βασικές εφαρμογές του SG ανά δίκτυο [11]	33
4.1	Χρήση PLC με τοπολογία αστέρα	39
4.2	Χρήση PLC με τοπολογία δέντρου	40
4.3	Επικοινωνία με γειτονικούς μετρητές	40
4.4	Επικοινωνία με χρήση ZigBee	41
4.5	Τοποθέτηση συγκεντρωτών με εκμετάλλευση της υποδομής κινητών επικοινωνιών (κόκκινοι σύνδεσμοι) και της υποδομής του δικτύου φωτισμού (μπλε σύνδεσμοι) [13]	43
4.6	Λειτουργία σε περίπτωση βλάβης/συντήρησης υποσταθμού	46
4.7	Δεδομένα που παρέχουν οι SWM [16]	48
4.8	Τοπολογία δικτύου WM-Bus [17]	49
4.9	Αρχιτεκτονική δικτύου LoRa [19]	50
5.1	Αναπαράσταση κυψέλης έξυπνου δικτύου	53

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Διαφορές έξυπνου και συμβατικού δικτύου[2]	10
2.1	Ροές πληροφορίας σε σύστημα SM	24
3.1	Απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης του κάθε δικτύου [6]	32
3.2	Χαρακτηριστικά σημαντικότερων εφαρμογών SG [11].	35
3.3	Χαρακτηριστικά ενσύρματων τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών [12]	35
3.4	Χαρακτηριστικά ασύρματων τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών [12]	36
3.5	Κατάλληλες τεχνολογίες ανά περιοχή εφαρμογής	37

1 Κεφάλαιο: Εισαγωγή στους έξυπνους μετρητές

1.1 Χαρακτηριστικά των έξυπνων μετρητών

Οι έξυπνοι μετρητές (Smart Meters - SM) είναι προηγμένοι μετρητές με δυνατότητα καταγραφής της ηλεκτρικής ενέργειας, του νερού, του φυσικού αερίου και της θερμότητας των συσκευών του καταναλωτή. Τα δεδομένα αυτά που συλλέγονται από τους μετρητές αποστέλλονται στο κέντρο διαχείρισης δεδομένων - μετρητών (Meter Data Management System - MDMS), το οποίο μπορεί να στείλει εντολές για απομακρυσμένο έλεγχο των μετρητών.

Το δίκτυο επικοινωνίας των έξυπνων μετρητών έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά[1]:

- *Αξιόπιστη μετάδοση και συλλογή δεδομένων:* Τα δεδομένα των μετρητών από πολλούς καταναλωτές χρειάζεται να μεταδοθούν στο κέντρο διαχείρισης δεδομένων.
- *Ασφάλεια των δεδομένων:* Τα δεδομένα περιέχουν προσωπικές πληροφορίες του καταναλωτή (όπως την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, νερού και φυσικού αερίου), επομένως πρέπει να προστατευθούν από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και διαρροή τους.
- *Λειτουργία για μεγάλο χρονικό διάστημα:* Προκειμένου να είναι οικονομικά προσιτή λύση, και δεδομένου ότι ο έξυπνος μετρητής θα χρησιμοποιείται διαρκώς, το τηλεπικοινωνιακό σύστημα πρέπει να λειτουργεί για αρκετά χρόνια.
- *Κατασκευή και διατήρηση με χαμηλό κόστος:* Δεδομένου ότι χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός έξυπνων μετρητών, το κόστος διατήρησης του δικτύου, όσο και το κόστος αγοράς του μετρητή, πρέπει να βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα.

Οι μετρητές καταγράφουν τα δεδομένα σχεδόν σε πραγματικό χρόνο και είναι διαθέσιμα τόσο στον πάροχο όσο και στον καταναλωτή. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα αποσύνδεσης - επανασύνδεσης ορισμένων φορτίων του καταναλωτή, ανάλογα με την κατανάλωση ενέργειας. Έτσι, οι καταναλωτές έχουν δυνατότητα να περιορίσουν τη χρήση ενέργειας τις ώρες υπερφόρτωσης του δικτύου. Σημαντική, επίσης, είναι και η λεπτομερής τιμολόγηση που λαμβάνουν, αφού οι έξυπνοι μετρητές έχουν δυνατότητα καταγραφής της ενέργειας που καταναλώνει κάθε συσκευή.

Η βασική λειτουργία των SM είναι η μέτρηση ορισμένων μεγεθών και η αποστολή τους στο κέντρο διαχείρισης δεδομένων. Οι μετρήσεις αυτές δεν αφορούν μόνο τους καταναλωτές, αλλά και το ίδιο το δίκτυο, όπως ο εντοπισμός βλάβης και η διαχείριση της κίνησης. Επιπλέον οι SM είναι σε θέση να δέχονται εντολές από το MDMS, προκειμένου να διορθωθεί κάποιο σφάλμα στο δίκτυο ή στα ίδια τα τερματικά. Έτσι, οι πάροχοι έχουν τη δυνατότητα για αποτελεσματική και οικονομική χρήση των πόρων του δικτύου. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα για καλύτερη χρήση του φορτίου κατά τις ώρες υπερφόρτωσης του δικτύου προς αποφυγή δυσλειτουργιών ή σφαλμάτων[2].

1.2 Το έξυπνο δίκτυο και η θέση των έξυπνων μετρητών σε αυτό

Το έξυπνο δίκτυο (Smart Grid - SG) αποτελείται από τα παρακάτω κύρια υποσυστήματα:

- *Έξυπνη υποδομή:* Το υποσύστημα αυτό υποστηρίζει: 1) προηγμένη παραγωγή, διανομή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, 2) εύκολη παρακολούθηση και διαχείριση του δικτύου και 3) άμεση επικοινωνία μεταξύ των μετρητών αλλά και με το κέντρο διαχείρισης.
- *Έξυπνο σύστημα διαχείρισης:* Το υποσύστημα αυτό παρακολουθεί το δίκτυο για την εύκολη διαχείρισή του καθώς και τον έλεγχό του.
- *Έξυπνο σύστημα προστασίας:* Το υποσύστημα αυτό προστατεύει το δίκτυο από βλάβες και απόπειρες κλοπής των δεδομένων, ενώ ελέγχει την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του.

Στα παραδοσιακά δίκτυα, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από λίγες κεντρικές γεννήτριες στο μεγάλο αριθμό καταναλωτών. Αντιθέτως, τα ευφυή δίκτυα χρησιμοποιούν αμφίδρομη επικοινωνία πληροφορίας, ώστε να δημιουργηθεί ένα αυτόματο και κατανομημένο ενεργειακό δίκτυο. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται ορισμένες διαφορές μεταξύ του υπάρχοντος δικτύου και του ευφυούς δικτύου:

Υπάρχον Δίκτυο	Smart Grid
Ηλεκτρομηχανικό	Ψηφιακό
Μονόδρομη Επικοινωνία	Αμφίδρομη Επικοινωνία
Κεντρική Παραγωγή	Κατανομημένη Παραγωγή
Λίγοι αισθητήρες	Αισθητήρες σε όλο το μήκος

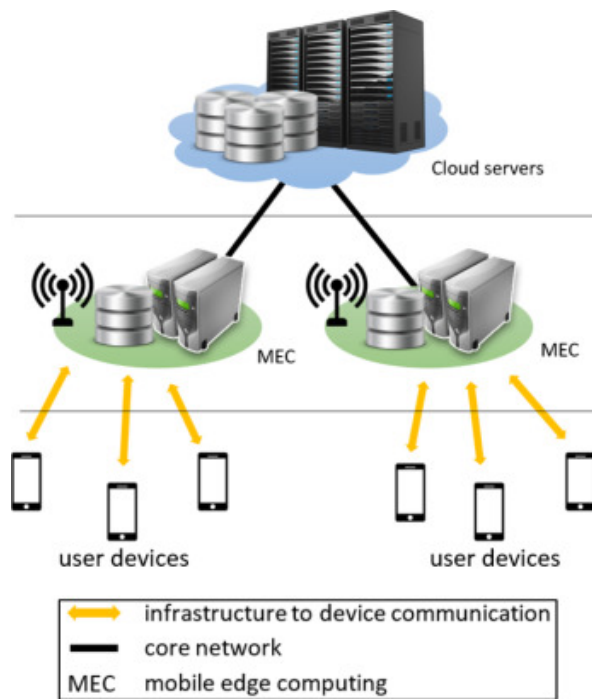
Πίνακας 1.1: Διαφορές έξυπνου και συμβατικού δικτύου[2]

Οι αισθητήρες κατά μήκος του δικτύου επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση του και άμεση αναφορά σφαλμάτων ή πιθανής κλοπής των δεδομένων. Η άμεση παρακολούθηση του δικτύου καθιστά δυνατή και τη γνώση αναλογίας προσφοράς και ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό αποτελεί βασικό παράγοντα της αποτελεσματικής διαχείρισης των πόρων του ηλεκτρικού δικτύου. Μέσω ευφυών τερματικών παρακολουθούνται και τα απομακρυσμένα σημεία, όπως μετασχηματιστές ή υποσταθμοί. Αξίζει, επίσης, να αναφερθεί ότι το SG μειώνει την αρνητική επίδραση στο περιβάλλον ενός παραδοσιακού δικτύου. Αυτό συμβαίνει επειδή ευνοείται η χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας κατά την παραγωγή, αλλά και επειδή οι εκπομπές CO₂ είναι περιορισμένες, σε μερικά μόνο σημεία του δικτύου.

1.3 Mobile Edge Computing-MEC, Cloud Computing

Ο όγκος των δεδομένων που παράγονται σε ένα SG είναι τεράστιος, καθώς αφορά μετρήσεις ενέργειας καταναλωτών, αλλά και εσωτερικές του δικτύου. Η ανάγκη για μεταφορά, αποθήκευση, επεξεργασία και διαθεσιμότητα των δεδομένων δημιουργεί προβλήματα όσον αφορά τις παραδοσιακές βάσεις δεδομένων. Η λύση σε αυτήν την περίπτωση δίνεται από το cloud computing. Πρόκειται για μια τεχνολογία που επιτρέπει την on-demand πρόσβαση σε υπολογιστικούς πόρους (κυρίως αποθηκευμένα δεδομένα), χωρίς καποια διαχειριστική προσπάθεια από την πλευρά του χρήστη. Το χαμηλό κόστος απόδοσης του cloud computing, σε συνδυασμό με τη σχεδόν απεριόριστη δυνατότητα αποθήκευσης, το καθιστούν την καλύτερη λύση στα πιο πάνω προβλήματα.

Στα παραδοσιακά συστήματα οι εξυπηρετητές cloud βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία του δικτύου. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι τα μηνύματα μεταφέρονται μέσα από το δίκτυο κορμού, δημιουργεί μεγάλη καθυστέρηση στην λήψη της πληροφορίας, ειδικά όταν πολλοί χρήστες χρησιμοποιούν το δίκτυο. Για τους λόγους αυτούς είναι αναγκαία η χρήση του Mobile Edge Computing-MEC. Το MEC ουσιαστικά προσφέρει υπηρεσίες cloud computing στα άκρα του κυβελωτού δικτύου και εγγύτερα στο χρήστη. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται κοντά στους χρήστες, οπότε μειώνεται η καθυστέρηση, ενώ πλέον δεν χρειάζεται μεταφορά όλων των μηνυμάτων μέσω του δικτύου κορμού, επομένως μειώνεται η συμφόρηση και οι εφαρμογές λειτουργούν καλύτερα. Τα δεδομένα των εφαρμογών οι οποίες είναι ανεκτικές σε καθυστέρηση μπορούν να σταλούν στα άκρα του δικτύου για να εξυπηρετηθούν[3]. Παρακάτω φαίνεται η τοπολογία ενός δικτύου MEC:



Σχήμα 1.1: Mobile Edge Computing

1.4 Κατάσταση και εξέλιξη των έξυπνων μετρητών σε διάφορες χώρες

- *Ευρωπαϊκή Ένωση:* Η Ιταλία είναι πρωτοπόρος της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην ανάπτυξη έξυπνων μετρητών έχοντας πάνω από 35 εκατομμύρια μετρητές σε λειτουργία. Έχουν ήδη μελετηθεί και αναπτυχθεί μετρητές δεύτερης γενιάς, αποδοτικότεροι από τους απλούς έξυπνους μετρητές, καθώς και με περισσότερες λειτουργίες. Μέχρι το τέλος του 2022 οι έξυπνοι μετρητές πρώτης γενιάς θα έχουν αντικατασταθεί από δεύτερης, και στα τέλη της δεκαετίας του 2020 θα έχει γίνει εγκατάσταση επιπλέον 41 εκατομμυρίων 2G έξυπνων μετρητών.

Σε χώρες της δυτικής Ευρώπης, όπως η Γαλλία και η Ολλανδία, έχει ξεκινήσει η αντικατάσταση των συμβατικών μετρητών με στόχο κάλυψη 80% μέχρι το 2025 σε μετρητές ρεύματος και 50% σε μετρητές φυσικού αερίου. Η Σουηδία και η Φινλανδία έχουν ως στόχο την εγκατάσταση μετρητών δεύτερης γενιάς μέχρι το 2024 σε ποσοστό κάλυψης 35%.

Αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση της Εσθονίας, όπου στην τριετία 2017-2020 έγινε εγκατάσταση έξυπνων μετρητών για το 90% των καταναλωτών. Οι υπόλοιπες χώρες της ανατολικής Ευρώπης πρόκειται να ακολουθήσουν τον ίδιο δρόμο ώστε στο τέλος της πενταετίας 2021-2025 να καλύπτουν περίπου το 50% των έξυπνων μετρητών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

- *Ασία:* Πάνω από 570 εκατομμύρια έξυπνοι μετρητές ρεύματος και φυσικού αερίου θα εγκατασταθούν στην Κίνα, την Ινδία, την Ιαπωνία και τη Νότια Κορέα την πενταετία 2021-2025. Η Κίνα αποτελεί τη μεγαλύτερη αγορά, αφού έχει ολοκληρώσει την πρώτη φάση αντικατάστασης των συμβατικών μετρητών σε εθνικό επίπεδο. Ακολουθούν η Ιαπωνία και η Νότια Κορέα, ενώ η Ινδία θα έχει τη μεγαλύτερη ανάπτυξη, αφού έχουν τοποθετηθεί έξυπνοι μετρητές μόλις στο 1% των καταναλωτών.
- *Αμερική:* Στις μεγαλύτερες αγορές (Ηνωμένες Πολιτείες και Καναδάς), στο τέλος της πενταετίας 2021-2025, η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών θα αυξηθεί και θα φτάσει σε κάλυψη περίπου 90% των καταναλωτών σε εθνικό επίπεδο από 65% που ήταν στο τέλος του 2020. Το Μεξικό και η Βραζιλία θα έχουν εγκαταστήσει 30 εκατομμύρια έξυπνους μετρητές ρεύματος μέχρι το τέλος του 2025. Η περιοχή της Λατινικής και Κεντρικής Αμερικής δεν έχει τις κατάλληλες υποδομές για τους έξυπνους μετρητές νερού, οι οποίοι προβλέπεται να εγκατασταθούν μετά το 2030.

1.5 Άλλες εφαρμογές των ευφυών μετρητών

Η ανάπτυξη των έξυπνων μετρητών, αλλά και του δικτύου επικοινωνίας τους, επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών που έχουν άμεσο αντίκτυπο στην καθημερινότητά μας. Ενδεικτικά, η άμεση συλλογή και διαχείριση των δεδομένων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη αισθητήρων που σχετίζονται με[4]:

- Smart cities
- Smart environment
- Smart water
- Smart security and emergencies
- Smart retail
- Smart logistics
- Smart industrial control
- Smart agriculture
- Home automation
- eHealth

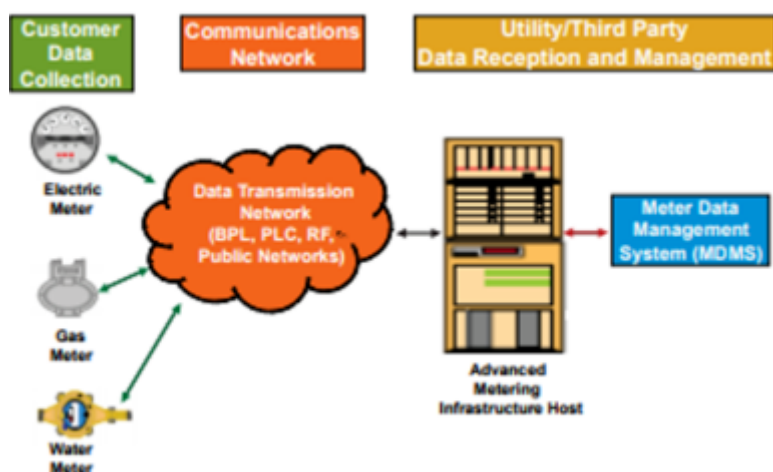
Πολλές εφαρμογές έχουν ήδη τεθεί σε λειτουργία αναφορικά με παρακολούθηση θέσεων στάθμευσης και ρύθμιση της κίνησης (Smart cities), εντοπισμό πυρκαγιών και μόλυνση του αέρα (Smart environment) κλπ. Καθώς οι έξυπνοι μετρητές εξελίσσονται, όλο και περισσότερες εφαρμογές θα γίνονται αποδοτικότερες.

2 Κεφάλαιο: Τεχνολογίες έξυπνων μετρητών

2.1 Advanced Metering Infrastructure

Το Advanced Metering Infrastructure (AMI), είναι το υποσύστημα του SG το οποίο μετράει, συλλέγει και αναλύει τα δεδομένα μέσω των SM. Αποτελείται από τους έξυπνους μετρητές στην πλευρά του καταναλωτή, τα δίκτυα επικοινωνιών προκειμένου να συνδεθούν τα δύο άκρα, το MDMS, και τα μέσα με τα οποία οι πάροχοι παραλαμβάνουν και επεξεργάζονται τα δεδομένα που συλλέγονται[5].

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η δομή του AMI. Ο καταναλωτής έχει τοποθετήσει έξυπνους μετρητές που συλλέγουν τα δεδομένα (οι μετρητές μπορούν να είναι ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου ή νερού). Οι μετρητές αυτοί μπορούν να μεταδώσουν τα δεδομένα μέσω των διαθέσιμων δικτύων όπως Broadband over Power Line (BPL), Power Line Communications (PLC), Fixed Radio Frequency (RF), δημόσια δίκτυα κτλ. Τα δεδομένα των μετρητών παραλαμβάνονται από τον δέκτη του AMI και στη συνέχεια αποστέλλονται στο MDMS το οποίο διαχειρίζεται την αποθήκευση και την ανάλυσή τους προκειμένου να στείλουν στον πάροχο χρήσιμες πληροφορίες. Το AMI υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία επομένως είναι δυνατή η επικοινωνία από τον πάροχο προς τον μετρητή.



Σχήμα 2.1: Advanced Metering Infrastructure

Πλεονεκτήματα AMI : Για τον καταναλωτή σημαίνει περισσότερες επιλογές όσον αφορά το κόστος και τις υπηρεσίες και καλύτερες πληροφορίες

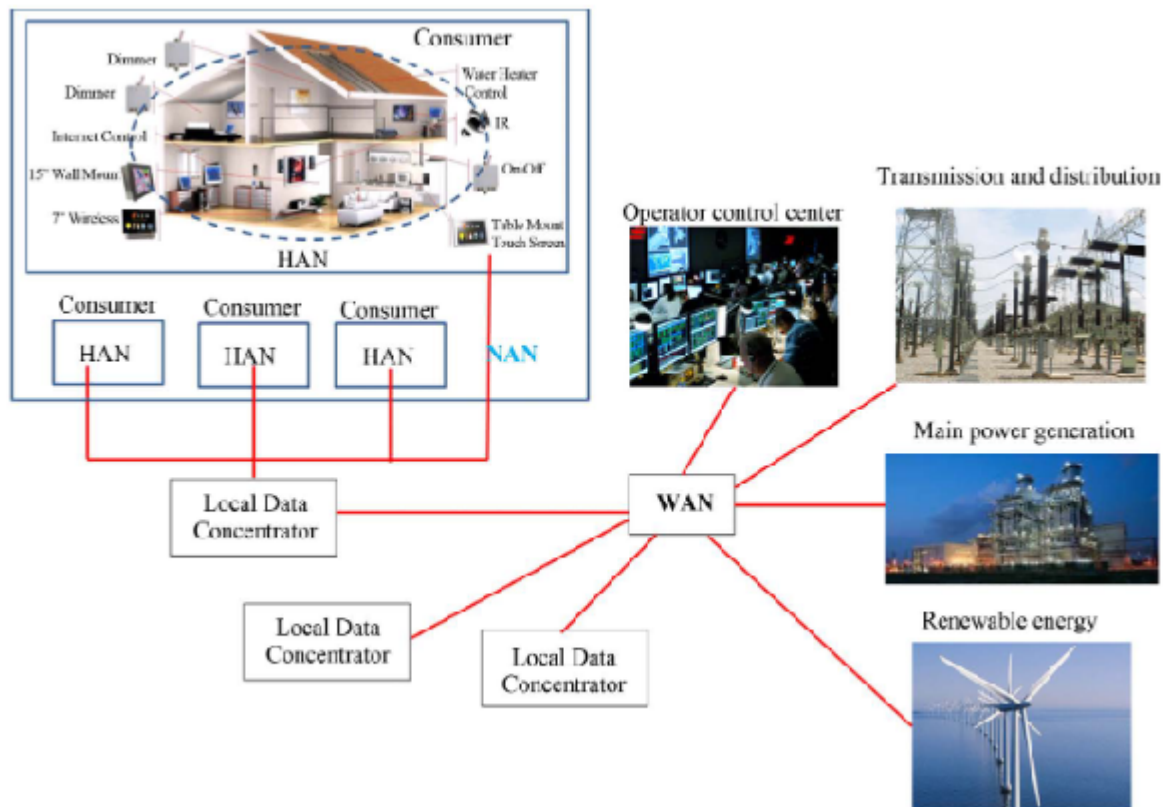
για τη διαχείριση της κατανάλωσης των συσκευών. Υπάρχει επίσης καλύτερη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος. Επιπλέον το AMI θα μειώσει το κόστος των παρόχων, επομένως και τις τιμές της κατανάλωσης (ρεύματος, νερού, φυσικού αερίου). Οι πάροχοι εκτός από την ακριβή κοστολόγηση, αποφεύγουν χρεώσεις που έχουν να κάνουν με την ανάγνωση των μετρητών όπως εκπαίδευση υπαλλήλων, οχήματα κλπ. Με το AMI ο πάροχος μπορεί να συνδεθεί αυτόματα στον έξυπνο μετρητή και να επιδιορθώσει βλάβες ή συνδέσει και να αποσυνδέσει υπηρεσίες χωρίς να στείλει προσωπικό στο χώρο του καταναλωτή.

2.2 Τρόποι επικοινωνίας στο Smart Grid

Το επικοινωνιακό σύστημα είναι απαραίτητο στοιχείο του έξυπνου δικτύου, το οποίο χρησιμοποιεί ασύρματους και ενσύρματους τρόπους μετάδοσης. Σε ένα έξυπνο δίκτυο υπάρχουν 3 βασικά δίκτυα ανάλογα με την περιοχή κάλυψης[6]:

- HAN (Home Area Network) : Είναι το δίκτυο στην οικία του καταναλωτή όπου όλες οι συσκευές του σπιτιού είναι συνδεδεμένες.
- NAN (Neighborhood Area Network) : Είναι το δίκτυο το οποίο έχει περιοχή κάλυψης μερικές εκατοντάδες μέτρα και περιέχει αρκετά κτήρια. Τα HAN που βρίσκονται εντός της εμβέλειας του δικτύου συνδέονται σε αυτό και στέλνουν τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από τους SM. Τα δεδομένα αυτά οδηγούνται στον τοπικό συγκεντρωτή μέσω του NAN .
- WAN (Wide Area Network) : Είναι το δίκτυο το οποίο έχει περιοχή κάλυψης δεκάδες χιλιόμετρα και περιέχει αρκετά NAN. Το WAN στηρίζει την επικοινωνία μεταξύ των δομικών στοιχείων του SG όπως του κέντρου ελέγχου και της παραγωγής, μεταφοράς και κατανομής ενέργειας. Μέσω αυτού, τα δεδομένα μεταφέρονται από τους τοπικούς συγκεντρωτές στο MDMS.

Κάθε ένα από τα παραπάνω δίκτυα έχει τη δική του περιοχή κάλυψης, διαχειρίζεται διαφορετικό όγκο δεδομένων και εξυπηρετεί άλλες εφαρμογές. Επομένως, χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνολογίες για την επικοινωνία σε κάθε δίκτυο. Το τμήμα του δικτύου που περιέχει τα HAN και NAN (δηλαδή το τμήμα μέχρι τον τοπικό συγκεντρωτή) ονομάζεται δίκτυο πρόσβασης. Το υπόλοιπο ονομάζεται δίκτυο κορμού. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα κύρια μέρη της τηλεπικοινωνιακής υποδομής του έξυπνου δικτύου.



Σχήμα 2.2: Τα κύρια μέρη του SG[6]

2.2.1 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο πρόσβασης

Στη συνέχεια αναφέρονται οι καταλληλότεροι τρόποι επικοινωνίας στο δίκτυο πρόσβασης ([7],[8]):

- ZigBee** : Το ZigBee βασίζεται στο πρωτόκολλο IEEE 802.15. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που χρειάζονται μικρό ρυθμό μετάδοσης, χαμηλό κόστος και ασφαλές δίκτυο. Ορισμένες από αυτές είναι οι ασύρματοι διακόπτες, ηλεκτρικοί μετρητές εντός της οικίας, συστήματα διαχείρισης κυκλοφορίας και, γενικότερα, όπου απαιτείται αποστολή δεδομένων σε κοντινή εμβέλεια, με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης. Το ZigBee επιτρέπει τη σύνδεση έως και 60.000 συσκευών στο δίκτυό του. Επιτρέπει ρυθμούς μετάδοσης από 20 μέχρι 250 Kbps, έχει εύρος ζώνης 2.6 GHz, 16 κανάλια και μέγιστη ισχύ εξόδου 0 dBm. Το ZigBee δημιουργήθηκε για να είναι απλούστερο και φθηνότερο από άλλα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (wireless personal area networks - WPAN), όπως το Bluetooth και το WiFi, και τα δίκτυά του προστατεύονται από συμμετρικό κλειδί μήκους 128bits.

Τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτυχθεί η εφαρμογή "ZigBee Smart Energy", η οποία επιτρέπει την ενσωμάτωση SM σε ένα ZigBee δίκτυο μαζί

με άλλες συσκευές. Μέσω αυτής της εφαρμογής, οι μετρητές μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από τις υπόλοιπες συσκευές του δικτύου.

Τα πλεονεκτήματα του ZigBee σε ένα έξυπνο δίκτυο είναι το χαμηλό κόστος, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος και το σχετικά μικρό εύρος ζώνης. Τα μειονεκτήματα είναι η χαμηλή ζωή της μπαταρίας, οι πιθανές παρεμβολές από άλλες συσκευές στις ίδιες συχνότητες και οι περιορισμοί λόγω χαμηλών ρυθμών μετάδοσης. Επίσης δεν είναι εύκολο να υποστηρίξει εφαρμογές μη ανεκτικές σε καθυστέρηση, οι οποίες χρειάζονται υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

- *Bluetooth* : Το Bluetooth είναι ασύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για ανταλλαγή δεδομένων σε μικρές αποστάσεις μεταξύ συσκευών. Χρησιμοποιεί τη ζώνη 2.402 - 2.48 GHz και φτάνει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 3 Mbps. Υπάρχουν διαφορετικές κλάσεις του Bluetooth ανάλογα με την απόσταση των συσκευών, οι οποίες διαφοροποιούν την ισχύ που καταναλώνεται για μετάδοση της πληροφορίας. Τα πλεονεκτήματα του Bluetooth είναι το χαμηλό κόστος, η χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος μεταξύ των ασύρματων τεχνολογιών, καθώς και ότι αποφεύγονται οι παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές. Υπάρχουν και σημαντικά μειονεκτήματα όπως η έλλειψη ασφάλειας στη μετάδοση των δεδομένων, το μικρό εύρος ζώνης (το οποίο περιορίζει τις εφαρμογές που μπορεί να υποστηρίξει) και η μικρή περιοχή κάλυψης.
- *Wi-Fi* : Το Wi-Fi είναι ασύρματη τεχνολογία που ορίζεται από τα πρωτόκολλα IEEE 802.11. Χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων 2.4 - 5 GHz και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εξαρτάται από το πρωτόκολλο καθώς κυμαίνεται από 1 Mbps σε εξωτερική χρήση έως 150 Mbps. Χρησιμοποιείται κυρίως στις οικίες καθώς χαρακτηρίζεται από εύκολη πρόσβαση στο διαδίκτυο, και η εμβέλειά του (30 - 100 μέτρα) είναι κατάλληλη για το σκοπό αυτό. Στο έξυπνο δίκτυο, το Wi-Fi συνδέει τις συσκευές, και μέσω ενός σημείου πρόσβασης επιτρέπει σύνδεση στο διαδίκτυο και τη διαχείριση της κατανάλωσης ισχύος τους. Τα πλεονεκτήματα του Wi-Fi είναι το χαμηλό κόστος, ο υψηλός ρυθμός διάδοσης και η μεγαλύτερη ακτίνα κάλυψης από τα υπόλοιπα ασύρματα πρωτόκολλα. Τα βασικά μειονεκτήματα είναι η υψηλή κατανάλωση ισχύος, καθώς και οι παρεμβολές από συσκευές που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες.
- *Cellular Networks (Κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών)* : Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση για τη μεταφορά των

δεδομένων από τον έξυπνο μετρητή στον τοπικό συγκεντρωτή, καθώς οι περισσότερες χώρες έχουν έτοιμη την υποδομή. Μπορούν να επιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης (πάνω από 100Mbps) και υπάρχουν διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως οι GSM (Global System for Mobile Communications), GPRS (General Packet Radio Service), 3G, 4G, 5G, WiMAX. .

Η τεχνολογία WiMAX λειτουργεί στα 2.5 και 3.5 GHz με ρυθμό μετάδοσης 70Mbps. Οι βασικές λειτουργίες είναι ίδιες με το Wi-Fi, με διαφορά την περιοχή κάλυψης, αφού ενώ το Wi-Fi συνήθως δεν ξεπερνάει τα 100m, το WiMAX φτάνει τα 50km.

Τα πλεονεκτήματα των κυβελωτών δικτύων είναι η ήδη υπάρχουσα υποδομή η οποία είναι ανεπτυγμένη στα περισσότερα μέρη, ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης καθώς και οι ασφαλείς αλγόριθμοι κρυπτογράφησης που χρησιμοποιούνται.

Το βασικό μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι τα κυβελωτά δίκτυα δεν χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από το SG αλλά μοιράζεται και με άλλους χρήστες. Αυτό μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα κατά τις κρίσιμες ώρες του δικτύου.

- *Power Line Communications (PLC)* : Η τεχνολογία PLC χρησιμοποιεί το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να επιτευχθεί η ανταλλαγή δεδομένων μέσω των συσκευών. Υλοποιείται με πρόσθεση ενός διαμορφωμένου φέροντος στα ηλεκτρικά καλώδια. Ο ρυθμός μετάδοσης με χρήση OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) μπορεί να φτάσει αρκετά Mbps.

Το σύστημα αρχικά είχε σχεδιασθεί για μετάδοση σημάτων στα 50 και 60Hz, επομένως υπάρχει περιορισμένη δυνατότητα όσον αφορά επικοινωνία σε υψηλές συχνότητες. Υπάρχει επίσης πιθανότητα παρεμβολής του σήματος με υψηλές αρμονικές που παράγονται από μη γραμμικά φορτία όπως ανορθωτές, αντιστροφείς κλπ.

Στο SG χρησιμοποιείται κυρίως στο δίκτυο NAN για μετάδοση των δεδομένων από τον SM στον τοπικό συγκεντρωτή. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται κάποια άλλη τεχνολογία, όπως τα κυβελωτά δίκτυα, για μετάδοση στο MDMS.

Τα πλεονεκτήματα του PLC είναι το μηδενικό κόστος εγκατάστασης, καθώς η υποδομή υπάρχει ήδη, και η κάλυψη που παρέχει, ειδικά σε αστικές περιοχές.

Τα μειονεκτήματα είναι το θορυβώδες περιβάλλον (το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε παρεμβολές και αλλοίωση του σήματος που μας ενδιαφέρει), το περιορισμένο διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων, ενώ υπάρχουν και θέματα

ασφάλειας των δεδομένων.

- *Digital Subscriber Line (DSL)* : Η τεχνολογία DSL αξιοποιεί το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο για τη μετάδοση των δεδομένων. Υποστηρίζει υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ενώ το ήδη υπάρχον δίκτυο, ειδικά στις πυκνοκατοικημένες περιοχές, μειώνει το κόστος εγκατάστασης. Η ποιότητα της σύνδεσης DSL εξαρτάται από την απόσταση του χρήστη από το κοντινότερο τοπικό κέντρο, επομένως είναι δύσκολο να χαρακτηριστεί η απόδοση του δικτύου.

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας DSL είναι η υπάρχουσα υποδομή, η δυνατότητα υψηλών ρυθμών μετάδοσης και η διαθεσιμότητα στις αστικές, κυρίως, περιοχές.

Τα μειονεκτήματα είναι η αξιοπιστία του δικτύου, καθώς ο χρόνος που μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας σε κρίσιμες καταστάσεις θα έχει σοβαρές επιπτώσεις σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, και το γεγονός ότι υπάρχει εξάρτηση από την απόσταση του χρήστη από το τοπικό κέντρο.

2.2.2 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο κορμού

Η επικοινωνία στο WAN, από τον τοπικό συγκεντρωτή στα υπόλοιπα μέρη του SG, όπως το κέντρο ελέγχου, την παραγωγή ενέργειας κλπ, απαιτεί χρήση διαφορετικών τεχνολογιών. Ο αυξημένος όγκος δεδομένων, αλλά και η μεγαλύτερη απόσταση, καθιστούν απαγορευτικά τα ασύρματα πρωτόκολλα με μικρό εύρος ζώνης και εμβέλεια. Το τμήμα αυτό του δικτύου ονομάζεται δίκτυο κορμού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καταλληλότερες τεχνολογίες για μετάδοση δεδομένων στο δίκτυο κορμού([7],[8]):

- *Cellular Networks (Κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών)* : Τα κυψελωτά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταφορά δεδομένων στο κέντρο διαχείρισης. Τα χαρακτηριστικά τους έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Η διαφορά με τη χρήση τους στο δίκτυο πρόσβασης έγκειται στο γεγονός ότι το δίκτυο κορμού απαιτεί υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης καθώς και καλύτερη διαχείριση κίνησης. Επομένως, απαιτείται λειτουργία σε υψηλότερες συχνότητες, όπως η ζώνη του LTE (Long Term Evolution) και η ζώνη του 5G New Radio, όπου το διαθέσιμο εύρος ζώνης μπορεί να φτάσει το 100MHz και ο ρυθμός μετάδοσης τα 6Gbps.

- *Επικοινωνίες Οπτικών Ινών* : Οι οπτικές ίνες μεταφέρουν πληροφορία με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας. Είναι κατάλληλες για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, και προτιμούνται από τα ηλεκτρικά καλώδια, λόγω του φάσματος, της ανοσίας σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και της απουσίας θορύβου. Αυτό επιτρέπει στο σήμα να φτάσει στον προορισμό του με χρήση λίγων ενισχυτών, ανάλογα την απόσταση. Με χρήση διάφορων τεχνικών πολυπλεξίας (WDM, TDMA, OFDMA) μπορεί να επιτευχθεί ρυθμός μετάδοσης της τάξης των 1.6 Tbps.

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών είναι η αξιοπιστία της μετάδοσης, λόγω χαμηλού θορύβου και παρεμβολών, το χαμηλό κόστος των πρώτων υλών και των ενισχυτών, και οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι η απουσία υποδομής και τα μη γραμμικά φαινόμενα εντός της ίνας. Η οπτική ίνα είναι εύθραυστο υλικό, πράγμα που καθιστά δύσκολη και ακριβή την εγκατάστασή της σε αστικές περιοχές. Επιπλέον, το γεγονός ότι η ίνα δεν λυγίζει, την καθιστά δύσχρηστη για επικοινωνίες μικρών αποστάσεων σε αστικό περιβάλλον.

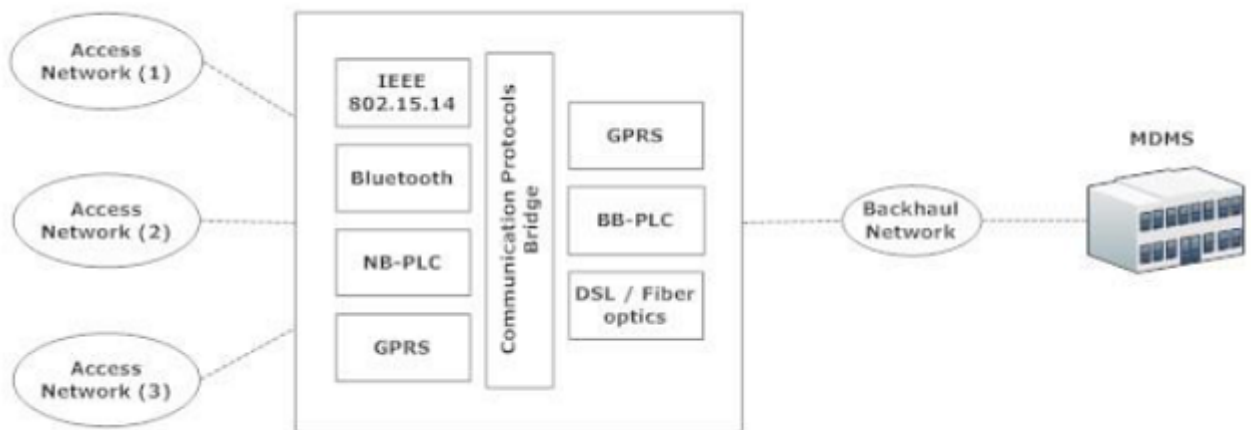
Κατά τη διάρκεια της μετάδοσης μπορεί να εμφανιστούν τα παρακάτω μη γραμμικά φαινόμενα: αλλαγή στη φάση και το πλάτος ορισμένων συνιστωσών, παραγωγή φωτονίων σε ορισμένες συχνότητες με κόστος ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος, παρεμβολές μεταξύ σημάτων διαφορετικής συχνότητας και πόλωσης, και διεύρυνση του φασματικού περιεχομένου του σήματος με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων συχνοτήτων. Είναι φανερό ότι πρόκειται για περίπλοκα φαινόμενα τα οποία πρέπει να αντισταθμιστούν για να είναι επιτυχής η μετάδοση.

- *DSL, PLC* : Τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αυτών έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση του δικτύου κορμού, με κόστος την ταχύτητα μετάδοσης σε σχέση με το δίκτυο πρόσβασης, λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων.
- *WiMAX*: Η τεχνολογία WiMAX μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς έχει μέγιστη ακτίνα κάλυψης τα 50km και μέσο ρυθμό μετάδοσης τα 75Mbps. Η απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας των εφαρμογών ικανοποιείται αν οι αποστάσεις δεν είναι μεγάλες, καθώς το Bit Error Rate αυξάνεται σημαντικά, πέρα από τα επιτρεπόμενα όρια, το οποίο οδηγεί σε μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Όπως σε όλα τα ασύρματα συστήματα, το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαμοιράζεται μεταξύ των χρηστών, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης τις κρίσιμες ώρες του δικτύου. Τέλος, το γεγονός ότι λειτουργεί στην ίδια περιοχή με το Wi Fi σημαίνει ότι θα υπάρχουν αμοιβαίες παρεμβολές

μεταξύ των χρηστών.

2.2.3 Διεπαφή μεταξύ δικτύου πρόσβασης και δικτύου κορμού

Από τα προηγούμενα, προκύπτει ότι υπάρχουν πολλές δυνατότητες για την επιλογή τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών στο δίκτυο πρόσβασης και στο δίκτυο κορμού. Η κατάλληλη επιλογή εξαρτάται από πολλές μεταβλητές όπως την απόσταση των κόμβων, το ρυθμό μετάδοσης, τις εφαρμογές που χρειάζεται να εξυπηρετηθούν, την πυκνότητα του πληθυσμού της περιοχής κτλ. Επομένως τα πρωτόκολλα επικοινωνίας διαφέρουν μεταξύ των δικτύων πρόσβασης, ενώ μπορεί να διαφέρουν και με το δίκτυο κορμού. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η χρήση διεπαφής μεταξύ των δικτύων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η χρήση διεπαφής μεταξύ του δικτύου πρόσβασης και του δικτύου κορμού:



Σχήμα 2.3: Διεπαφή μεταξύ δικτύου πρόσβασης και δικτύου κορμού

Η γεφύρωση των πρωτοκόλλων του δικτύου μέσω των διεπαφών πρέπει να υπάρχει στα σημεία που αλλάζει η τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Παρέχονται λειτουργίες που σχετίζονται με την μετατροπή των πακέτων σε μορφή η οποία υποστηρίζεται από το διαφορετικό πρωτόκολλο, διαχείρισης της κίνησης και αποφυγή συμφόρησης. Δεδομένου ότι το MDMS μπορεί να στείλει εντολές στους έξυπνους μετρητές μέσω του SG, η διεπαφή αυτή έχει αμφίδρομη συμπεριφορά.

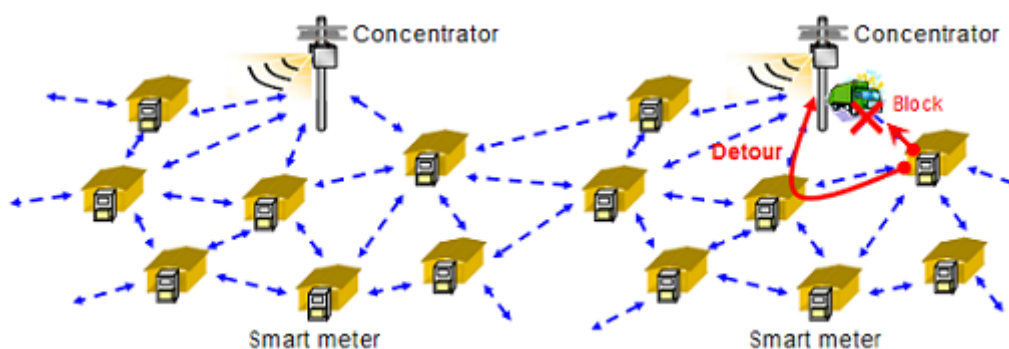
2.3 Τοπολογίες Δικτύου

Η τοπολογία του δικτύου εξαρτάται από τη θέση των έξυπνων μετρητών και τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούν μεταξύ τους. Οι κόμβοι του δικτύου (δηλαδή οι SM) χωρίζονται σε 2 κατηγορίες[9]:

- FFD (Full Function Device): Ονομάζονται οι κόμβοι οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν και ως συντονιστές του δικτύου. Έχει τη δυνατότητα καταγραφής δεδομένων από το εξωτερικό περιβάλλον και επικοινωνίας με οποιαδήποτε άλλη συσκευή.
- RFD (Reduced Function Device): Ονομάζονται οι κόμβοι οι οποίοι δεν μπορούν να λειτουργήσουν ως συντονιστές του δικτύου. Έχουν δυνατότητα καταγραφής απλών δεδομένων και επικοινωνούν μόνο με το συντονιστή του δικτύου.

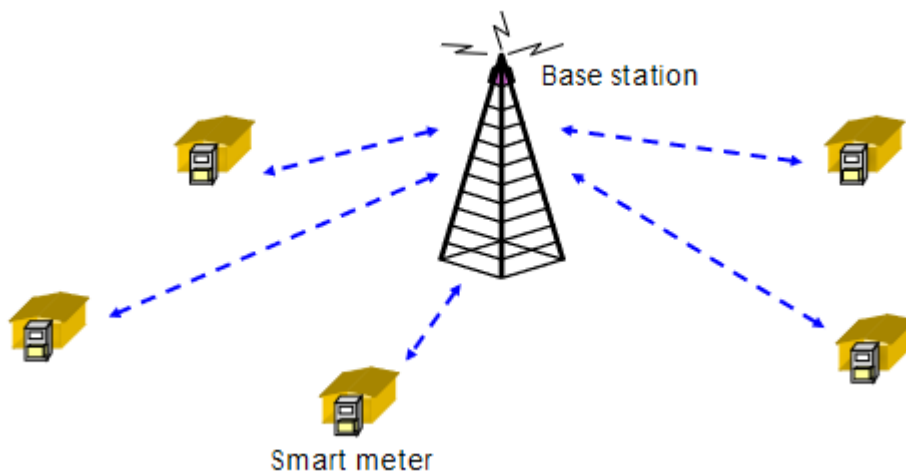
Οι 3 βασικές δικτυακές τοπολογίες που συναντώνται σε ένα SG είναι:

- *Mesh Topology* : Το δίκτυο πλέγματος αποτελεί μορφή δικτύου στην οποία οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους δυναμικά, άμεσα και μη-ιεραρχικά. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει δυναμική οργάνωση του δικτύου, και οι κόμβοι αποφασίζουν για τη βέλτιστη διαδρομή των δεδομένων μέχρι τον κόμβο-συντονιστή. Η ικανότητά τους αυτή είναι χρήσιμη στην περίπτωση που κάποιος κόμβος τεθεί εκτός λειτουργίας, όπου το δίκτυο αποφασίζει για τη νέα βέλτιστη διαδρομή, μέχρι να επανέλθει ο κόμβος σε λειτουργία. Το δίκτυο πλέγματος χαρακτηρίζεται από χωρική ανομοιομορφία των κόμβων, επομένως η επικοινωνία με τον συντονιστή απαιτεί multi hop δρομολόγηση.



Σχήμα 2.4: Εναλλακτική δρομολόγηση σε περίπτωση δικτύου τοπολογίας πλέγματος[1]

- *Star Topology* : Το δίκτυο τοπολογίας αστέρα αποτελείται από ένα πλήθος κόμβων RFD οι οποίοι συνδέονται με έναν κεντρικό κόμβο FFD. Ο κόμβος πλήρους λειτουργίας αποτελεί τον τοπικό συγκεντρωτή του τμήματος του δικτύου και αναλαμβάνει την περαιτέρω προώθηση των δεδομένων. Σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι η απευθείας σύνδεση των κόμβων στον FFD, μειώνοντας έτσι το χρόνο μετάδοσης των δεδομένων, αλλά και η ασφάλεια του δικτύου σε περίπτωση βλάβης ενός κόμβου, καθώς ο συγκεκριμένος κόμβος θα απομονωθεί και προσωρινά δε θα μπορεί να στείλει δεδομένα, όμως το υπόλοιπο δίκτυο θα λειτουργεί κανονικά.



Σχήμα 2.5: Δίκτυο τοπολογίας αστέρα[1]

- *Tree Topology* : Το δίκτυο τοπολογίας δέντρου είναι μια υβριδική τοπολογία, στην οποία δίκτυα αστέρα συνδέονται στον τοπικό συγκεντρωτή. Χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου υπάρχει μεγάλη πυκνότητα κόμβων σε συγκεκριμένη περιοχή του δικτύου (συνήθως μακριά από τον συγκεντρωτή), οπότε οι κόμβοι ομαδοποιούνται σε δίκτυο αστέρα, με κάποιον να αναλαμβάνει τις λειτουργίες καταγραφής, λήψης και προώθησης πακέτων εκτός του δικτύου (δηλαδή είναι ο FFD). Ο FFD συλλέγει τα δεδομένα από τους υπόλοιπους κόμβους και τα αποστέλει στον τοπικό συγκεντρωτή του SG. Η συγκεκριμένη μορφή δικτύου είναι ιεραρχική, αφού τα δεδομένα προωθούνται από τους κόμβους-φύλλα (RFD) προς τη ρίζα (τοπικός συγκεντρωτής). Η δρομολόγηση είναι multi hop όπως και στο δίκτυο πλέγματος. Τέλος, πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί να διαχειριστεί μεγάλο φόρτο δεδομένων με μόνο 'επικίνδυνο' σημείο τον κόμβο FFD που συλλέγει τα δεδομένα των υπόλοιπων κόμβων.

2.4 Βασικές λειτουργίες έξυπνου μετρητή

Κατά την εγκατάσταση των συστημάτων SM πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι το περιβάλλον στο οποίο θα γίνεται η μετάδοση των δεδομένων δεν θα είναι σταθερό. Αυτό μπορεί να συμβαίνει είτε λόγω υπερφόρτωσης του δικτύου, είτε λόγω σφάλματος στη λειτουργία κάποιου μετρητή, ακόμα και από την εμφάνιση κινούμενων σχεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης. Επομένως, οι έξυπνοι μετρητές πρέπει να έχουν επιπλέον λειτουργίες για την προστασία των δεδομένων στις παραπάνω περιπτώσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές λειτουργίες που λειτουργούν ως αντίμετρα στα προβλήματα μετάδοσης[1]. Οι λειτουργίες αυτές προσαρμόζονται κατάλληλα, ανάλογα με την τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία και την τοπολογία του δικτύου που χρησιμοποιείται.

2.4.1 Έλεγχος δρομολόγησης κίνησης

Ανεξάρτητα από την τοπολογία του δικτύου, δημιουργούνται οι ροές πληροφορίας "upstream" και "downstream". Οι δύο ροές πληροφορίας διαχειρίζονται ανεξάρτητα ώστε οι εντολές από το MDMS στους μετρητές να μην επηρεάζει τη μετάδοση ωφέλιμης πληροφορίας.

Τύπος δρομολόγησης	Ιδιότητες
Upstream	Επικοινωνία από τους μετρητές στο MDMS. Ο χρόνος αποστολής των δεδομένων μπορεί να είναι είτε μικρός (<5min), είτε μεγάλος (10-30min). Στη δεύτερη περίπτωση δημιουργείται μεγάλος όγκος δεδομένων που πρέπει να διαχειριστεί ο συγκεντρωτής τη στιγμή που οι μετρητές στέλνουν τα δεδομένα τους.
Downstream	Επικοινωνία από το MDMS στους μετρητές. Η ροή αυτή είναι λιγότερο συχνή από την upstream, και συνήθως αφορά συγκεκριμένες εντολές προς ορισμένους μετρητές.

Πίνακας 2.1: Ροές πληροφορίας σε σύστημα SM

Σε περιπτώσεις τοπολογίας πλέγματος, κάθε έξυπνος μετρητής ανταποκρίνεται στις αλλαγές του περιβάλλοντος (κινούμενο όχημα, αλλαγές στον καιρό

κλπ), εκτιμώντας κάθε φορά τη βέλτιστη διαδρομή προς τον τοπικό συγκεντρωτή. Η δυναμική αυτή προσαρμογή του δικτύου διασφαλίζει την επικοινωνία SM και MDMS. Η ανταλλαγή των μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων του δικτύου, για την εύρεση βέλτιστης διαδρομής, συμβαίνει όταν οι μετρητές δεν αποστέλλουν δεδομένα στον τοπικό συγκεντρωτή, επομένως δεν μειώνεται η χωρητικότητα του δικτύου κατά τη μετάδοση της χρήσιμης πληροφορίας.

Σε περιπτώσεις τοπολογίας αστέρα ή δέντρου, η υλοποίηση του δικτύου είναι απλούστερη, όμως δεν δίνεται η δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής της διαδρομής. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση σφάλματος, ένας ή περισσότεροι SM σταματούν να λειτουργούν στο δίκτυο. Η συνήθης λύση σε αυτήν την περίπτωση είναι τα δεδομένα να στέλνονται σε γειτονικό τοπικό συγκεντρωτή.

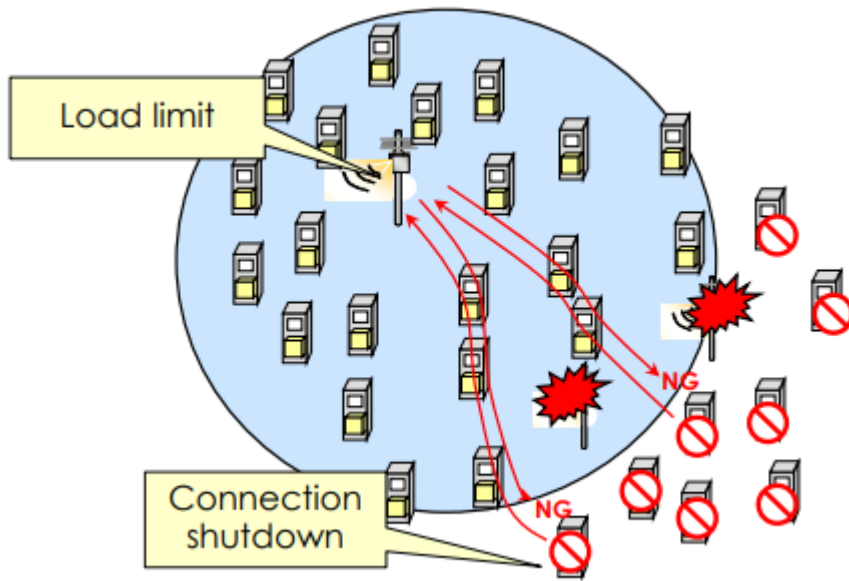
2.4.2 Καταμερισμός φορτίου

Όταν μεγάλο πλήθος μετρητών συνδέονται σε έναν τοπικό συγκεντρωτή, ο όγκος των δεδομένων προκαλεί συμφόρηση και μειώνει την ποιότητα υπηρεσίας. Παρόλα αυτά, δεν μπορούμε να έχουμε μεγάλο πλήθος συγκεντρωτών σε κάποια περιοχή, καθώς έτσι το κόστος εγκατάστασης γίνεται μεγάλο. Είναι σημαντική λοιπόν, η σωστή διαχείριση του αριθμού των μετρητών ανά συγκεντρωτή ώστε να υπάρχει ορθή κατανομή τους και αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου.

2.4.3 Περιορισμός φορτίου

Σε περίπτωση αστοχίας του τοπικού συγκεντρωτή, οι SM θα επιχειρήσουν να συνδεθούν με διαφορετικούς κόμβους στο δίκτυο ώστε να αποστείλουν τα δεδομένα μέσω αυτών. Οι κόμβοι αυτοί θα ανήκουν στην περιοχή γειτονικού, λειτουργικού τοπικού συγκεντρωτή, ο οποίος θα δεχτεί ένα πλήθος από αιτήματα σύνδεσης. Ο όγκος των δεδομένων από τους SM θα προκαλέσει συμφόρηση και απώλεια πακέτων. Επομένως, κατά τη σχεδίαση του συστήματος, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός του φορτίου που μπορεί να εξυπηρετήσει ένας συγκεντρωτής.

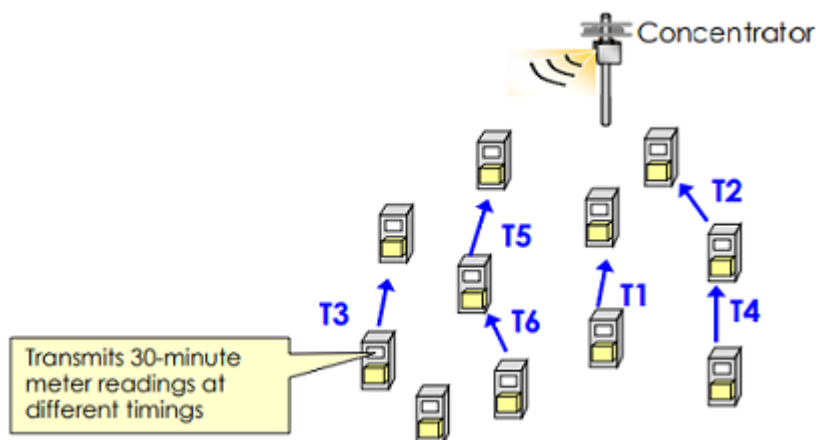
Τέτοια φαινόμενα συμφόρησης μπορούν να συμβούν είτε χρησιμοποιείται ασύρματη, είτε ενσύρματη τεχνολογία. Η δυναμική δρομολόγηση είναι χαρακτηριστικό των λειτουργικών δικτύων για την καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Επομένως, η λειτουργία που ελεγχεί τις εναλλακτικές διαδρομές είναι ιδιαίτερα σημαντική, προς ελαχιστοποίηση των κόμβων που αποκόπτονται και επιτυχή διέλευση των δεδομένων.



Σχήμα 2.6: Εναλλακτική διαδρομή σε περίπτωση αστοχίας

2.4.4 Διασπορά χρόνων μετάδοσης

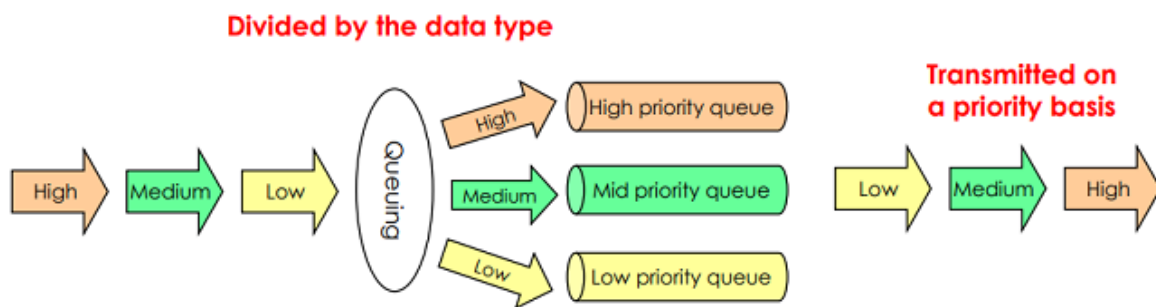
Οι SM μεταδίδουν τα δεδομένα στον τοπικό συγκεντρωτή περιοδικά, σε χρόνο που έχει προσδιοριστεί από τις προδιαγραφές. Σε περίπτωση που όλοι οι κόμβοι στείλουν ταυτόχρονα, υπάρχει κίνδυνος συμφόρησης και απώλειας δεδομένων στον συγκεντρωτή και στους ενδιάμεσους κόμβους. Είναι σημαντική η υλοποίηση κατάλληλου σχήματος TDMA (Time Division Multiple Access), ώστε να αποφευχθούν τέτοια φαινόμενα. Κάθε μετρητής εφοδιάζεται με μια λειτουργία συγχρονισμού, ώστε να στέλνουν τα δεδομένα σε διαφορετικούς χρόνους, και ο δίαυλος να είναι διαρκώς απασχολημένος.



Σχήμα 2.7: Διασπορά χρόνων μετάδοσης

2.4.5 Έλεγχος προτεραιότητας

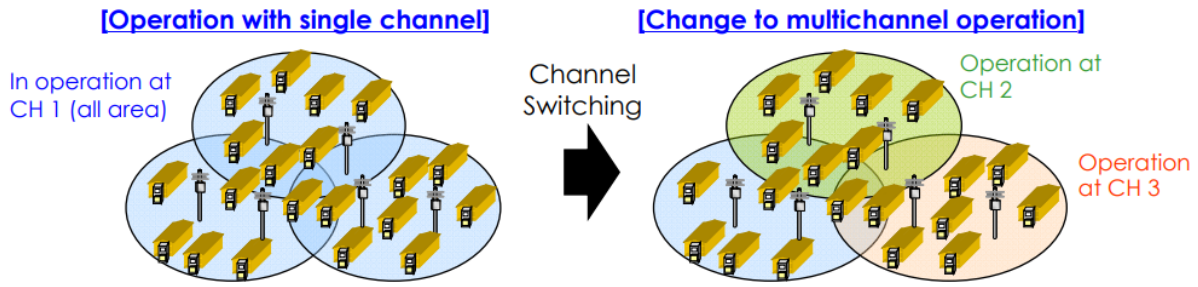
Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του δικτύου, είναι σημαντική η λειτουργία εισαγωγής προτεραιότητας στα πακέτα, ανάλογα με το είδος των δεδομένων. Ο διαχωρισμός αυτός πρέπει να εξασφαλίζει την αποδεκτή ποιότητα υπηρεσίας των εφαρμογών, και λειτουργεί σε κάθε σημείο του δικτύου όπου δημιουργείται ουρά λόγω συμφόρησης. Αν λάβουμε υπόψη το σχήμα TDMA, κάθε μετρητής μεταδίδει τα δεδομένα στη χρονοθυρίδα που του αναλογεί, ενώ εκτός αυτής ανταλλάσσει πακέτα υψηλής προτεραιότητας αναφορικά με τη διαχείριση του δικτύου.



Σχήμα 2.8: Εισαγωγή προτεραιότητας

2.4.6 Λειτουργία πολλαπλών καναλιών

Σε περιπτώσεις πυκνοκατοικημένης περιοχής, όπου οι SM βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, υπάρχει ανάγκη πλήθους συγκεντρωτών, σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους. Με χρήση TDMA λύνεται το πρόβλημα συμφόρησης στην περιοχή κάλυψης ενός συγκεντρωτή, όμως σε αυτήν την περίπτωση κάποιοι SM μπορεί να παρεμβάλλουν σε γειτονικούς συγκεντρωτές με αποτέλεσμα μείωσης της ποιότητας υπηρεσίας. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με χρήση FDMA (Frequency Division Multiple Access). Κάθε SM επικοινωνεί με τον υπεύθυνο τοπικό συγκεντρωτή σε διαφορετική συχνότητα από ότι οι γειτονικοί συγκεντρωτές. Η μέθοδος αυτή αποτελεί αντίμετρο και για τον περιορισμό φορτίου της παραγράφου 2.4.3.



Σχήμα 2.9: Λειτουργία πολλαπλών καναλιών

2.4.7 Διαχείριση Δικτύου

Οι SM, εκτός από τα δεδομένα προς το MDMS, ανταλλάσσουν μηνύματα που αφορούν τη λειτουργικότητά τους και τη διαχείριση του δικτύου στο οποίο βρίσκονται, είτε είναι κόμβοι RFD είτε FFD. Επομένως, είναι σημαντική η προσθήκη των παρακάτω λειτουργιών, προς αποδοτικότερη χρήση του δικτύου:

- Λειτουργία ποιότητας επικοινωνίας: Η προσθήκη και η αφαίρεση μετρητών στο δίκτυο, καθώς και οι μεταβολές στο περιβάλλον, πορκαλούν αλλαγές στα multi hop δίκτυα. Οι διαδρομές υπολογίζονται δυναμικά, και τέτοιες μεταβολές πάντα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Κάθε μετρητής στέλνει δεδομένα (εκτός της χρονοθυρίδας που στέλνει ότι έχει συλλέξει στο MDMS) που βοηθάνε στην αξιολόγηση της ποιότητας του δικτύου, ώστε αυτό να παραμείνει λειτουργικό.
- Λειτουργία διαχείρισης σφαλμάτων: Η αποτυχία λειτουργίας κάποιου μετρητή μπορεί να γίνει γνωστή όταν ο τοπικός συγκεντρωτής δεν λαμβάνει από αυτόν τα δεδομένα που έχει συλλέξει στο προηγούμενο διάστημα. Σε αυτήν την περίπτωση, το δίκτυο πρέπει να αναγνωρίσει και να απομονώσει τους δυσλειτουργικούς μετρητές, ο διαχειριστής να πραγματοποιήσει ανάλυση με βάση τα δεδομένα που λήφθηκαν τελευταία φορά και έτσι να προσδιοριστεί ο λόγος του σφάλματος.

2.5 Ασφάλεια και ιδιωτικότητα

Το AMI βρίσκεται στον πυρήνα του SG, παρουσιάζοντας πολύπλοκη διαμόρφωση δικτύου. Τα πλεονεκτήματά του έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη παράγραφο και είναι προφανές ότι οι SM δεν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν χωρίς αυτό. Παρόλα αυτά, η διασύνδεση πολλών SM μέσω ενός δικτύου πλέγματος, δίνει νέες ευκαιρίες για κακόβουλες επιθέσεις, θέτοντας σε κίνδυνο τα δεδομένα των

καταναλωτών αλλά και τη λειτουργία του δικτύου.

Ήδη από το 2016 είναι γνωστή μια επίθεση άρνησης υπηρεσίας, σχεδιασμένη συγκεκριμένα για το SG, που ονομάζεται επίθεση μαριονέτας (Puppet attack). Ο εισβολέας επιλέγει έναν κόμβο του δικτύου και στέλνει πακέτα με τα οποία μπορεί να πάρει τον έλεγχο του. Μέσω του κόμβου μπορεί να πλυμμηρίσει το δίκτυο, εξαντλώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης και την ισχύ του κόμβου. Η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση του δικτύου, ενώ είναι δύσκολο να προσδιορισθεί ο μολυσμένος κόμβος.

2.5.1 Αδυναμίες στο έξυπνο δίκτυο

Σε ένα SG, όλα τα συστήματα που συνδέονται αποτελούν πιθανούς στόχους του επιτιθέμενου. Ο ίδιος ο SM, ο τοπικός συγκεντρωτής, δρομολογητές κλπ, αν παρουσιάσουν αδυναμία, μπορούν να δώσουν μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στο δίκτυο. Οι βασικές αδυναμίες του δικτύου μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες[9]:

- *Ενσωματωμένες αδυναμίες* : Οι αδυναμίες αυτές εντοπίζονται στο hardware του μετρητή. Έχουν εντοπιστεί σχεδιαστικά σφάλματα που οδηγούν σε απουσία προστασίας των δεδομένων (αδύναμη κρυπτογράφηση), αλλά και του ίδιου του μετρητή από επιτιθέμενους που προσπαθούν να αποκτήσουν πρόσβαση. Μέσω αυτών των αδυναμιών, ο επιτιθέμενος έχει τη δυνατότητα να ελέγξει το μετρητή, επομένως και τη λειτουργία των συσκευών του καταναλωτή.
- *Αδυναμίες των εφαρμογών* : Οι εφαρμογές διαχειρίζονται τα δεδομένα που συλλέγουν οι μετρητές και άλλες υπηρεσίες προς τους καταναλωτές (όπως το σύστημα αυτόματης κοστολόγησης). Η εκμετάλλευση αδυναμιών στο software των μετρητών, μπορεί να οδηγήσει στην αλλοίωση των δεδομένων τους, καθιστώντας το δίκτυο μη λειτουργικό.
- *Αδυναμίες στο δίκτυο* : Σε ένα SG οι συσκευές που συνδέονται (μετρητές, συγκεντρωτές, δρομολογητές κλπ), μπορούν και επικοινωνούν μέσω των δικτυακών πρωτοκόλλων. Παρόλα αυτά, πολλά πρωτόκολλα (όπως το Wi-Fi και το ZigBee) έχουν αδύναμη ασφάλεια, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο τη λειτουργία του δικτύου. Ένας επιτιθέμενος έχει τη δυνατότητα να διαγράψει ή να αλλοιώσει τα δεδομένα που βρίσκονται στο δρομολογητή ή στον τοπικό συγκεντρωτή. Επιπλέον η απουσία τεχνικών κρυπτογράφησης δημοσίου και συμμετρικού κλειδιού αφήνουν το δίκτυο ευάλωτο (απουσία ακεραιότητας δεδομένων, εμπιστευτικότητας και αυθεντικοποίησης).

2.5.2 Στόχοι ασφάλειας

Πρωταρχική λειτουργία του SG δικτύου είναι η άμεση αναφορά χρήσης ενέργειας και κοστολόγησή της, μέσω των SM. Όλα τα στοιχεία που διασυνδέονται προκειμένου να επιτευχθούν οι λειτουργίες αυτές είναι απαραίτητα, οπότε η άμυνά τους ενάντια σε εξωτερικές επιθέσεις πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση του συστήματος. Οι παρακάτω στόχοι ασφαλείας, όταν ικανοποιούνται, καθιστούν δυνατή την ομαλή λειτουργία του δικτύου[9]:

- *Διαθεσιμότητα* : Η διαθεσιμότητα των δεδομένων είναι ο βασικός στόχος σχεδίασης του SG. Οι αναφορές των SM είναι πολύ σημαντικές για τον πάροχο και χρησιμοποιούνται, εκτός από την κοστολόγηση, για τη διαχείριση της κατανάλωσης στο δίκτυο.
- *Ακεραιότητα* : Ένας SM στέλνει περιοδικά τα δεδομένα που έχει συλλέξει στο MDMS μέσω του τοπικού συγκεντρωτή. Εάν κάποιο από αυτά τα στοιχεία είναι ευάλωτο σε επίθεση, υπάρχει το ενδεχόμενο παραποίησης των δεδομένων. Η ακεραιότητα παρέχει εγγύηση ότι τα δεδομένα δεν έχουν αλλάξει χωρίς εξουσιοδότηση. Η απουσία της ακεραιότητας προκαλεί καταστροφή της πληροφορίας, και οδηγεί σε λανθασμένη διαχείριση του δικτύου και κοστολόγηση καταναλωτών.
- *Εμπιστευτικότητα* : Η εμπιστευτικότητα αναφέρεται στο εάν τα δεδομένα που έχουν παραληφθεί από τους παρόχους μπορούν να αποκαλυφθούν σε μη εξουσιοδοτημένα άτομα. Είναι ο λιγότερο σημαντικός στόχος όσον αφορά την αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου, αλλά είναι απαραίτητος για τους καταναλωτές. Η εμπιστευτικότητα είναι συνδεδεμένη με την ιδιωτικότητα των καταναλωτών, αφού τα δεδομένα χρήσης της ενέργειας μπορούν να φανερώσουν λεπτομέρειες για την ιδιωτική ζωή.
- *Αυθεντικότητα* : Η αυθεντικοποίηση είναι η μέθοδος με την οποία ο αποστολέας των δεδομένων επιβεβαιώνει την ταυτότητά του στον παραλήπτη. Ένα δίκτυο SG οφείλει να έχει μηχανισμό αυθεντικοποίησης, προς απόρριψη μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης.
- *Μη αποκήρυξη* : Η ιδιότητα της μη αποκήρυξης είναι χρήσιμη στον εντοπισμό καταναλωτή, ο οποίος έκανε παράνομη ενέργεια (κλοπή ενέργειας), και αρνείται να πάρει την ευθύνη για την πράξη.

2.5.3 Στόχοι ιδιωτικότητας

Εκτός από τα προβλήματα που υπάρχουν όσον αφορά την ασφαλή επικοινωνία στο δίκτυο, δημιουργούνται προβλήματα και για την ιδιωτικότητα των καταναλωτών. Η αυξημένη ροή δεδομένων από έναν SM, μπορεί να δώσει αναλυτικές πληροφορίες για τον τρόπο ζωής και τις δραστηριότητες ενός ατόμου. Η κατανάλωση ενέργειας σε μια οικία μπορεί να φανερώσει το πλήθος των ατόμων, αλλά και ποιες ώρες απουσιάζουν. Είναι φανερό λοιπόν ότι πρέπει να βρεθεί τρόπος συλλογής των απαραίτητων δεδομένων, χωρίς να αποκαλύπτονται τέτοιες πληροφορίες που αφορούν την ιδιωτική ζωή. Οι παρακάτω ιδιότητες στοχεύουν στη διατήρηση της ιδιωτικότητας[9]:

- *Ανωνυμία* : Η ανωνυμία περιγράφει καταστάσεις όπου η ταυτότητα του ενεργού ατόμου παραμένει άγνωστη. Είναι σημαντικό ο καταναλωτής να μην μπορεί να ταυτοποιηθεί από τρίτους, μέσω των δεδομένων που στέλνει ο SM στο MDMS.
- *Μη συνδεσιμότητα* : Με αυτήν την ιδιότητα, τα δεδομένα που μεταδίδονται δεν μπορούν να συνδεθούν με τη συσκευή που σχετίζονται χωρίς εξουσιοδότηση. Είναι σημαντική ιδιότητα για το δίκτυο HAN (μπορεί να υλοποιηθεί στον έξυπνο μετρητή, τους αισθητήρες, τις έξυπνες συσκευές).
- *Μη παρατηρησιμότητα* : Με αυτήν την ιδιότητα, ένας εξωτερικός παρατηρητής δεν μπορεί να καταλάβει αν οι συσκευές του δικτύου επικοινωνούν. Αν έχει επιτεθεί σε έναν συγκεκριμένο SM, τότε δεν μπορεί να αντιληφθεί εάν έχει στείλει δεδομένα ή έχει εκτελέσει άλλες ενέργειες (όπως μηνύματα διαχείρισης του δικτύου, μηνύματα κοστολόγησης).
- *Ψευδωνυμία* : Ένας SM μπορεί να είναι προσβάσιμος από τους καταναλωτές, επομένως ο μετρητής μπορεί να έχει πολλά αναγνωριστικά (ψευδώνυμα). Αυτά τα αναγνωριστικά πρέπει να είναι διαθέσιμα μόνο σε όσους χρειάζεται να επικοινωνούν με τον μετρητή και όχι σε τρίτους.

3 Κεφάλαιο: Προδιαγραφές έξυπνων μετρητών

3.1 Απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκαν οι βασικές λειτουργίες των SM, καθώς και τα κυριότερα τηλεπικοινωνιακά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν. Κατά τη σχεδίαση και υλοποίηση του SG, η τοπολογία του δικτύου αλλά και η τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί, εξαρτάται από την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας και την τοποθεσία εγκατάστασης. Ο στόχος είναι η εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας του δικτύου και των εφαρμογών που καλύπτει, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης και της πολυπλοκότητας του δικτύου.

3.1.1 Απαιτήσεις ποιότητας ανά δίκτυο

Τα δίκτυα που έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο (WAN, NAN και HAN) προφανώς καλούνται να εξυπηρετήσουν διαφορετικές εφαρμογές. Οι απαιτήσεις του ρυθμού μετάδοσης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως οι εφαρμογές που υποστηρίζονται, η θέση του μετρητή, το πλήθος των συσκευών στο δίκτυο. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται ο ελάχιστος και ο μέγιστος απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης σε κάθε δίκτυο, καθώς και η περιοχή κάλυψής τους:

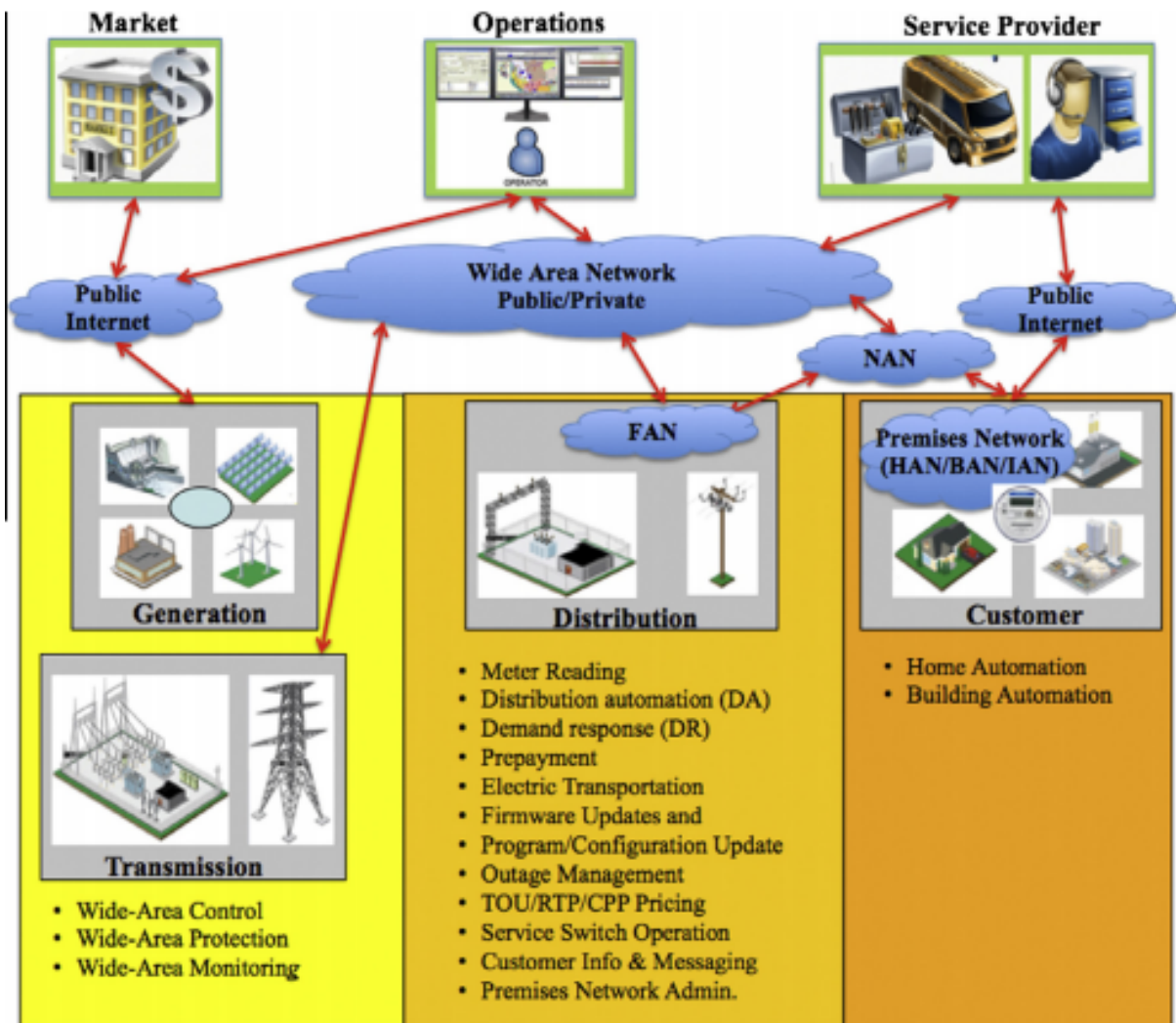
Δίκτυο	Ρυθμός μετάδοσης	Περιοχή κάλυψης
WAN	10Mbps - 1Gbps	Εκατοντάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα
NAN	100Kbps - 10Mbps	Μερικά τετραγωνικά χιλιόμετρα
HAN	1bps - 100Kbps	30 - 100 μέτρα

Πίνακας 3.1: Απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης του κάθε δικτύου [6]

Οι βασικές εφαρμογές του SG, χωρισμένες ανά δίκτυο εφαρμογής, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Το WAN είναι υπεύθυνο για τους τομείς παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το NAN/FAN¹ είναι υπεύθυνο για τον τομέα κατανομής της ενέργειας στους καταναλωτές, ενώ το HAN/BAN/IAN² είναι υπεύθυνο για την εξυπηρέτηση των πελατών.

¹Το Field Area Network έχει ίδια εμβέλεια με το NAN και είναι υπεύθυνο για τον τομέα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

²Τα Building/Industrial Area Networks, έχουν ίδια εμβέλεια με το HAN αλλά συναντώνται σε κτήρια με εμπορικές/βιομηχανικές εφαρμογές.



Σχήμα 3.1: Βασικές εφαρμογές του SG ανά δίκτυο [11]

3.1.2 Απαιτήσεις ποιότητας ανά εφαρμογή

Η προηγμένη τηλεπικοινωνιακή δομή του SG επιτρέπει την αμφίδρομη αποστολή διαφόρων τύπων δεδομένων, με ξεχωριστές απαιτήσεις όσον αφορά την ασφάλεια, το ρυθμό μετάδοσης, την καθυστέρηση κλπ. Η ορθή επιλογή των τηλεπικοινωνιακών χαρακτηριστικών του δικτύου, που θα οδηγήσει σε ικανοποίηση των εφαρμογών που καλύπτει, προσδιορίζεται μέσα από τις παρακάτω απαιτήσεις κάθε εφαρμογής:

- **Καθυστέρηση :** Η καθυστέρηση ανφέρεται στο χρόνο που χρειάζονται τα δεδομένα να φτάσουν από τον πομπό στο δέκτη και αντίστροφα. Ορισμένες εφαρμογές που απαιτούν μετάδοση σε πραγματικό χρόνο δεν ανέχονται καθυστερήσεις μεγαλύτερες από μερικά milliseconds, ενώ σε άλλες

περιπτώσεις το πεδίο αυτό δεν είναι κρίσιμο.

- **Φάσμα συχνοτήτων** : Οι απαιτήσεις στο φάσμα καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό και την επιλογή της τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί, δεδομένου ότι υπάρχουν διαφορές στο εύρος ζώνης της κάθε μιας. Ορισμένες εφαρμογές απαιτούν συχνότητες μικρότερες των 2 GHz για να επιτευχθεί καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας.
- **Αξιοπιστία** : Η αξιοπιστία αναφέρεται στο πόσο επιτυχημένη είναι η μετάδοση των δεδομένων από τον πομπό στο δέκτη. Πολλές εφαρμογές (ειδικά εφαρμογές πραγματικού χρόνου) απαιτούν υψηλή αξιοπιστία για την ορθή λειτουργία τους, ενώ άλλες μπορούν να ανεχτούν ένα διάστημα διακοπής.
- **Ρυθμός μετάδοσης** : Ο ρυθμός μετάδοσης αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία τα δεδομένα μεταδίδονται από τον πομπό στο δέκτη. Κάθε εφαρμογή έχει διαφορετικό απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης για τη σωστή λειτουργία της, επομένως η επιλογή της κατάλληλης τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας, γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις μετάδοσης των εφαρμογών που εξυπηρετούνται.
- **Ασφάλεια** : Η ασφαλής μετάδοση των δεδομένων είναι ύψιστης προτεραιότητας για όλες τις εφαρμογές του SG. Η αδυναμία του δικτύου να αμυνθεί σε εξωτερικές επιθέσεις είναι μοιραία τόσο για την ορθή λειτουργία του, όσο και για την ιδιωτικότητα του καταναλωτή.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι βασικότερες εφαρμογές του SG καθώς και οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας τους:

Εφαρμογή	Μέγεθος πακέτων	Καθυστέρηση	Αξιοπιστία
Ανάγνωση μετρητών on-demand	100 bytes	< 15 sec	> 98%
Ανάγνωση μετρητών, προγραμματισμένα	1600-2400 bytes	< 4 h	> 98%
Κοστολόγηση κατανάλωσης ενέργειας	100 bytes	< 1 min	> 98%
Απομακρυσμένη παρακολούθηση και συντήρηση του δικτύου	100-1000 bytes	< 5sec	> 99.5%
Έλεγχος τάσης και ισχύος του δικτύου	100-1000 bytes	< 5sec	> 99.5%
Αυτόματη εξισορρόπηση προσφοράς - ζήτησης	150-250 bytes	< 4sec	> 99.5%

Εφαρμογή	Μέγεθος πακέτων	Καθυστέρηση	Αξιοπιστία
Λειτουργία εντόπισης σφαλμάτων, απομόνωσης και διόρθωσης βλαβών	25 bytes	< 20 sec	> 98%
Home Energy Managment	10-100 bytes	0.3 - 2 sec	> 99%
Επικοινωνία Vehicle to Grid	255 bytes	< 2 sec - 5 min	> 99%
Φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος	100 bytes	< 2 sec - 5 min	> 99%

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά σημαντικότερων εφαρμογών SG [11]

3.2 Σύγκριση τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών

Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις των εφαρμογών που καλύπτει το δίκτυο, αλλά και το περιβάλλον λειτουργίας (όπως η πυκνότητα των κόμβων, το ανάγλυφο του εδάφους, τις πιθανές παρεμβολές), επιλέγεται η κατάλληλη τεχνολογία που ελαχιστοποιεί το κόστος εγκατάστασης και υλοποίησης. Για επικοινωνία μικρών αποστάσεων, το Wi-Fi και το ZigBee αποτελούν τις οικονομικά αποδοτικότερες λύσεις. Για περιπτώσεις μεσαίων και μεγάλων αποστάσεων που απαιτούνται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενσύρματες τεχνολογίες όπως Ethernet ή οπτικές ίνες. Τέλος, μπορούν να υλοποιηθούν συστήματα χαμηλού κόστους, με εκμετάλλευση της υπάρχουσας υποδομής, όπως το PLC.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τα τηλεπικοινωνιακά χαρακτηριστικά των ενσύρματων και ασύρματων τεχνολογιών, καθώς και οι εφαρμογές και τα δίκτυα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά.

Τεχνολογία	Ρυθμός μετάδοσης	Περιοχή κάλυψης	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Δίκτυο
Ethernet	Έως 100 Gbps	100 m	Επικοινωνία εντός του σπιτιού, χρήση στο δίκτυο κορμού, SCADA ³	Καλή επιλογή για κοντινές αποστάσεις	HAN, NAN, WAN
Ευρυζωνικό PLC	Έως 300 Mbps	1500 m	Χρήση στο δίκτυο κορμού και στον τομέα παραγωγής ενέργειας, SCADA	Υπάρχουσα υποδομή, μεγάλη αξιοπιστία	NAN, WAN
PLC στενής ζώνης	10-500 Kbps	3 km	Χρήση στο δίκτυο κορμού και στον τομέα παραγωγής ενέργειας	Υπάρχουσα υποδομή, μεγάλη αξιοπιστία	NAN, WAN
Οπτική ίνα	Έως 100 Gbps	100 km	Χρήση στο δίκτυο κορμού και στον τομέα παραγωγής ενέργειας, SCADA	Υψηλός ρυθμός μετάδοσης και εύρος ζώνης, δεν επηρεάζεται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές	WAN

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά ενσύρματων τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών [12]

Τεχνολογία	Ρυθμός μετάδοσης	Περιοχή κάλυψης	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Δίκτυο
WiMAX	Έως 75 Mbps	50 km	Ανάγνωση μετρητών	Χαμηλό κόστος και κατανάλωση ενέργειας	NAN, WAN
ZigBee	20-250 Kbps	100 m	Μέτρηση ενέργειας, επικοινωνία έξυπνων συσκευών	Χαμηλό κόστος και κατανάλωση ενέργειας, απλή υποδομή	HAN, NAN
Wi-Fi	2 Mbps - 1.7 Gbps	100 m	Επικοινωνία έξυπνων συσκευών, οικιακός αυτοματισμός	Καλή επιλογή για κοντινές αποστάσεις	HAN, NAN
3G	Έως 42 Mbps	70 km	Ανάγνωση έξυπνων μετρητών, SCADA	Υπάρχουσα υποδομή, υψηλή ασφάλεια, χαμηλό κόστος	NAN, WAN
4G / LTE	Έως 979 Mbps	16 km	Ανάγνωση έξυπνων μετρητών, SCADA	Υπάρχουσα υποδομή, υψηλή ασφάλεια, χαμηλό κόστος	NAN, WAN
5G	Έως 20 Gbps	Εξαρτάται από τη συχνότητα χρήσης	Ανάγνωση έξυπνων μετρητών, SCADA	Υψηλός ρυθμός μετάδοσης	NAN, WAN

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά ασύρματων τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών [12]

3.3 Περιοχές εφαρμογής

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την πληθυσμιακή πυκνότητα της περιοχής εφαρμογής. Οι αστικές περιοχές χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα έξυπνων μετρητών, συνεπώς ο όγκος των προς μετάδοση και επεξεργασία δεδομένων είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τις ημιαστικές και ακόμα περισσότερο από τις αγροτικές περιοχές. Επιπλέον οι διαφορές στην κίνηση του δικτύου οδηγούν και σε διαφορετικές τοπολογίες ανάλογα την περιοχή. Οι πυκνοκατοικημένες περιοχές χρειάζονται κατά κύριο λόγο το δίκτυο πλέγματος, ώστε να υπάρχει πιθανότητα εναλλακτικής διαδρομής της κίνησης, ενώ στις αραιοκατοικημένες περιοχές είναι αποδοτικότερη η χρήση δικτύου τοπολογίας αστέρα.

Παρακάτω αναφέρονται οι διάφορες τοπολογίες, καθώς και η περιοχή εφαρμογής και τα χαρακτηριστικά τους[1]:

Δίκτυο τοπολογίας πλέγματος (εφαρμογή σε αστικές περιοχές)

- Το κόστος μπορεί να μειωθεί με προσδιορισμό του βέλτιστου αριθμού μετρητών ανά συγκεντρωτή.
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

³SCADA (Supervisory control and data acquisition) : Είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση των διαδικασιών παραγωγής και μετάδοσης ενέργειας, καθώς και των επικοινωνιών στο δίκτυο WAN.

- Για την υλοποίηση του δικτύου απαιτείται υψηλή πυκνότητα χρηστών.
- Η επικοινωνία των μετρητών μπορεί να μην είναι δυνατή, επομένως χρειάζεται προσοχή κατά την εγκατάσταση.

PLC τοπολογίας διαύλου (εφαρμογή σε πολυόροφα κτήρια)

- Αποφυγή του κόστους εγκατάστασης με χρήση της υπάρχουσας καλωδίωσης του ηλεκτρικού δικτύου.
- Εφαρμόζεται ακόμα και όταν η ασύρματη μετάδοση είναι δύσκολη.
- Ακατάλληλο για ευρεία κάλυψη λόγω αυξημένων απωλειών.

Ασύρματο δίκτυο τοπολογίας αστέρα (εφαρμογή σε αραιοκατοικημένες περιοχές)

- Η συνεργασία με τους παρόχους κινητών επικοινωνιών είναι σημαντική, προς μείωση του κόστους εγκατάστασης.
- Η περιοχή εφαρμογής περιορίζεται από την εμβέλεια των σταθμών βάσης του δικτύου κινητών επικοινωνιών.
- Χρέωση των τερματικών ανάλογα με τα δεδομένα που αποστέλλουν.

Οι αραιοκατοικημένες περιοχές με μικρή δόμηση, υποστηρίζονται με PLC ή 3G, 4G τεχνολογίες. Η υπάρχουσα υποδομή, η απουσία εμποδίων και η απουσία ανάγκης για μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης καθιστά τις παραπάνω τεχνολογίες οικονομικά αποδοτικότερες. Σε αστικές περιοχές, η ανάγκη διαχείρισης μεγαλύτερης κίνησης οδηγεί σε χρήση Ethernet, PLC και WiMAX, ZigBee, 4G, 5G. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά οι καταλληλότερες επιλογές ανά περιοχή:

Περιοχή	Ασύρματη τεχνολογία	Ενσύρματη τεχνολογία
Αστική	ZigBee, Wi-Fi, WiMAX, 4G, 5G	Ethernet, PLC
Ημιαστική	ZigBee, Wi-Fi, 3G, 4G	Ethernet, PLC
Αγροτική	Wi-Fi, 3G	PLC

Πίνακας 3.5: Κατάλληλες τεχνολογίες ανά περιοχή εφαρμογής

4 Κεφάλαιο: Έξυπνοι μετρητές στις αστικές περιοχές

4.1 Χαρακτηριστικά αστικών περιοχών

Οι αστικές περιοχές αναπτύσσονται κυρίως σε πεδιάδες και λεκανοπέδια. Ανάλογα με την πληθυσμιακή πυκνότητα, χωρίζονται σε υποπεριοχές, οι οποίες έχουν ξεχωριστά πολεοδομικά χαρακτηριστικά. Η ανάλυση των χαρακτηριστικών των περιοχών αυτών είναι σημαντική στον προσδιορισμό της κατάλληλης τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας, αφού λαμβάνονται υπόψη τόσο η πληθυσμιακή πυκνότητα, όσο και το ανάγλυφο της περιοχής, τα πολεοδομικά χαρακτηριστικά αλλά και η κατάσταση του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου. Οι υποπεριοχές των αστικών κέντρων φαίνονται παρακάτω:

- *Περιοχές υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας:* Οι περιοχές αυτές έχουν την υψηλότερη πυκνότητα πληθυσμού. Χαρακτηρίζονται από πυκνή δόμηση με πολυόροφα κτήρια, ενώ η πολεοδομική δραστηριότητα είναι τις περισσότερες φορές κορεσμένη.
- *Περιοχές μέτριας πληθυσμιακής πυκνότητας:* Στις περιοχές αυτές μπορούν να ενταχθούν τα προάστια των πόλεων. Είναι αραιοκατοικημένες σε σχέση με τις προηγούμενες, ενώ υπάρχει και ανομοιομορφία στη δόμηση, λόγω των διαφόρων κτηρίων όπως πολυκατοικίες, μονοκατοικίες κλπ. Υπάρχει πολεοδομική δραστηριότητα η οποία ενδέχεται να μεταβάλλει την πληθυσμιακή πυκνότητα της περιοχής στο μέλλον.
- *Περιοχές χαμηλής πληθυσμιακής πυκνότητας:* Οι περιοχές αυτές είναι οι πιο αραιοκατοικημένες των πόλεων. Χαρακτηρίζονται από αραιή δόμηση, κυρίως με μονοκατοικίες, ενώ υπάρχει έντονη πολεοδομική δραστηριότητα που μπορεί να μεταβάλλει την πληθυσμιακή πυκνότητα.

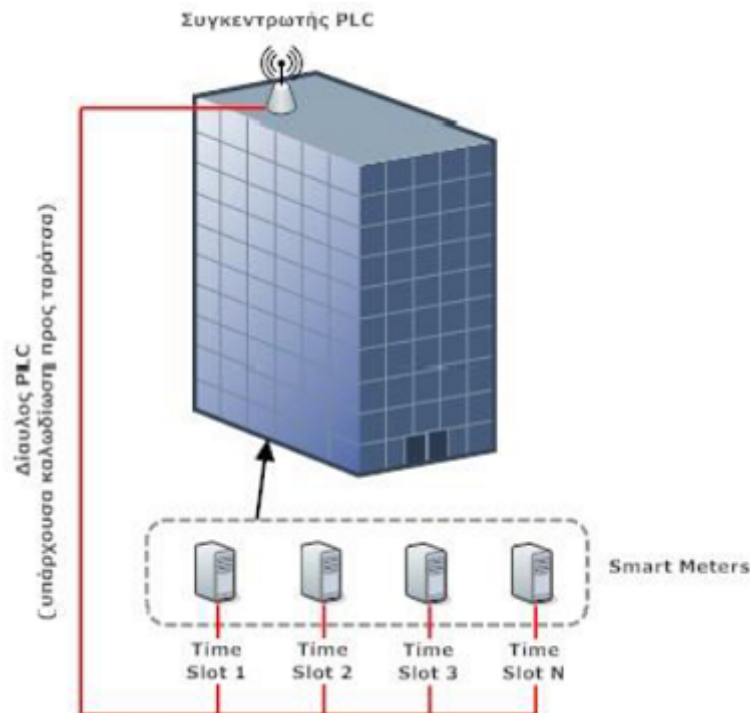
4.2 Τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες στις αστικές περιοχές

4.2.1 Περιοχές υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας

Σε αυτές τις περιοχές κυριαρχούν τα πολυόροφα κτήρια. Οι έξυπνοι μετρητές τοποθετούνται συνήθως στα σημεία τοποθέτησης των συμβατικών μετρητών, δηλαδή στη βάση του κτηρίου. Η ενσύρματη τεχνολογία PLC, καθώς και οι ασύρματες τεχνολογίες Wi-Fi και ZigBee, είναι κατάλληλες για μετάδοση των δεδομένων από τους μετρητές στον τοπικό συγκεντρωτή.

- *Χρήση PLC τεχνολογίας:* Ο τοπικός συγκεντρωτής μπορεί να τοποθετηθεί στην ταράτσα του κτηρίου, και η μετάδοση των δεδομένων από τους μετρητές να γίνει μέσω της υπάρχουσας ηλεκτρικής καλωδίωσης του κτηρίου. Κάθε συγκεντρωτής μπορεί να διαχειριστεί έως 4000 μετρητές, επομένως θα αναλάβει να αποστείλει τα δεδομένα των γειτονικών κτηρίων προς αξιοποίηση της χωρητικότητας. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις ως προς την τοποθέτηση των μετρητών στο κτήριο:

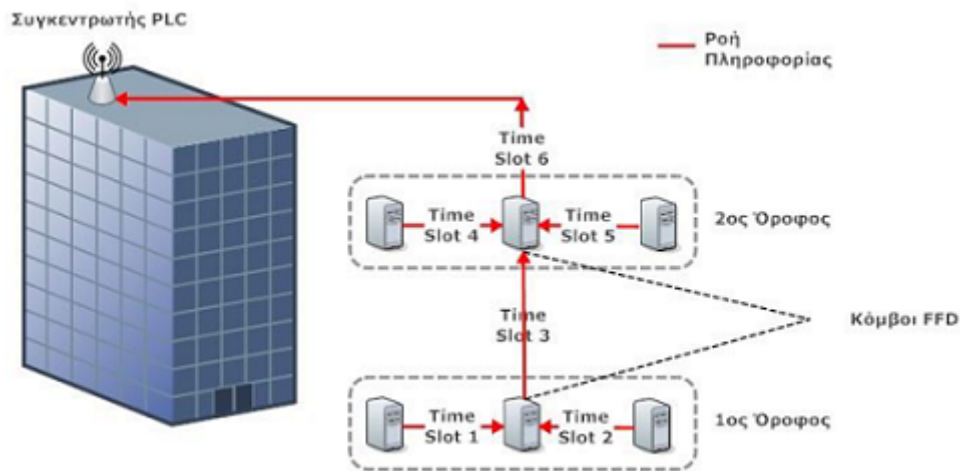
- Περίπτωση 1: Οι μετρητές είναι τοποθετημένοι στο ισόγειο-υπόγειο του κτηρίου. Τότε, επικοινωνούν απευθείας με τον συγκεντρωτή, ενώ το δίκτυο λειτουργεί με τοπολογία αστέρα. Οι μετρητές είναι κόμβοι RFD και χρησιμοποιείται η διασπορά χρόνων μετάδοσης (TDMA), προς αποφυγή συγχρούσεων.



Σχήμα 4.1: Χρήση PLC με τοπολογία αστέρα

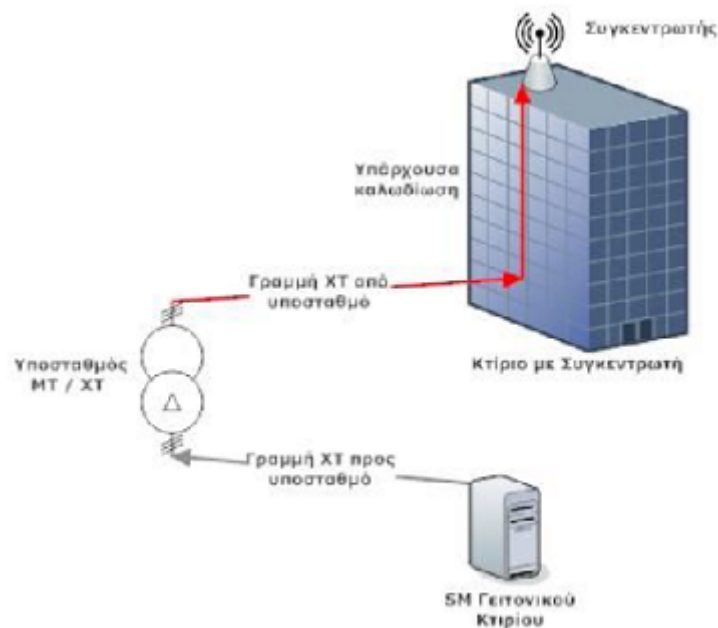
- Περίπτωση 2: Οι μετρητές είναι τοποθετημένοι σε κάθε όροφο του κτηρίου. Στην περίπτωση αυτή, σε κάθε όροφο υπάρχει ένα πλήθος από RFD κόμβους και ένας κόμβος FFD. Το δίκτυο χρησιμοποιεί τοπολογία δέντρου, δηλαδή οι κόμβοι RFD καταγράφουν τα δεδομένα και τα αποστέλλουν στον FFD, ο οποίος έχει λειτουργίες καταγραφής αλλά και προώθησης των δεδομένων στον κόμβο FFD του επόμενου ορόφου. Έτσι, με χρήση TDMA, τα δεδομένα φθάνουν

στον συγκεντρωτή στην οροφή του κτηρίου, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα:



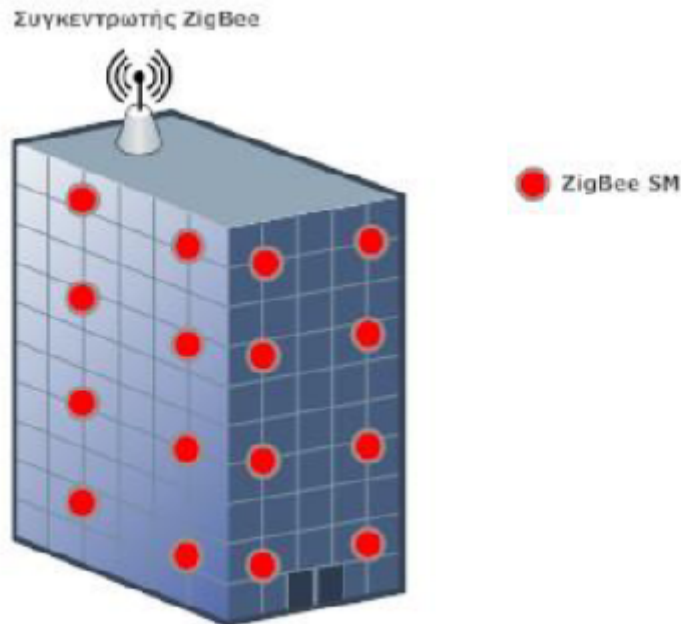
Σχήμα 4.2: Χρήση PLC με τοπολογία δέντρου

Ο συγκεντρωτής ενός κτηρίου έχει τη δυνατότητα να συλλέξει δεδομένα από μετρητές γειτονικών κτηρίων χρησιμοποιώντας PLC τεχνολογία. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω της γραμμής ΧΤ στον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ και από εκεί στον συγκεντρωτή. Η επικοινωνία αυτή παρουσιάζεται και στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 4.3: Επικοινωνία με γειτονικούς μετρητές

- Χρήση ZigBee, WiFi: Σε αυτήν την περίπτωση, το δίκτυο λειτουργεί με τοπολογία πλέγματος. Έτσι, όσοι μετρητές είναι εκτός εμβέλειας του συγκεντρωτή προωθούν τα δεδομένα τους σε κοντινούς μετρητές μέχρι να φθάσουν στον προορισμό τους. Η διαδρομή που ακολουθούν είναι δυναμική και μεταβάλλεται ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου. Οι μετρητές τοποθετούνται σε κάθε όροφο και στέλνουν τα δεδομένα ανεξάρτητα προς το συγκεντρωτή, με χρήση TDMA.



Σχήμα 4.4: Επικοινωνία με χρήση ZigBee

4.2.2 Περιοχές μέτριας πληθυσμιακής πυκνότητας

Η επικοινωνία των μετρητών με το συγκεντρωτή διαφέρει στις περιοχές αυτές, λόγω της μικρότερης πυκνότητας πληθυσμού (άρα και μειωμένου όγκου πληροφορίας), και διαφορετικών πολεοδομικών χαρακτηριστικών. Τα περιορισμένα εμπόδια, αλλά και το μικρό ύψος των κτηρίων καθιστούν τις ασύρματες τεχνολογίες καταλληλότερες για χρήση σε τέτοιου είδους περιοχές. Το ασύρματο δίκτυο για την επικοινωνία των μετρητών έχει κυψελωτή δομή. Κάθε κυψέλη έχει ένα σταθμό βάσης, ο οποίος χαρακτηρίζει την έκταση της κυψέλης. Γειτονικές κυψέλες χρησιμοποιούν διαφορετικά φάσματα συχνοτήτων, προς αποφυγή παρεμβολών και επίτευξη καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας. Τα δεδομένα μεταδίδονται απευθείας στο σταθμό βάσης της κυψέλης και από εκεί στο κέντρο

διαχείρισης, χωρίς να είναι απαραίτητη η μεσολάβηση συγκεντρωτή. Οι καταλληλότερες ασύρματες τεχνολογίες είναι WiFi και 4G/5G.

- *WiFi*: Η περιοχή κάλυψης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ισχύς της κεραίας, το ύψος της, το ανάγλυφο της περιοχής και τα εμπόδια που υπάρχουν. Μπορεί να φθάσει μερικές εκατοντάδες μέτρα, οπότε η επίτευξη της απαιτούμενης γεωγραφικής κάλυψης χρειάζεται την εγκατάσταση πολλών σταθμών βάσης. Οι ρυθμοί μετάδοσης διαφέρουν ανάλογα με την απόσταση και την ποιότητα της ζεύξης, όμως είναι αρκετά υψηλοί και ικανοποιούν τις απαιτήσεις των μετρητών που εξυπηρετούνται.
- *4G/5G*: Σε αυτήν την περίπτωση, οι μετρητές επικοινωνούν με τους σταθμούς βάσης χρησιμοποιώντας τεχνολογία 5G ή 4G, όπου δεν είναι διαθέσιμη η υποδομή. Η περιοχή κάλυψης εξαρτάται από τη συχνότητα αλλά και από τα χαρακτηριστικά της κεραίας του σταθμού βάσης, είναι όμως αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη του WiFi. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι επίσης υψηλότερος και καλύπτει τις απαιτήσεις των μετρητών.

Στις περιοχές αυτές είναι, επίσης, δυνατή και η ενσύρματη μετάδοση της πληροφορίας, μέσω της τεχνολογίας PLC. Ο συγκεντρωτής μπορεί να τοποθετηθεί στον πλησιέστερο υποσταθμό MT/XT και οι μετρητές στέλνουν τα δεδομένα μέσω του ηλεκτρικού δικτύου. Ωστόσο, η μετάδοση της πληροφορίας με αυτόν τον τρόπο στις συγκεκριμένες περιοχές, δεν έχει υψηλή αξιοπιστία λόγω της εξασθένησης του διαύλου και της απόστασης του μετρητή από τον συγκεντρωτή.

4.2.3 Περιοχές μικρής πληθυσμιακής πυκνότητας

Οι περιοχές αυτές εξυπηρετούνται μέσω 4G ή PLC. Η ασύρματη τεχνολογία είναι προτιμότερη λόγω της καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας που επιτυγχάνει. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου ο μετρητής δεν έχει δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί PLC τεχνολογία. Ο συγκεντρωτής τοποθετείται στον υποσταθμό MT/XT και συνδέεται με το δίκτυο κορμού μέσω κατάλληλης τεχνολογίας (ενσύρματης ή ασύρματης).

4.3 Διαχείριση κίνησης

4.3.1 Σημεία εγκατάστασης μετρητών και συγκεντρωτών

Τα σημεία εγκατάστασης των έξυπνων μετρητών ταυτίζονται με τα σημεία εγκατάστασης των απλών μετρητών. Επομένως, η εγκατάσταση θα γίνει είτε στο υπόγειο του κτηρίου, είτε σε κάποιο εξωτερικό σημείο. Στην περίπτωση όπου οι μετρητές δεν έχουν τη δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης της πληροφορίας που συλλέγουν, χρησιμοποιείται PLC τεχνολογία. Ο συγκεντρωτής εγκαθίσταται στον πλησιέστερο υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ, συγκεντρώνει τα δεδομένα των μετρητών που βρίσκονται στην εμβέλειά του, και τα αποστέλλει στο κέντρο διαχείρισης.

Στην περίπτωση όπου οι μετρητές έχουν τη δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης, υπάρχουν σημεία εγκατάστασης των συγκεντρωτών τα οποία εκμεταλλεύονται την ήδη υπάρχουσα υποδομή της αστικής περιοχής.

- Τοποθέτηση των συγκεντρωτών μαζί με τους σταθμούς βάσης του κυψελωτού δικτύου κινητών επικοινωνιών, αξιοποιώντας την ήδη υπάρχουσα υποδομή του δικτύου.
- Τοποθέτηση των συγκεντρωτών σε φωτιστικά του οδικού δικτύου, αξιοποιώντας την υποδομή του δημόσιου δικτύου φωτισμού.



Σχήμα 4.5: Τοποθέτηση συγκεντρωτών με εκμετάλλευση της υποδομής κινητών επικοινωνιών (κόκκινοι σύνδεσμοι) και της υποδομής του δικτύου φωτισμού (μπλε σύνδεσμοι) [13]

4.3.2 Υπολογισμός όγκου παραγόμενης κίνησης

Για τον υπολογισμό του όγκου της κίνησης στο δίκτυο, χρειάζεται να προσδιορισθεί το μέγεθος των πακέτων που παράγει ο κάθε μετρητής. Το μέγεθος αυτό μπορεί να διαφέρει κατά πολύ, ανάλογα με το είδος και το πλήθος της πληροφορίας που χρειάζεται ο πάροχος. Για απλές λειτουργίες του μετρητή, όπως καταγραφή της κατανάλωσης ενέργειας, ένα μικρό πακέτο δεδομένων προς το συγκεντρωτή είναι αρκετό. Για περίπλοκες λειτουργίες, όπως προσδιορισμός των συσκευών που βρίσκονται σε λειτουργία κάποια χρονική στιγμή, είναι απαραίτητα περισσότερα δεδομένα.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που χρειάζεται να προσδιορισθεί είναι η συχνότητα με την οποία ο μετρητής στέλνει τα δεδομένα στο συγκεντρωτή. Όπως και με το μέγεθος των πακέτων, η συχνότητα αυτή μπορεί να πάρει πολλές τιμές, και εξαρτάται από τα κτήρια στα οποία είναι εγκατεστημένοι οι μετρητές. Σε εργοστάσια, όπου υπάρχουν πολλές ηλεκτρικές συσκευές και έντονη διαφοροποίηση στη χρήση ενέργειας, τα δεδομένα μπορούν να αποστέλλονται ανά 5 λεπτά στον συγκεντρωτή. Σε ημιαστικές/αγροτικές περιοχές οι μετρητές δίνουν αναφορά κάθε 20 με 30 λεπτά.

Για τις αστικές περιοχές που μελετώνται σε αυτό το κεφάλαιο ακολουθούνται 2 πρακτικές:

- Οι μετρητές λαμβάνουν μια μέτρηση ανά 15 λεπτά και αποστέλλουν στο συγκεντρωτή ένα πακέτο με μέγεθος 125 bytes [14].
- Οι μετρητές λαμβάνουν μια μέτρηση ανά 15 λεπτά, την αποθηκεύουν, και αποστέλλουν στο συγκεντρωτή ένα πακέτο με τα δεδομένα των μετρήσεων μιας ημέρας (96 μετρήσεις) [15].

Περίπτωση 1: Έστω ότι υπάρχουν N_{sm} έξυπνοι μετρητές σε ένα δίκτυο, καθένας εκ των οποίων παράγει D_{ps} bytes και τα αποστέλλει στο συγκεντρωτή. Επομένως, τα δεδομένα τα οποία λαμβάνει ο συγκεντρωτής κάθε φορά που αποστέλλουν οι μετρητές είναι:

$$BR_{non} = N_{sm} * D_{ps} \quad (4.1)$$

Για μεγαλύτερη αξιοπιστία, μια σταθερά εμπιστοσύνης ίση με 2.5 πολλαπλασιάζει την παραπάνω τιμή, έτσι ώστε να υπολογιστεί ακριβέστερα ο ρυθμός μετάδοσης που ικανοποιεί τις προδιαγραφές ορθής λειτουργίας του δικτύου. Επομένως, τα δεδομένα που λαμβάνει ο συγκεντρωτής είναι:

$$BR_T = N_{sm} * D_{ps} * 2.5 \quad (4.2)$$

Τα πακέτα είναι μεγέθους 125 bytes, ενώ ο μέγιστος αριθμός μετρητών που μπορεί να υποστηρίξει ένας συγκεντρωτής είναι 4000. Με υλοποίηση κατάλληλου σχήματος TDMA, τα πακέτα των μετρητών φθάνουν στο συγκεντρωτή σε διαφορετικούς χρόνους. Εάν θεωρηθεί χρόνος άφιξης μεταξύ των πακέτων $n = 0.005sec$, τότε ο συγκεντρωτής θα λαμβάνει δεδομένα από 200 μετρητές κάθε δευτερόλεπτο. Επομένως, με βάση το ανωτέρω σκεπτικό:

$$BR_T = 200 * 8 * 125 * 2.5 = 500Kbps \quad (4.3)$$

Δηλαδή μια ζεύξη με χωρητικότητα 500Kbps είναι αρκετή για να υποστηρίξει ένα δίκτυο με 4000 έξυπνους μετρητές. Επίσης, είναι σημαντικό η ζεύξη να μην είναι συνεχώς δεσμευμένη από τα δεδομένα των μετρητών, καθώς υπάρχουν πακέτα υψηλής προτεραιότητας τα οποία ρυθμίζουν τη λειτουργία του δικτύου και των μετρητών, τα οποία μεταδίδονται εκτός του χρόνου αποστολής των δεδομένων των μετρήσεων.

Περίπτωση 2: Οι μετρήσεις διεξάγονται με περίοδο 15 λεπτών, δηλαδή 96 ημερήσιες μετρήσεις, και αποστέλλονται στο συγκεντρωτή 1 φορά ανά ημέρα στο διάστημα από 12 τα μεσάνυχτα έως 6 το πρωί.

Τα πακέτα μεγέθους 125 bytes της παραπάνω περίπτωσης χαρακτηρίζονται από επικεφαλίδα μεγέθους 50 bytes, κωδικοποίηση μεγέθους 22 bytes και δεδομένα μεγέθους 53 bytes. Επομένως, ο όγκος των δεδομένων που αποστέλλονται από κάθε μετρητή είναι:

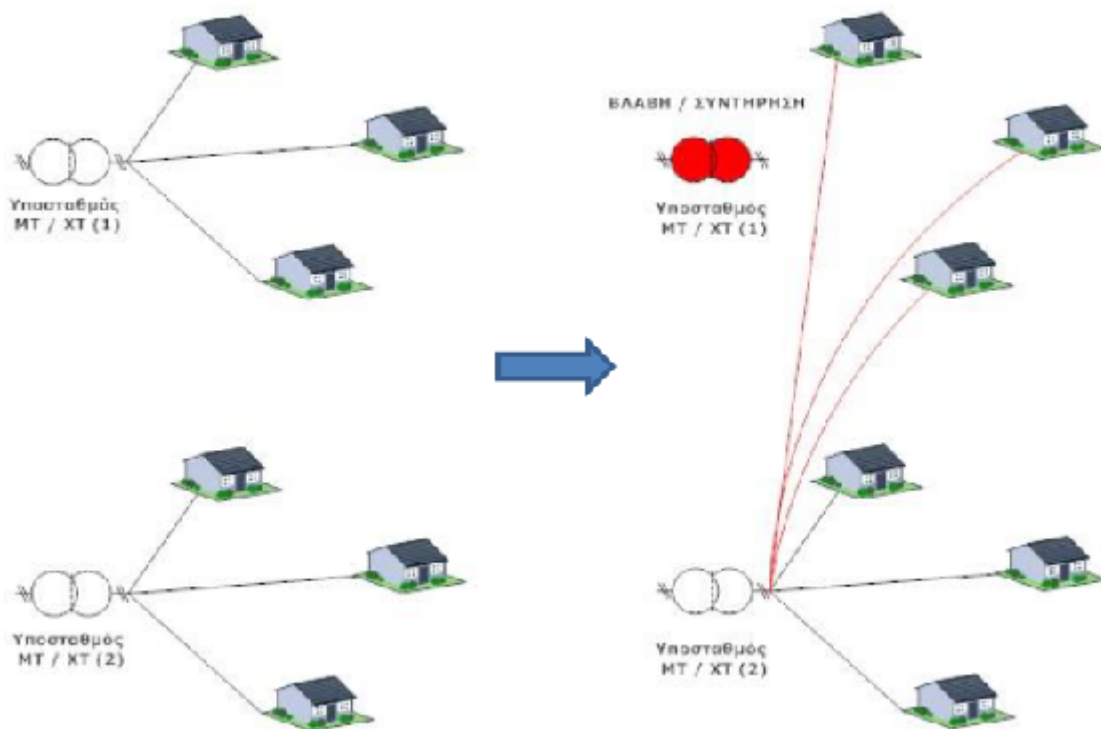
$$P = \text{Επικεφαλίδα} + \text{Δεδομένα} + \text{Κωδικοποίηση} \approx 96 * 53 \approx 5Kb$$

Ο όγκος των δεδομένων στο δίκτυο εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης των μετρητών αλλά και από την τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Λαμβάνοντας υπόψη τις 2 αυτές παραμέτρους, μπορεί να υλοποιηθεί κατάλληλο σχήμα TDMA, ώστε να αποφευχθεί υπερφόρτωση του δικτύου στο διάστημα 00:00 - 06:00 που έχει οριστεί για αποστολή δεδομένων.

Τα μεγέθη που υπολογίστηκαν στις 2 παραπάνω περιπτώσεις αποτελούν την πλέον απαιτητική σε όγκο μετάδοση πληροφορίας (μέγιστη δυνατή κίνηση στο δίκτυο). Στην πράξη, οι μετρητές και οι συγκεντρωτές έχουν δυνατότητα συμπίεσης της αρχικής πληροφορίας, ενώ τα υπόλοιπα δεδομένα που ανταλλάσσονται (εκτός των μετρήσεων), δεν είναι αρκετά για να προκαλέσουν υπερφόρτωση στο δίκτυο.

4.3.3 Λειτουργία σε περίπτωση βλάβης

Η λειτουργία των συγκεντρωτών που έχουν εγκατασταθεί σε υποσταθμούς MT/XT πρέπει να είναι εξασφαλισμένη, ακόμα και σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης του υποσταθμού. Σε αυτήν την περίπτωση, η περιοχή εξυπηρετείται από γειτονικούς μετασχηματιστές και συγκεντρωτές. Το αυξημένο πλήθος των μετρητών που θα υποστηρίξει ο γειτονικός συγκεντρωτής, πρέπει να είναι μικρότερο της μέγιστης δυναμικότητάς του, δηλαδή κάτω από 4000 μετρητές. Το σενάριο αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.6: Λειτουργία σε περίπτωση βλάβης/συντήρησης υποσταθμού

Στην πράξη ένας υποσταθμός δεν μπορεί να στηρίξει μια επιπλέον περιοχή, οπότε ο διαμοιρασμός γίνεται σε περισσότερους γειτονικούς υποσταθμούς. Σημαντικό είναι να υπάρχουν περιθώρια στους συγκεντρωτές, ώστε να μπορούν να εξυπηρετήσουν για κάποιο διάστημα επιπλέον μετρητές γειτονικών περιοχών.

4.4 Έξυπνοι μετρητές φυσικού αερίου

Η εγκατάσταση των έξυπνων μετρητών φυσικού αερίου γίνεται στα σημεία που έχουν εγκατασταθεί και οι συμβατικοί μετρητές φυσικού αερίου. Τα σημεία αυτά μπορεί να είναι εσωτερικά της οικίας στο ισόγειο, στο υπόγειο, ακόμα και εξωτερικά του κτηρίου, στο ύψος των μπαλκονιών των διαμερισμάτων. Επομένως, αφού και οι έξυπνοι μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας εγκαθίστανται σε αυτά τα σημεία, οι τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία στα δίκτυα HAN και NAN είναι οι ίδιες. Οι μετρητές φυσικού αερίου στέλνουν λιγότερα δεδομένα από τους αντίστοιχους μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας, επομένως οι απαιτήσεις για την επίτευξη της ποιότητας υπηρεσίας είναι ελαστικότερες.

4.5 Έξυπνοι μετρητές νερού

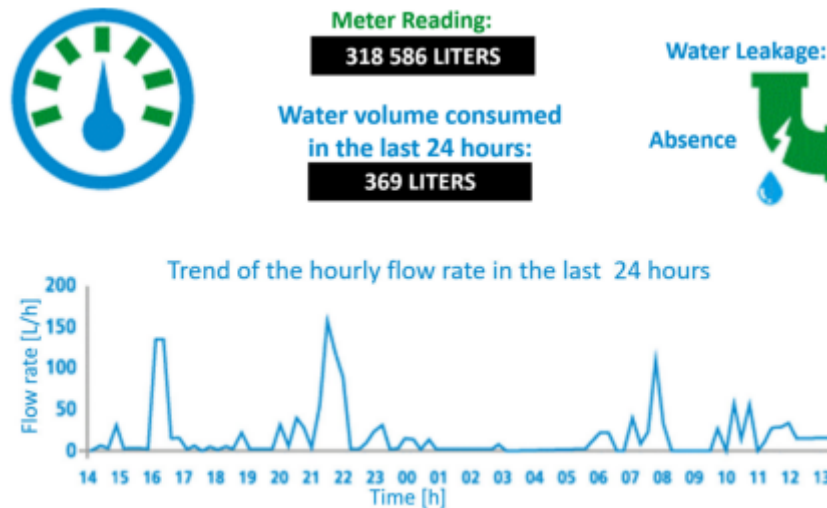
Οι έξυπνοι μετρητές νερού (Smart Water Meters - SWM) διαφέρουν από τους άλλους μετρητές, καθώς η εγκατάστασή τους γίνεται σε φρεάτια, δηλαδή κάτω από το πεζοδρόμιο. Το γεγονός αυτό καθιστά τις τεχνολογίες που έχουν μελετηθεί (ειδικά τις ασύρματες) μη εφαρμόσιμες για μετάδοση στα δίκτυα NAN και HAN. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες μεγάλης απόστασης, χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και χαμηλού ρυθμού μετάδοσης, οι οποίες είναι καταλληλότερες για τους SWM.

4.5.1 Πλεονεκτήματα SWM

Όπως και με τους έξυπνους μετρητές ηλεκτρικού ρεύματος, οι SWM μετρούν την κατανάλωση νερού, αποθηκεύουν τα δεδομένα των καταναλωτών και τα αποστέλλουν στο κέντρο διαχείρισης, το οποίο επεξεργάζεται τις πληροφορίες αυτές σε πραγματικό χρόνο. Για τους καταναλωτές, αυτό συνεπάγεται λεπτομερή κοστολόγηση, βασισμένη στα δεδομένα των μετρητών και όχι σε εκτιμήσεις, και καλύτερη διαχείριση της κατανάλωσης του νερού. Μέσω κατάλληλης εφαρμογής, οι καταναλωτές έχουν πρόσβαση στα δεδομένα της κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7.

Πολύ σημαντικές είναι, επίσης, και οι λειτουργίες που σχετίζονται με τον έλεγχο της ποιότητας του νερού και τον εντοπισμό διαρροών [16]. Οι μετρητές έχουν δυνατότητα καταγραφής του pH, της θερμοκρασίας, της αγωγιμότητας και άλλων παραμέτρων του νερού, οι οποίες πρέπει να είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων για την ασφαλή κατανάλωσή του. Σε αντίθετη περίπτωση, ειδοποιούνται άμεσα οι καταναλωτές και ο πάροχος προς επιδιόρθωση της βλάβης.

Ο αλγόριθμος εντοπισμού διαρροών που έχει αναπτυχθεί στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της σπατάλης του νερού. Συγκεκριμένα, μια φορά την ημέρα, παράγεται ένα σήμα το οποίο ειδοποιεί για πιθανή διαρροή στο σύστημα, μέσω



Σχήμα 4.7: Δεδομένα που παρέχουν οι SWM [16]

επεξεργασίας των δεδομένων που έχουν καταγραφεί. Η κατανάλωση νερού στις κατοικημένες περιοχές χαρακτηρίζεται από περιόδους της ημέρας με υψηλή κατανάλωση και άλλες περιόδους (συνήθως βραδινές ώρες), όπου η κατανάλωση είναι μηδενική. Αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση διαρροής, όπου η ροή του νερού είναι συνεχής και η κατανάλωση δεν μηδενίζεται. Επομένως, ο μετρητής ελέγχει τη ροή του νερού κατά τις ώρες 02:00 - 05:00, όπου η συνήθης κατανάλωση είναι ελάχιστη. Στην περίπτωση όπου εντοπιστεί συνεχής ροή του νερού αυτές τις ώρες, ο μετρητής θα στείλει σήμα για πιθανή διαρροή.

4.5.2 Επισκόπηση τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών

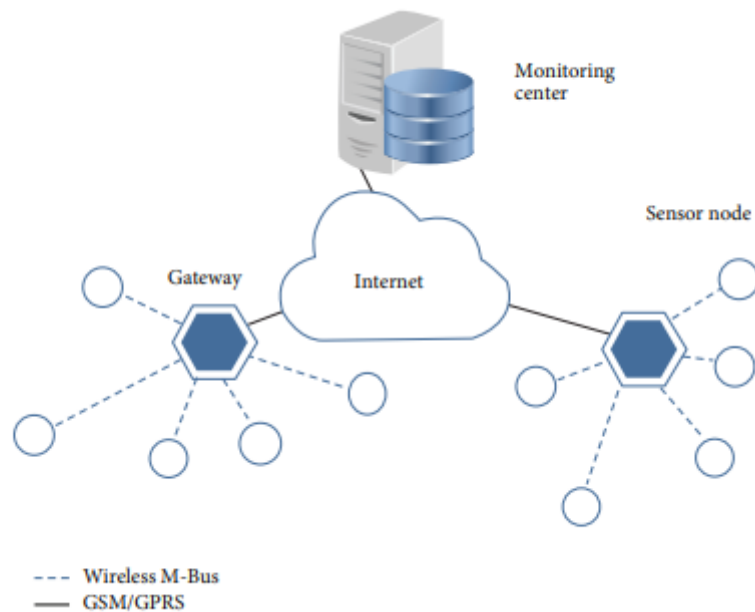
Το πρωτόκολλο WM-Bus

Τα δίκτυα μικρής εμβέλειας που χρησιμοποιούν οι μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας, όπως τα ZigBee, WiFi, Bluetooth, δεν προσφέρουν πάντα αξιόπιστη μετάδοση από το μετρητή νερού στο MDMS. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο WM-Bus, μια τεχνολογία σχεδιασμένη αποκλειστικά για εφαρμογές έξυπνων μετρητών. Για τη μετάδοση της πληροφορίας σε μεγάλες αποστάσεις απαιτείται χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, λόγω του είδους των κόμβων και των συχνοτήτων όπου μεταδίδεται η πληροφορία. Χρησιμοποιούνται οι ζώνες των 868 MHz, 468 MHz και, με μικρότερο ρυθμό μετάδοσης, η ζώνη 169 MHz. Λόγω των περιορισμένων απωλειών μετάδοσης, η χαμηλότερη ζώνη των 169 MHz επιτρέπει μετάδοση σε μεγαλύτερη απόσταση με λιγότερη ισχύ.

Ανάλογα με την εφαρμογή, οι μετρητές και οι συγκεντρωτές επικοινωνούν με διαφορετικούς τρόπους. Οι ρυθμίσεις αυτές καθορίζουν τη ροή της πληροφορίας και την κατανάλωση ισχύος κατά τη μετάδοση. Στη συνέχεια, φαίνονται οι βασικές λειτουργίες του WM-Bus [17]:

- *Λειτουργία T*: Λειτουργία συχνής μετάδοσης (αρκετές φορές το λεπτό), όπου χρησιμοποιείται η ζώνη των 868 MHz, με ρυθμό μετάδοσης έως 100 Kbps. Χωρίζεται σε δυο κατηγορίες, με τη λειτουργία T_1 να μην απαιτεί επιβεβαίωση (ACK), σε αντίθεση με τη λειτουργία T_2 , όπου απαιτείται επιβεβαίωση.
- *Λειτουργία S*: Λειτουργία στασιμότητας (μερικές μεταδόσεις ανά ημέρα), όπου χρησιμοποιείται η ζώνη των 868 MHz, με ρυθμό μετάδοσης έως 37.2Kbps. Χωρίζεται σε δυο κατηγορίες, με τη λειτουργία S_1 να μην απαιτεί πακέτο ACK σε αντίθεση με τη λειτουργία S_2 , όπου απαιτεί.

Το δίκτυο μετρητών νερού που χρησιμοποιεί WM-Bus έχει ιεραρχική τοπολογία, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 4.8: Τοπολογία δικτύου WM-Bus [17]

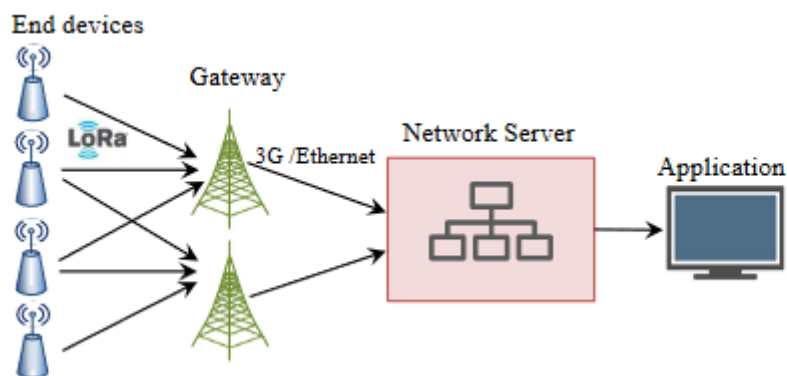
Οι περιφερειακοί κόμβοι - φύλλα, οι οποίοι έχουν δυνατότητα μετάδοσης σε μικρές αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ισχύος, συνδέονται με κεντρικό κόμβο που λειτουργεί ως πύλη του δικτύου. Οι κεντρικοί κόμβοι που συλλέγουν τα δεδομένα είναι εφοδιασμένοι με GSM/GPRS ώστε να έχουν δυνατότητα μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις. Λόγω της ισχύος που απαιτείται από τους κόμβους-πύλες (για αποστολή δεδομένων σε μεγάλη απόσταση), χρησιμοποιείται η ενέργεια του έξυπνου δικτύου ή φωτοβολταϊκών. Οι περιφερειακοί κόμβοι μπορούν να συντηρηθούν με μπαταρίες για αρκετά χρόνια λόγω της ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας.

Low Power Wide Area Networks (LPWAN)

Οι πρόσφατες βελτιώσεις στο Internet of Things (IoT) έχουν οδηγήσει σε νέες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες, κατάλληλες για τα συστήματα ευφυούς μέτρησης. Τα δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWAN) αποτελούν κατάλληλη λύση για τους SWM. Οι τεχνολογίες LPWAN χαρακτηρίζονται από χαμηλή κατανάλωση ισχύος, ευρεία περιοχή κάλυψης, ενώ χρησιμοποιούν μετάδοση στενής ζώνης για μεγαλύτερη αξιοπιστία στη μετάδοση των δεδομένων. Επομένως, οι τεχνολογίες αυτές έχουν εφαρμογή στις περιπτώσεις όπου απαιτείται χαμηλός ρυθμός μετάδοσης σε μεγάλη απόσταση και μεγάλη ζωή μπαταρίας. Οι καταλληλότερες περιπτώσεις εφαρμογής είναι [18]:

- Σε εφαρμογές του έξυπνου δικτύου στις πόλεις και στους έξυπνους μετρητές, αλλά και για επικοινωνία μεταξύ μηχανών (Machine to Machine - M2M).
- Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, όπως έξυπνη γεωργία και οι SWM.

Αρκετές LPWAN τεχνολογίες, όπως οι LoRaWAN, SigFox, NB-IoT, ECGSM-IoT, έχουν μελετηθεί για πιθανή εφαρμογή στο smart grid. Η πιο ανεπτυγμένη από αυτές είναι η τεχνολογία LoRaWAN. Λειτουργεί στις ζώνες 868 MHz, 915 MHz και 433 MHz, και προσφέρει ακτίνα κάλυψης έως 30 km σε αγροτικές περιοχές και έως 8 km σε αστικές. Στο σχήμα 4.9 φαίνεται η αρχιτεκτονική ενός δικτύου LoRa:



Σχήμα 4.9: Αρχιτεκτονική δικτύου LoRa [19]

Το δίκτυο LoRa έχει τοπολογία αστέρα, όπου η πύλη προωθεί τα δεδομένα από τους μετρητές στο υπόλοιπο δίκτυο. Οι μετρητές επικοινωνούν με την πύλη μέσω LoRaWAN, ενώ η πύλη χρησιμοποιεί την τοπική κυψελωτή

υποδομή 4G/5G, ενώ σε περιοχές που δεν υπάρχει ακόμα η υποδομή χρησιμοποιείται GPRS/3G. Οι έξυπνοι μετρητές του δικτύου έχουν τρεις λειτουργίες, A, B και C. Σε κάθε λειτουργία διαφέρει ο ρυθμός μετάδοσης και η κατανάλωση ενέργειας, επομένως χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής [18].

- *Λειτουργία A:* Πρόκειται για την προεπιλεγμένη λειτουργία των συσκευών LoRa, όπου η επικοινωνία εκκινεί από τη συσκευή και είναι ασύγχρονη. Ο μετρητής μπορεί να στείλει δεδομένα οποιαδήποτε στιγμή και, στη συνέχεια, η μετάδοση ακολουθείται από δυο χρονικά παράθυρα, όπου υπάρχει η δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας ή εντολών ελέγχου, εάν είναι απαραίτητο. Οι χρόνοι μετάδοσης προγραμματίζονται ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Με το πέρας των παραθύρων, η συσκευή εισέρχεται σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (sleep mode), μέχρι την επόμενη προγραμματισμένη μετάδοση. Η επικοινωνία προς τη συσκευή δεν είναι δυνατή σε αυτήν τη λειτουργία.

Η λειτουργία A χαρακτηρίζεται από τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, όμως υπάρχει καθυστέρηση σε περίπτωση επικοινωνίας προς το μετρητή.

- *Λειτουργία B:* Στη λειτουργία B, επιπλέον των δυο παραθύρων της λειτουργίας A, οι συσκευές συγχρονίζονται με το δίκτυο στέλνοντας περιοδικά μηνύματα διαθεσιμότητας για αμφίδρομη επικοινωνία. Στην περίπτωση αυτή, τα μηνύματα από το δίκτυο προς τη συσκευή έχουν μικρότερη καθυστέρηση, με κόστος μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Η μέγιστη δυνατή καθυστέρηση είναι 128 s, ενώ η πρόσθετη κατανάλωση είναι αρκετά χαμηλή, με στόχο η συσκευή να μπορεί να τροφοδοτηθεί από μπαταρία.
- *Λειτουργία C:* Η λειτουργία C μηδενίζει την καθυστέρηση της επικοινωνίας προς τη συσκευή, έχοντας το δέκτη σε συνεχή λειτουργία. Το δίκτυο μπορεί να στείλει οποιαδήποτε στιγμή δεδομένα ή εντολές προς τη συσκευή. Η λειτουργία αυτή χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Επομένως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που έχουν δυνατότητα συνεχούς τροφοδότησης.

Η τεχνολογία LoRa χαρακτηρίζεται από 5 παραμέτρους: συχνότητα φέρωντος, εύρος ζώνης, ισχύς μετάδοσης, παράγοντας διασποράς, και ρυθμός κώδικα. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών μεταβάλλονται αντίστοιχα με τις ανάγκες του συστήματος, επηρεάζοντας το ρυθμό μετάδοσης, την ακτίνα κάλυψης, την ευρωστία του συστήματος, και την κατανάλωση ενέργειας [19].

5 Κεφάλαιο: Επικοινωνία χωρίς συγκεντρωτές

5.1 Θέση εγκατάστασης και τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες SM

Σύμφωνα με τη διακήρυξη του ΔΕΔΔΗΕ, τα σημεία εγκατάστασης των έξυπνων μετρητών ταυτίζονται με τα σημεία εγκατάστασης των συμβατικών μετρητών. Η επιλογή αυτή διατηρεί την υπάρχουσα εγκατάσταση, επομένως δεν προκύπτει επιπλέον κόστος ενδεχόμενης τροποποίησής της. Στην περίπτωση που η εγκατάσταση γίνει σε υπόγειο χώρο, όπου δεν είναι δυνατή η πρόσβαση με ασύρματη τεχνολογία, θα χρησιμοποιηθεί PLC τεχνολογία μέχρι το συγκεντρωτή, ο οποίος βρίσκεται στον κοντινότερο υποσταθμό MT/XT. Στην περίπτωση που ο μετρητής είναι προσβάσιμος από ασύρματη τεχνολογία, τότε η χρήση κυψελωτών δικτύων επιτρέπει την απευθείας σύνδεση στο δίκτυο WAN, χωρίς τη μεσολάβηση συγκεντρωτή.

Οι έξυπνοι μετρητές νερού, η εγκατάσταση των οποίων γίνεται σε φρεάτια, δεν έχουν δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο WAN χωρίς μεσολάβηση συγκεντρωτή. Στην περίπτωση που υπάρχει δυνατότητα χρήσης ασύρματης τεχνολογίας, υπάρχει συνδυασμός LPWAN/WM-Bus τεχνολογιών με τα κυψελωτά δίκτυα. Επομένως, η εγκατάσταση συγκεντρωτών μπορεί να αποφευχθεί όταν συλλογούνται δεδομένα από μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου, οι οποίοι βρίσκονται σε σημεία προσβάσιμα από ασύρματες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες.

5.2 P2P έξυπνοι μετρητές

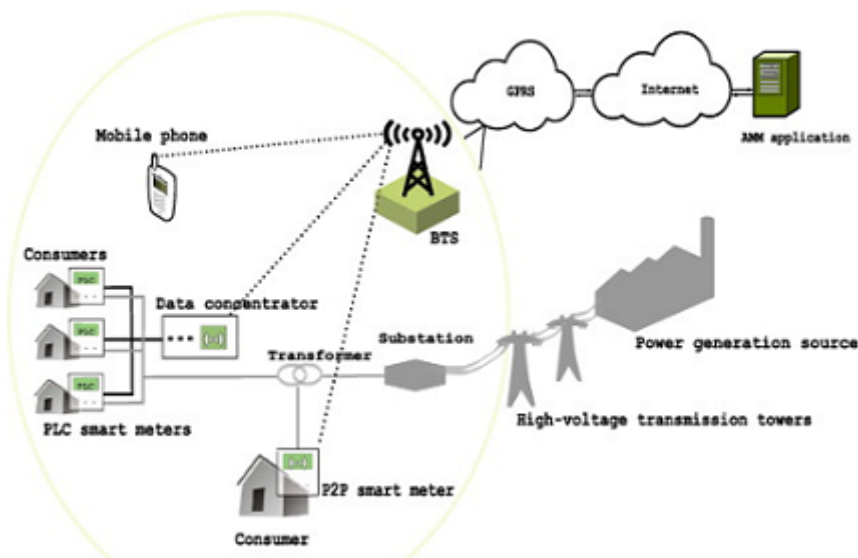
Οι Point-to-Point (P2P) έξυπνοι μετρητές συνδέονται απευθείας στο δίκτυο WAN, μέσω κυψελωτών δικτύων, χωρίς τη μεσολάβηση συγκεντρωτή. Η χρήση των P2P μετρητών είναι απαραίτητη, όταν η απόσταση μεταξύ του μετρητή και του κοντινότερου συγκεντρωτή είναι μεγάλη (πάνω από 300 μέτρα), επομένως έχουν εφαρμογή κυρίως σε ημιαστικές/αγροτικές περιοχές. Στην περίπτωση που δεν πραγματοποιηθεί εγκατάσταση συγκεντρωτή σε κάποια περιοχή, προς μείωση του κόστους του δικτύου, εγκαθίστανται P2P μετρητές.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1, μια κυψέλη στο έξυπνο δίκτυο αποτελείται από τα παρακάτω:

- **Σταθμός βάσης (Base Tranceiver Station - BTS):** Είναι υπεύθυνος για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών (κινητά τηλέφωνα, έξυ-

πνοι μετρητές, κλπ.) και του δικτύου. Αποτελείται από αρκετούς πομποδέκτες, οι οποίοι επιτρέπουν την εξυπηρέτηση διαφορετικών συχνοτήτων, αλλά και τη χρήση σχήματος TDMA για τις M2M επικοινωνίες στην κυψέλη.

- *P2P μετρητές και συγκεντρωτές*: Οι συγκεντρωτές συλλέγουν τα δεδομένα από τους PLC μετρητές και τα αποστέλλουν στο σταθμό βάσης, ενώ οι P2P μετρητές στέλνουν τα δεδομένα απευθείας στο σταθμό. Περιγράφονται από χαρακτηριστικά όπως η τοπολογία του δικτύου, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, το πλήθος των μετρητών που συνδέονται σε συγκεντρωτή και το πλήθος των P2P μετρητών.
- Το επιπλέον φορτίο που έχει να διαχειριστεί ο σταθμός βάσης (εκτός των έξυπνων μετρητών), το οποίο αναπαρίσταται από το κινητό τηλέφωνο.



Σχήμα 5.1: Αναπαράσταση κυψέλης έξυπνου δικτύου

5.3 Πλεονεκτήματα χρήσης κυψελωτών δικτύων στο smart grid

Η χρήση κυψελωτών δικτύων για απευθείας σύνδεση των μετρητών στο WAN προσφέρει οικονομικά και λειτουργικά οφέλη. Τα οικονομικά πλεονεκτήματα αφορούν τη μελέτη, την εγκατάσταση του εξοπλισμού αλλά και τη λειτουργία του δικτύου, ενώ τα λειτουργικά σχετίζονται με τις πρόσθετες δυνατότητες που έχουν οι SM:

- Μηδενισμός κόστους εγκατάστασης συγκεντρωτών, αφού οι μετρητές συνδέονται απευθείας στο WAN.

- Δεν απαιτείται νέα τηλεπικοινωνιακή μελέτη, καθώς γίνεται χρήση του υπάρχοντος δικτύου.
- Οι τεχνολογίες 3G, 4G, LTE αποτελούν ώριμες και αποτελεσματικές τεχνολογίες, με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλή καθυστέρηση, ενώ μπορεί να γίνει εύκολα η μετάβαση στη χρήση 5G .
- Οι έξυπνοι μετρητές γίνονται πιο αποτελεσματικοί, καθώς μειώνεται ο χρόνος που χρειάζονται τα δεδομένα να φτάσουν στο MDMS.
- Εξασφαλισμένη ασφάλεια των δεδομένων, καθώς γίνεται χρήση αξιόπιστων τεχνολογιών.

5.4 5G κυψελωτά δίκτυα

Τα ασύρματα δίκτυα 5G θα υποστηρίξουν 3 υπηρεσίες: enhanced mobile broadband (eMBB), massive machine-type communications (mMTC) και ultra-reliable low latency communications (URLLC). Η υπηρεσία eMBB υποστηρίζει πολύ υψηλές ταχύτητες και μόνιμη ασύρματη σύνδεση, ακόμα και αν ο χρήστης είναι μέσα σε πλήθος ή σε αγροτική περιοχή. Η υπηρεσία mMTC υποστηρίζει την επικοινωνία μεταξύ μεγάλου πλήθους συσκευών, οι οποίες είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Τέλος, η υπηρεσία URLLC στοχεύει στη διατήρηση συνδέσεων μεγάλης σημασίας, με μείωση των σφαλμάτων στη λήψη (packet error rate $\approx 10^{-6}$), και καθυστέρηση μετάδοσης μικρότερη των 5ms.

Η επικοινωνία στο smart grid έχει κεντρικό ρόλο στην ενίσχυση του ενεργειακού τομέα μέσω του 5G. Γίνεται χρήση της υπηρεσίας URLLC σε εφαρμογές προστασίας και ελέγχου του δικτύου, αλλά και της υπηρεσίας mMTC προς υποστήριξη των έξυπνων μετρητών.

Βιβλιογραφία

- [1] T. E. P. Company, "Basic Specifications for Smart Meter Communications", 2012.
- [2] Jixuan Zheng, David Wenzhong Gao, Li Lin "Smart Meters in Smart Grid: An Overview", 2013.
- [3] Wikipedia, "Multi-access edge computing"
- [4] Libelium, "50 Sensor Applications for a Smarter World", Libelium.
- [5] Mitul Modi, "A Review on Smart Meter System", 2015.
- [6] Yaspy Joshva Chandrasekaran, Shine Let Gunamony, Benin Pratap Chandran, "Integration of 5G Technologies in Smart Grid Communication: A Short Survey", 2019
- [7] Vehpi Gungor, Dilan Sahin, Salih Ergut, Carlo Cecati, "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards", 2011
- [8] Dmitry Baimel, Saad Tapuchi, Nina Baimel, "Smart Grid Communication Technologies", 2016
- [9] Wikipedia, "IEEE 802.15.4"
- [10] Pardeep Kumar, Yun Lin, Guangdong Bai, Andrew Paverd, Jin Song Dong, Andrew Martin, "Smart Grid Metering Networks: A Survey on Security, Privacy and Open Research Issues", 2019
- [11] Murat Kuzlu, Manisa Pipattanasomporn, Saifur Rahman, "Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN", 2014
- [12] Fredrik Ege Abrahamsen, Yun Ai, Michael Cheffena, "Communication Technologies for Smart Grid: A Comprehensive Survey", 2021
- [13] Marina Barbiroli, Franco Fuschini, Giovanni Tartarini, Giovanni Emanuele Corazza, "Smart Metering Wireless Networks at 169 MHz", 2017

[14] Vahid Kouhdaragh, Daniele Tarchi, Alessandro Vanelli-Coralli, Giovanni E. Corazza, "Smart Meters Density Effects on the Number of Collectors in a Smart Grid", 2015

[15] ΔΕΔΔΗΕ, 'Εγχειρίδιο Τηλεμέτρησης Μετρητών και Μετρήσεων Μ.Τ.', 2013

[16] Chiara Luciani, Francesco Casellato, Stefano Alvisi, "Green Smart Technology for Water (GST4Water): Water Loss Identification at User Level by Using Smart Metering Systems", 2019

[17] Susanna Spinsante, Stefano Squartini, Leonardo Gabrielli, "Wireless M-Bus Sensor Networks for Smart Water Grids: Analysis and Results", 2014

[18] Carine Zaraket, Panagiotis Papageorgas, Michel Aillerie, Kyriakos Agavanakis, "LoRaWAN IoT Technology for Energy Smart Metering Case Study Lebanon", 2021

[19] Rida El Chall, Samer Lahoud, Melhem El Helou, "LoRaWAN Network: Radio Propagation Models and Performance Evaluation in Various Environments in Lebanon", 2019