



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Έξυπνα Σπίτια

Αυγουστάκης Ιωάννης

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Σταμούλης

Ιούλιος 2018



UNIVERSITY OF THESSALY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Smart Houses

Avgoustakis Ioannis

Supervisor: Professor George Stamoulis

July 2018

Περίληψη

Σε μία εποχή που η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει κάνει μεγάλα βήματα για την επίλυση πασίδηλων προβλημάτων, οι οικιακοί αυτοματισμοί δεν αποτελούν εξαίρεση αυτής της ανάπτυξης. Κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εισαγάγει τον αναγνώστη στις ήδη υπάρχουσες μεθόδους και τεχνολογίες που έχουν ενσωματωθεί για την δημιουργία ενός Έξυπνου Σπιτιού. Επιπρόσθετα, δίνεται έμφαση στις τεχνικές διαχείρισης της ενέργειας των κεντρικότερων οικιακών πτυχών όπως θέρμανση, ψύξη και εξαερισμός καθώς επίσης παρουσιάζοντας απτές ερευνητικές ή βιομηχανικές υλοποιήσεις. Τέλος, στόχος μας είναι να σκιαγραφήσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά και οφέλη των Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων και των Έξυπνων Κτηρίων, όπως και την σύνδεση τους με τα Έξυπνα Σπίτια ως συστατικά στοιχεία ενός καινοτόμου σχεδίου αστικής ανάπτυξης.

Abstract

In a new era, technology is a significant tool in order to solve all major issues. The main purpose of this diploma thesis is to introduce the reader to the existing methods and technologies that have been incorporated in a Smart House/Home. In addition, emphasis is shifted to energy management techniques as far the main residential aspects are concerned such as heating, cooling, and ventilation along with the presentation of research and industrial implementations. Finally, our goal is not only to outline the primary features and benefits of Smart Electrical Networks and Smart Buildings, but also their connection with Smart Houses as they entail components of an innovative urban redevelopment project.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Σταμούλη Γεώργιο καθώς χωρίς τη σημαντική βοήθεια, συμπαράσταση, υπομονή και επιμονή του δεν θα είχε ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε, τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Μπαργιώτα Δημήτριο. Αλλά πιο πολύ ευχαριστώ την οικογένεια μου, τους φίλους μου και την Έλενα για την στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

1.	Εισαγωγή.....	1
2.	Γενικά στοιχεία.....	2
2.1.	Ενεργειακό Πρόβλημα.....	2
2.2.	Ευρωπαϊκή Πραγματικότητα.....	2
2.3.	Ελληνική Πραγματικότητα.....	4
2.4.	Πράσινη Τεχνολογία.....	6
3.	Έξυπνα Κτήρια και Σπίτια μέρος των Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων.....	9
3.1.	Έξυπνα Ηλεκτρικά Δίκτυα.....	9
3.1.1.	Χαρακτηριστικά Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων.....	11
3.1.2.	Πλεονεκτήματα Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων.....	13
3.1.3.	Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας.....	14
3.2.	Έξυπνα Κτήρια.....	16
3.2.1.	Αρχιτεκτονική Δόμησης Έξυπνων Κτηρίων.....	17
3.2.2.	Κεντρικό Σύστημα Διαχείρισης Κτηρίων BMS.....	18
3.2.3.	Δίκτυο Επικοινωνίας BMS.....	21
3.3.	Έξυπνα Σπίτια.....	22
3.3.1.	Πρωτόκολλα επικοινωνίας Έξυπνων Σπιτιών.....	24
3.3.1.1.	Ενσύρματα Πρωτόκολλα.....	24
3.3.1.2.	Ασύρματα Πρωτόκολλα.....	25
3.3.1.3.	Internet of Things.....	31
4.	Τεχνικές Εγκατάστασης Έξυπνων Σπιτιών.....	33
4.1.	Θέρμανση και Ψύξη.....	33
4.1.1.	Κύριο Έξυπνο Σύστημα Θέρμανσης (PS).....	34
4.1.2.	Δευτερέων Έξυπνο Σύστημα Θέρμανσης (SS).....	35
4.2.	Εξαερισμός.....	36
4.2.1.	Οικιακός ενσωματωμένος ελεγκτής εξαερισμού-ενέργειας (RIVEC).....	36
4.3.	Φωτισμός.....	38
4.3.1.	Εμπορικά Συστήματα Έξυπνου Φωτισμού.....	38

4.3.2. Ευφυή Συστήματα Φωτισμού Εξοικονόμησης Ενέργειας	39
4.3.3. Προχωρημένα Συστήματα Φωτισμού	42
5. Συμπεράσματα.....	43

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1. Καθαρή παραγωγή από συμβατικές μονάδες στο σύστημα (GWh)	5
Εικόνα 2. Εμπορικά Προγράμματα Εισαγωγών Μάρτιος 2018 (MWh).....	5
Εικόνα 3. Κατανομή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για το έτος 2017.....	6
Εικόνα 4. Διασύνδεση του Έξυπνου Δικτύου με Έξυπνα Σπίτια και Κτήρια (Πηγή: [7])	9
Εικόνα 5. Αρχιτεκτονική ενός Έξυπνου Κτηρίου.	12
Εικόνα 6. Ένα δίκτυο συστήματος SCADA	15
Εικόνα 7. Ένα τυπικό σύστημα Έξυπνης Μέτρησης	16
Εικόνα 8. Αρχιτεκτονική Δόμησης Έξυπνων Κτηρίων (Πηγή: [17])	17
Εικόνα 9. Διάφορες πτυχές λειτουργίας του BMS	18
Εικόνα 10. Οικιακό σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας με PID controller (Πηγή: [21]).....	19
Εικόνα 11. Τοπολογία ZigBee σε Σχήμα Αστέρα (Star Topology)	27
Εικόνα 12. (a) Τοπολογία ZigBee σε Σχήμα Πλέγματος (Mesh Topology).....	28
Εικόνα 13. (a) Επικοινωνία με χρήση ραδιοφάρου (beacon-enabled).	28
Εικόνα 14. Παράδειγμα για το ασύρματου HAN με βάση το 6LoWPAN. Απόφαση δρομολόγησης με: α)Mesh Under β)Route Over.....	30
Εικόνα 15. Πρωτόκολλα BMS και Έξυπνων Κτηρίων (Πηγή: [41]).....	31
Εικόνα 16. Μία προοπτική ενός συστήματος θέρμανσης σε ένα Έξυπνο Σπίτι.	34
Εικόνα 17. Πρωτεύον Σύστημα Θέρμανσης	35
Εικόνα 18. Δευτερεύον Σύστημα Θέρμανσης.	36
Εικόνα 19. Σύστημα με κεντρικό εξαερισμό και παροχή τροφοδοσίας.....	37
Εικόνα 20. Αξιοσημείωτες σειρές προϊόντων για εμπορικά συστήματα έξυπνου φωτισμού	38
Εικόνα 21. Τυπικό σύστημα ελέγχου ημερήσιας συγκομιδής φωτός.	40
Εικόνα 22. Τεχνική συγκομιδής ανοιχτού βρόγχου που χρησιμοποιεί το φυσικό φως για να συμπληρώσει τα επίπεδα φωτεινότητας ενός χώρου.	41

1. Εισαγωγή

Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ένας όρος που έχει απασχολήσει ανά καιρούς πολλές επιστημονικές έρευνες και επιστημονικούς κλάδους, ενώ η μελέτη και η εύρεση καινούργιων τεχνολογιών που βασίζονται στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης τείνει να γίνει πιο επιτακτική από ποτέ. Καίρια ζητήματα, όπως η αναμενόμενη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού ή η εξάντληση των συμβατικών πηγών ενέργειας φαίνεται να οξύνουν ακόμα περισσότερο το παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο.

Με βάση αυτό το πλαίσιο και σε συνδυασμό με την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας, τα τελευταία χρόνια γεννήθηκε μία καινούργια προσέγγιση που προβλέπεται να επηρεάσει κατά πολύ ένα οικιακό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, οι βιομηχανίες οικιακών αυτοματισμών δημιουργούν νέες τεχνοοικονομικές μελέτες με στόχο την ενσωμάτωση της παρούσας τεχνολογίας στις σημερινές κατοικίες, εισάγοντας την έννοια του Έξυπνου Σπιτιού. Τα Έξυπνα Σπίτια αποτελούν ένα μέρος ενός ευρύτερου σχεδίου ανάπλασης των σημερινών πόλεων που προσδοκάται μελλοντικά να υιοθετηθεί από πολλές χώρες. Το εν λόγω σχέδιο έχει σκοπό την διασύνδεση όλων των διαφόρων κτηρίων που βρίσκονται σε ένα αστικό περιβάλλον μέσω ενός ηλεκτρικού δικτύου, γνωστό και ως Έξυπνο Ηλεκτρικό Δίκτυο.

Πριν προχωρήσουμε όμως αναλύοντας αυτές τις έννοιες, είναι σημαντικό να παρουσιάσουμε την σημερινή ενεργειακή πολιτική αλλά και τους μελλοντικούς στόχους που έχουν τεθεί από την Ελλάδα αλλά και ευρύτερα από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Τέλος θεωρούμε κρίσιμο να συζητήσουμε ποια είναι τα χαρακτηριστικά της πράσινης τεχνολογίας καθώς αποτελεί υπόβαθρο των περισσότερων τεχνολογιών που θα διερευνηθούν στην παρούσα διπλωματική.

2. Γενικά στοιχεία

2.1. Ενεργειακό Πρόβλημα

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που κλήθηκε να λύσει ο άνθρωπος από την δημιουργία του μέχρι και σήμερα, είναι η κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών. Μέχρι τις αρχές του 18ου αιώνα οι κυριότερες μορφές ενέργειας που εκμεταλλεύτηκε ήταν η αιολική και η υδραυλική, μέσω των ανεμόμυλων και νερόμυλων αντίστοιχα, καθώς επίσης και την ενέργεια ζώων αυξάνοντας έτσι τις δυνατότητες του και ενισχύοντας την θέση του στο περιβάλλον στο οποίο έπρεπε να επιβιώσει. Μετά την βιομηχανική επανάσταση, τα ορυκτά καύσιμα όπως το κάρβουνο, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο έγιναν από τις επικρατέστερες μορφές ενέργειας. Όπως είναι λογικό, με το πέρασμα του χρόνου μπορούμε να δούμε πώς αυτές οι ανάγκες ολοένα και αυξάνονται. Η κορύφωση των ενεργειακών αναγκών φαίνεται να εμφανίζεται κυρίως στην πετρελαϊκή κρίση του 1973. Το θέμα της ενέργειας παραμένει στο επίκεντρο αυτού του αιώνα και μπορεί να περιγραφεί από τρεις διαφορετικές σκοπιές:

- i. Της εξασφάλισης της αναγκαίας ποσότητας ενέργειας, στην κατάλληλη για την κάθε χρήση μορφή, δηλαδή της ενεργειακής επάρκειας.
- ii. Του κόστους αυτής της ενέργειας.
- iii. Των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση της.

Αυτές οι τρεις απόψεις συνθέτουν ό,τι έχει γίνει ευρύτερα γνωστό με τον όρο «ενεργειακό πρόβλημα».

2.2. Ευρωπαϊκή Πραγματικότητα

Τα αποτελέσματα του «ενεργειακού προβλήματος» έχουν οδηγήσει την ευρωπαϊκή ένωση να βρει λύσεις σχετικά με την αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, τις ευμετάβλητες τιμές της καθώς και τις διάφορες διαταραχές στην παροχή ενέργειας στις ευρωπαϊκές χώρες. Το 2007 η στρατηγική της ΕΕ για την ενεργειακή πολιτική σημάδεψε την αρχή της ανάληψης των δράσεων με στόχο τρεις βασικούς πυλώνες [1]:

- Ασφάλεια του εφοδιασμού
- Ανταγωνιστικότητα
- Βιωσιμότητα

Προκειμένου να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προέβλεπε επίσης ποσοτικούς στόχους, γνωστούς ως 20-20-20 με στόχο επίτευξης το 2020. Το σχέδιο δράσης συμπληρώθηκε με τις αλλαγές που έλαβαν χώρα μέσα στο έτος 2007 με την «Συνθήκη της Λισσαβόνας» η οποία συμπεριλάμβανε ειδική πρόβλεψη για την ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα οι στόχοι ήταν [2]:

- Μείωση των αερίων θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.
- 20% της ενέργειας να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές.
- 20% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Επιπροσθέτως η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε στις 22 Ιανουαρίου 2014, ένα τελευταίο πλαίσιο για το κλίμα και την ενέργεια κατά την περίοδο 2020-2030. Το συγκεκριμένο πλαίσιο αποσκοπεί να βοηθήσει την ΕΕ να αντιμετωπίσει ζητήματα όπως [3]:

- Μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050 κατά 80-95% κάτω των αντίστοιχων επιπέδων του 1990.
- Τις υψηλές τιμές της ενέργειας και την ευπάθεια της οικονομίας της ΕΕ σε περίπτωση μελλοντικών αυξήσεων των τιμών, ιδίως για το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.
- Την εξάρτηση της ΕΕ από τις εισαγωγές ενέργειας, συχνά από πολιτικά ασταθείς περιοχές.
- Την ανάγκη για την αντικατάσταση και την αναβάθμιση της ενεργειακής υποδομής και την παροχή σταθερού ρυθμιστικού πλαισίου για τους δυνητικούς επενδυτές.
- Τέλος την επίτευξη συμφωνίας της ΕΕ σχετικά με έναν στόχο μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για το 2030, ως μέρος της συμβολής της στις επικείμενες διαπραγματεύσεις για νέα παγκόσμια συμφωνία για την αλλαγή του κλίματος.

Όπως μπορούμε να δούμε [2] οι στόχοι που επιλέχθηκαν για το έτος 2020 είναι ένα σημαντικό εφικτό επίπεδο. Αναλυτικότερα, τα αέρια θερμοκηπίου μειώθηκαν κατά 22,1% στο διάστημα μεταξύ 1990-2015, το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έφθασε το 2015 στο 16,7% από 8,5% που ήταν το 2005 και τέλος η ενεργειακή απόδοση αναμένεται να βελτιωθεί κατά 18-19% έως το 2020.

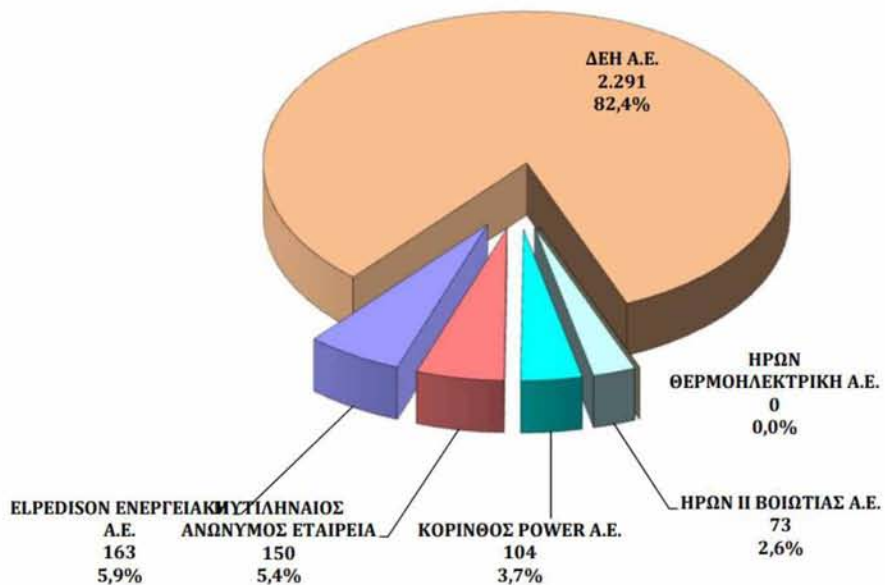
2.3. Ελληνική Πραγματικότητα

Η Ελλάδα ως ένα από τα βασικά μέλη της Ε. Ε. προσπαθεί να προσαρμόσει και αυτή με την σειρά της την συμφωνημένη ενεργειακή πολιτική προκειμένου να επιτύχει τους στόχους που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Στο πλαίσιο αυτό η Ελληνική ενεργειακή πολιτική έχει θέσει και τους δικούς της στόχους. Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας [5] το κυριότερο ζήτημα που επιδιώκει να λύσει η Ελληνική ενεργειακή πολιτική είναι η εξεύρεση, η εξασφάλιση και η διαχείριση ενεργειακών πόρων, με τρόπο που να διασφαλίζεται η ασφαλής, ομαλή, αδιάλειπτη και αξιόπιστη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της χώρας, σε όλη της την ελληνική επικράτεια και με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για τους πολίτες της. Επιπλέον, βάρος δίνεται και στη δημιουργία ενεργειακών αποθεμάτων, συμμαχιών και εναλλακτικών οδών για την κάλυψη των αναγκών της εγχώριας αγοράς σε περιόδους ενεργειακών κρίσεων και η προστασία των καταναλωτών μέσω εφαρμογής μηχανισμών εξομάλυνση, εξωγενών, έκτακτων αποσταθεροποιητικών φαινομένων και τάσεων. Τέλος γίνεται προσπάθεια για την βιώσιμη και αειφόρο ανάπτυξη στο ευρύ φάσμα του ενεργειακού τομέα, σε όλες του τις μορφές, από την παραγωγή μέχρι την τελική χρήση, μέσα από το πρίσμα της προστασίας της φύσης διαφυλάσσοντας το περιβάλλον.

Αναντίρρητα, μία σημαντική εξέλιξη στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν η θέσπιση του νόμου 2773/99. Πιο συγκεκριμένα, με την καθιέρωση της εν λόγω νομοθεσίας εισήχθη το βασικό θεσμικό υπόβαθρο που απελευθερώνει την αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Η εξέλιξη αυτή επιτρέπει σε άλλους παραγωγούς, πέραν της Δ.Ε.Η. Α.Ε., να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, καθώς επίσης επιτρέπει στους πελάτες να επιλέγουν τον προμηθευτή τους. Στην Εικόνα 1 μπορούμε να δούμε το ποσοστό παραγωγής από συμβατικές μονάδες από όλες τις εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.

Οι πρωτογενείς πηγές ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα είναι ο λιγνίτης, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, το νερό στα φράγματα, ο ήλιος και ο άνεμος. Επίσης για την ενεργειακή κάλυψη, κυρίως θερινών μηνών, γίνονται εισαγωγές από άλλες χώρες (Εικόνα 2). Στην Εικόνα 3 μπορούμε να δούμε την κατανομή των πρωτογενών πηγών στην παραγωγή Ελληνικής ηλεκτρικής ενέργειας το έτος 2017.

**ΚΑΘΑΡΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (GWh)
ΜΑΡΤΙΟΣ 2018**



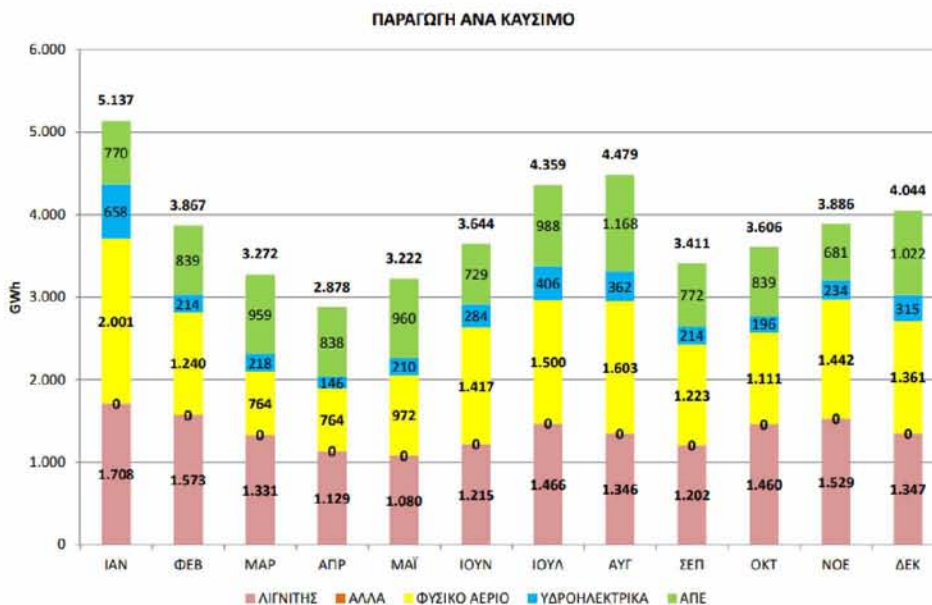
Εικόνα 1. Καθαρή παραγωγή από συμβατικές μονάδες στο σύστημα (GWh)

(Πηγή: ΑΔΜΗΕ Μηνιαίο Δελτίο Ενέργειας Μάρτιος 2018)



Εικόνα 2. Εμπορικά Προγράμματα Εισαγωγών Μάρτιος 2018 (MWh)

(Πηγή: ΑΔΜΗΕ Μηνιαίο Δελτίο Ενέργειας Μάρτιος 2018)



*Εικόνα 3. Κατανομή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για το έτος 2017
(Πηγή: ΑΔΜΗΕ Μηνιαίο Δελτίο Ενέργειας Δεκέμβριος 2017)*

2.4. Πράσινη Τεχνολογία

Ζητήματα παγκόσμιου ενδιαφέροντος, όπως το ενεργειακό πρόβλημα, η κλιματική αλλαγή, το καθαρό νερό, η αιφόρος ανάπτυξη, η διαχείριση των αποβλήτων, η μείωση της ακτινοβολίας, ωθούν πολλούς μηχανικούς να αλλάξουν τις ήδη υπάρχουσες προσεγγίσεις σχεδίασης τεχνολογικών συστημάτων [4]. Μία απόρροια αυτής της διαφορετικής στρατηγικής σχεδίασης δημιούργησε την πράσινη τεχνολογία. Στόχος της πράσινης τεχνολογίας είναι η σχεδίαση προϊόντων που επιλύουν τα προαναφερθέντα προβλήματα. Οι βασικές αρχές της πράσινης τεχνολογίας είναι [5]:

- Οι τεχνολογικές διαδικασίες και τα προϊόντα, ολιστικά, να χρησιμοποιούν την ανάλυση συστημάτων και επεκτείνοντας τα εργαλεία αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Διατηρούνται και βελτιώνονται τα φυσικά οικοσυστήματα ενώ, παράλληλα, προστατεύονται η ανθρώπινη υγεία και ευδαιμονία.
- Χρησιμοποιείται η ιδέα του “κύκλου ζωής” σε όλες τις τεχνολογικές δράσεις.

- Εξασφαλίζεται ότι οι υλικοί και ενεργειακοί πόροι στις εισόδους και στις εξόδους των συστημάτων είναι εγγενώς ασφαλείς και ήπιας δράσης.
- Ελαχιστοποιείται η πιθανότητα εξάντλησης των φυσικών πόρων.
- Γίνεται σοβαρή προσπάθεια για την μείωση των αποβλήτων.
- Αναπτύσσονται και υλοποιούνται τεχνολογικές λύσεις συμβατές με τις τοπικές γεωγραφίες, ιδιομορφίες, την κουλτούρα και τις προσδοκίες των ανθρώπων.
- Επινοούνται τεχνολογικές λύσεις καθ' υπέρβαση της τρέχουσας τάσης ή της δεσπόζουσας τεχνολογίας. Βελτιώνονται, ανανεώνονται μέσω καινοτομιών ή εφευρίσκονται νέες τεχνολογίες με στόχο την αειφόρο ανάπτυξη.
- Εμπλέκονται ενεργά οι κοινότητες των ανθρώπων και οι μέτοχοι επιχειρήσεων στην ανάπτυξη των τεχνολογικών λύσεων.

Η εφαρμογή των παραπάνω αρχών μπορεί να οδηγήσει σε μια καλύτερη κατανόηση αλλά και σχεδίαση των ήδη υπαρχόντων συστημάτων ανάδρασης. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν κύρια χαρακτηριστικά το ότι είναι ανεξάντλητες (αστείρευτες), άφθονες και κυρίως περιβαλλοντικά καθαρότερες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η βιομάζα, η γεωθερμία, η ενέργεια της θάλασσας (κύματα, παλίρροια, θερμοκρασιακή διαφορά) και η υδραυλική ενέργεια.

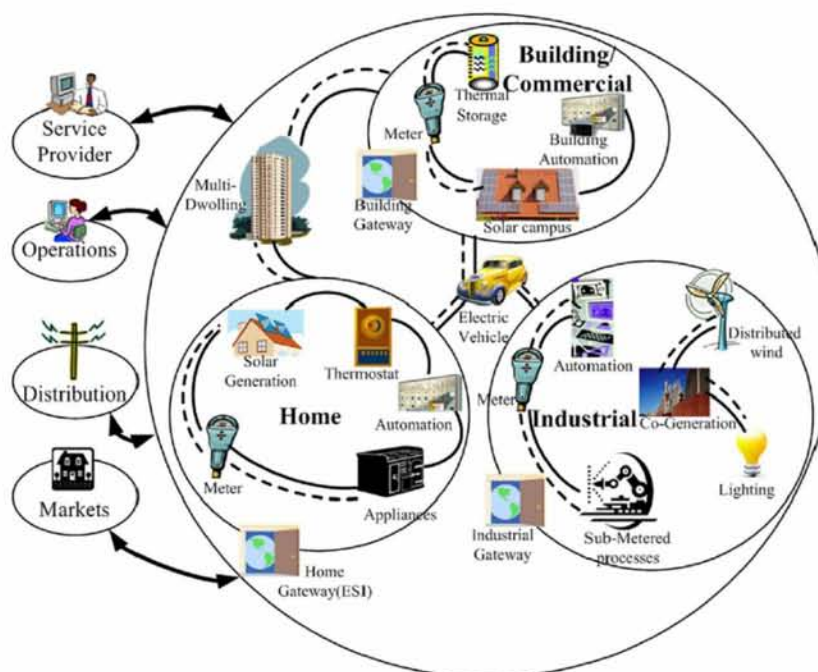
Μολαταύτα, δεν πρέπει να αγνοούμε ότι οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας συνοδεύονται με αρκετά μειονεκτήματα με κύριο αρνητικό χαρακτηριστικό το υψηλό κόστος ανά μονάδα ενέργειας. Με σκοπό να αποκτήσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα παραθέτουμε κάποια μειονεκτήματα που αποδίδονται στις κυριότερες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας όπως περιγράφονται στο [6].

1. Στην περίπτωση της αιολικής ενέργειας η χαμηλή ροή αξιοποιήσιμης κινητικής ενέργειας του ανέμου (W/m^2) η οποία και την κατατάσσει στις "αραιές" μορφές ενέργειας. Τυπικές τιμές ροής της αξιοποιούμενης αιολικής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ $200 W/m^2$ και $400 W/m^2$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την χρήση είτε μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών είτε την χρήση μηχανών μεγάλων διαστάσεων, για την παραγωγή της επιθυμητής ποσότητας ενέργειας. Σήμερα καταβάλλονται προσπάθειες αύξησης της συγκέντρωσης ισχύος των αιολικών μηχανών, οι οποίες σε επιλεγμένες περιπτώσεις πλησιάζουν ή και υπερβαίνουν τα $500 W/m^2$.

- ii. Η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της κατάστασης της ατμόσφαιρας, της ακτινοβολίας δηλαδή, της ταχύτητας και της διεύθυνσης των ανέμων. Το γεγονός αυτό μας υποχρεώνει να χρησιμοποιούμε τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κυρίως σαν εφεδρικές πηγές ενέργειας σε συνδυασμό πάντοτε με κάποια άλλη πηγή ενέργειας (π.χ. σύνδεση με ηλεκτρικό δίκτυο, παράλληλη λειτουργία με μονάδες Diesel κλπ.).
- iii. Σε περίπτωση διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο η παραγόμενη ενέργεια δεν πληροί πάντοτε τις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση αυτοματισμών ελέγχου, μηχανημάτων ρύθμισης τάσεως και συχνότητας, καθώς και ελέγχου της άεργης.
- iv. Σε περιπτώσεις αυτόνομων μονάδων είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, σε μια προσπάθεια να έχουμε συγχρονισμό της ζήτησης και της διαθέσιμης ενέργειας. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αυξημένο αρχικό κόστος (λόγω της προσθήκης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας) και βέβαια επιπλέον απώλειες ενέργειας κατά τις φάσεις μετατροπής και αποθήκευσης καθώς και αυξημένες υποχρεώσεις συντήρησης και εξασφάλισης της ομαλής λειτουργίας.
- v. Τέλος θα πρέπει να επισημανθεί το σχετικά υψηλό κόστος της αρχικής επένδυσης για την εγκατάσταση μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας με ΑΠΕ. Θα ήταν παράλειψη να μην αναφέρουμε ότι η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας, ο ανταγωνισμός μεταξύ των κατασκευαστών τα τελευταία χρόνια έχει μειώσει σημαντικά τις τιμές των ΑΠΕ, κυρίως των ανεμογεννητριών. Ως επέκταση όσων συζητήσαμε, στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τα έξυπνα σπίτια, κτήρια και ηλεκτρικά δίκτυα τα οποία είναι μία καινούργια προσέγγιση εξοικονόμησης ενέργειας με μεγαλύτερη αποδοτικότητα και αξιοπιστία παρέχοντας περισσότερες ελευθερίες και ανέσεις στους καταναλωτές.

3. Έξυπνα Κτήρια και Σπίτια μέρος των Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων

Ενόψει της άμεσης λύσης της παγκόσμιας ενεργειακής ανάγκης αλλά και της ενσωμάτωσης της πράσινης τεχνολογίας, ολοένα και περισσότερα κράτη συμμετέχουν στο σχέδιο υλοποίησης των “Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων” και των “Έξυπνων Κτηρίων”. Ο κύριος σκοπός του εν λόγω σχεδίου είναι η διασύνδεση των διαφόρων έξυπνων κτηρίων, όπως τα οικιακά, βιομηχανικά, εμπορικά κλπ., σε ένα ενιαίο έξυπνο δίκτυο (Εικόνα 4).



Εικόνα 4. Διασύνδεση του Έξυπνου Δικτύου με Έξυπνα Σπίτια και Κτήρια (Πηγή: [7])

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιάσουμε τα οφέλη και τα κύρια χαρακτηριστικά των “Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων”, των “Έξυπνων Κτηρίων” και της υποκατηγορίας τους των “Έξυπνων Σπιτιών”.

3.1. Έξυπνα Ηλεκτρικά Δίκτυα

Με τον απλό όρο Ηλεκτρικό Δίκτυο ορίζουμε το Ηλεκτρικό Σύστημα που υποστηρίζει μία ή όλες τις παρακάτω λειτουργίες: Παραγωγή, μεταφορά, διανομή και έλεγχος ενέργειας.

Υπάρχουν πολλοί ορισμοί οι οποίοι περιγράφουν τι είναι ένα «έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο», ορισμένοι από τους αυτούς επικεντρώνονται στα λειτουργικά χαρακτηριστικά, άλλοι στα τεχνικά και άλλοι στα οφέλη που προκύπτουν από την υλοποίηση.

- Σύμφωνα με την Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης [8]:
 “Ένα έξυπνο δίκτυο είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο που μπορεί να κοστίσει αποτελεσματικά την ενσωμάτωση της συμπεριφοράς και τις ενέργειες όλων των χρηστών που συνδέονται με αυτό - όπως γεννήτορες ή καταναλωτές- προκειμένου να εξασφαλίζει ένα οικονομικά αποδοτικότερο, πιο βιώσιμο σύστημα ισχύος με χαμηλές απώλειες και υψηλά επίπεδα ποιότητας και ασφαλέστερο εφοδιασμό.”
- Ένας άλλος ορισμός δίνεται από το Υπουργείο Ενέργειας της Αμερικής (U.S. Department of Energy) [9]:
 “Τα συστήματα έξυπνων δικτύων αποτελούνται από ψηφιακές τεχνολογίες ανίχνευσης, επικοινωνίας και ελέγχου και συσκευές πεδίου που λειτουργούν για τον συντονισμό πολλών ηλεκτρικών διεργασιών δικτύου. Ένα πιο έξυπνο πλέγμα το οποίο περιλαμβάνει την σωστή εφαρμογή των συστημάτων τεχνολογίας της πληροφορίας με σκοπό την διαχείριση νέων δεδομένων που επιτρέπουν την αποτελεσματικότερη και δυναμικότερη διαχείριση των λειτουργιών του δικτύου. Οι παρεχόμενες πληροφορίες που προκύπτουν από τα συστήματα έξυπνων δικτύων επιτρέπουν επίσης στους πελάτες να κάνουν ενημερωμένες επιλογές για τον τρόπο με τον οποίο διαχειρίζονται την κατανάλωση ενέργειας τους.”

Ένα έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο (ΕΗΔ) ή στα αγγλικά “Smart Grid” αποτελείται από ένα δίκτυο έξυπνης μετάδοσης και διανομής με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η υποδομή στοχεύει στη βελτίωση της αξιοπιστίας του ηλεκτρικού συστήματος, την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα ολόκληρου του δικτύου. Ο τρόπος που επιτυγχάνεται είναι μέσω μίας αμφίδρομη ροής ηλεκτρικής ενέργειας και πληροφοριών δημιουργώντας ένα πλήρες αυτοματοποιημένο και κατανεμημένο δίκτυο διανομής ενέργειας. Σκοπός του είναι η δυναμική βελτιστοποίηση των λειτουργιών του ηλεκτρικού συστήματος αλλά και η συντήρηση αυτού καθαυτού.

3.1.1. Χαρακτηριστικά Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων

Παρακάτω παραθέτουμε κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία διαθέτει ένα Έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο.

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός ΕΗΔ είναι η αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων και ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Στο παραδοσιακό ΣΗΕ η ηλεκτρική ενέργεια κινείται προς μία κατεύθυνση, ο ηλεκτρισμός που παράγεται από τα εργοστάσια παραγωγής, μεταφέρεται μέσω του δικτύου μεταφοράς στην διανομή και στην συνέχεια στους τελικού χρήστες. Εν αντιθέσει με το παραδοσιακό ΣΗΕ, ένα έξυπνο δίκτυο παρέχει αμφίδρομη μεταφορά ενέργειας επιτρέποντας στον καταναλωτή να εποπτεύει την κατανάλωσή του ενώ παράλληλα του δίνει την δυνατότητα να επιστρέφει περισσευούμενη ενέργεια στο σύστημα. Επί παραδείγματι, οι χρήστες που έχουν εγκατεστημένα ηλιακά πάνελ, μπορούν να επιστρέφουν περισσευούμενη ενέργεια βοηθώντας έτσι στην εξισορρόπηση της ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος στις ώρες αιχμής (peak shaving) [10], κάνοντας έτσι το δίκτυο να λειτουργεί με μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα.

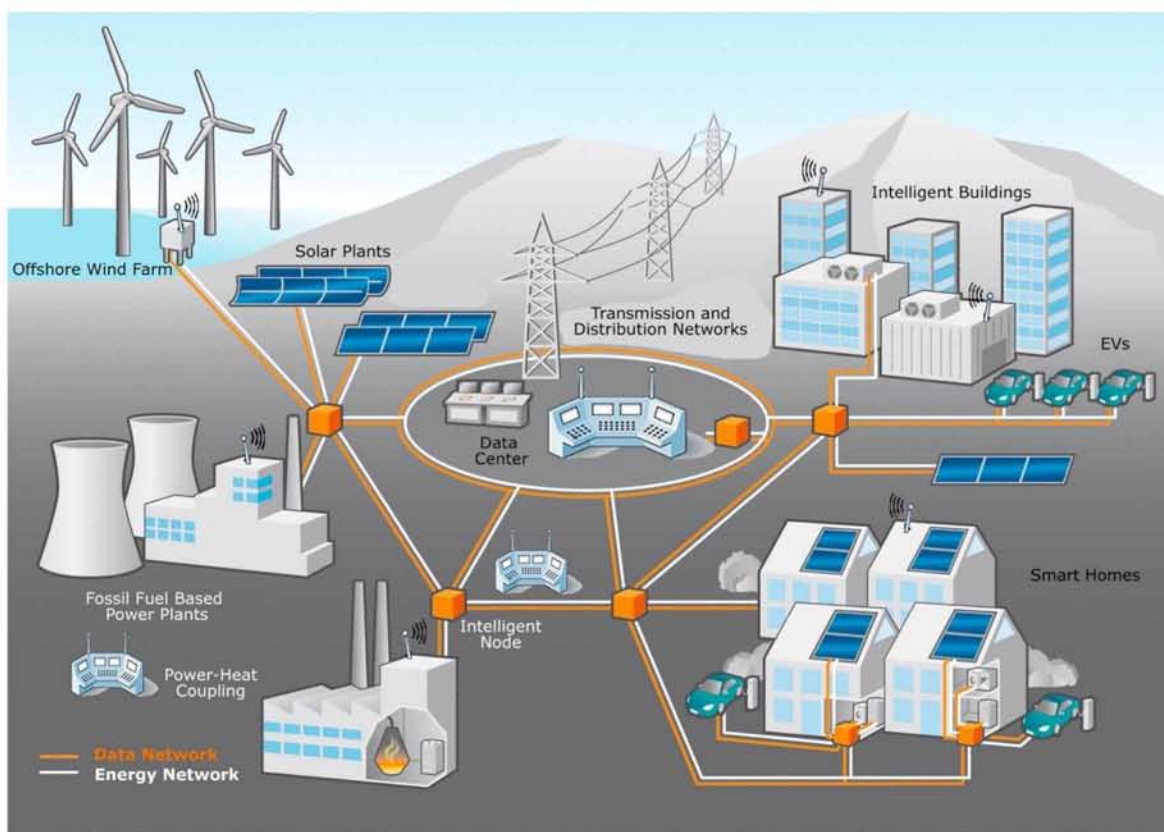
Ένα ΕΗΔ έχει την δυνατότητα να εντοπίζει μια πιθανή βλάβη στο σύστημα και να την αποκαθιστά αυτόματα (self-healing). Οι πιο συνηθισμένοι τύποι διακοπών και βλαβών σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι οι εξής [11]: διακοπές ρεύματος, αστάθεια της τάσης, ανισορροπία ροής ισχύος και αποτυχία ασφάλειας στο σύστημα. Χρησιμοποιώντας λογισμικούς¹ πράκτορες (software agents), ένα έξυπνο δίκτυο είναι σε θέση να εντοπίσει μια από τις προηγούμενες βλάβες και να την επιλύσει πλήρως αυτοματοποιημένα.

Αξίζει, επιπλέον να αναφέρουμε πως η χρήση ενός μεγάλου ποσοστού ΑΠΕ στο μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η αποθήκευση ενέργειας αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι ενός ΗΕΔ. Όπως προαναφερθήκαμε στο πρώτο χαρακτηριστικό των ΗΕΔ οι καταναλωτές έχουν ενεργητικό ρόλο επιστρέφοντας οποιαδήποτε περισσευούμενη ενέργεια στο δίκτυο μέσω πάνελ ή άλλων μορφών πράσινης ενέργειας διαθέτουν. Τα τελευταία χρόνια γίνεται συχνότερη η χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων για την αποθήκευση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα. Η ολοένα αυξανόμενη χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων οδήγησε στην δημιουργία οχημάτων με όνομα Vehicle-to-Grid (V2G). Σε αυτή την κατηγορία

¹ Οι λογισμικοί πράκτορες είναι ενσωματωμένα σύστημα λογισμικού, που μπορούν να ασκούν ευέλικτες και αυτόνομες δράσεις για την επίτευξη ενός προσχεδιασμένου στόχου.

οχημάτων, το αυτοκίνητο συνδέεται στο δίκτυο και στην περίπτωση που είναι σταθμευμένο τροφοδοτεί το δίκτυο με ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω τριών διαφορετικών τρόπων ανάλογα με το είδος του αυτοκινήτου [10]. Η πρώτη κατηγορία είναι τα υβριδικά οχήματα ή οχήματα κυψελών καυσίμου, έχουν μία αυτόνομη ενσωματωμένη γεννήτρια που τους επιτρέπει να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Εκτός από αυτήν την κατηγορία υπάρχουν και τα υβριδικά οχήματα που λειτουργούν μέσω μπαταρίας. Αυτά τα οχήματα έχουν την δυνατότητα να επιστρέφουν ενέργεια στο σύστημα μέσω της χωρητικότητας της μπαταρίας και για να μην επιβαρύνουν το δίκτυο ξαναφορτίζουν εκτός των ωρών αιχμής. Τέλος η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τα ηλιακά οχήματα, τα οποία χρησιμοποιούν την πλεονάζουσα ικανότητα φόρτισης τους παρέχοντας ρεύμα στο ηλεκτρικό δίκτυο όταν η μπαταρία τους είναι πλήρως φορτισμένη.

Μία σύνοψη όσων συζητήσαμε παρουσιάζει η Εικόνα 5 η οποία απεικονίζει ένα σχέδιο ενός έξυπνου δικτύου που αποτελείται από κατακευματισμένες γεννήτριες, συμβατικές γεννήτριες, ηλεκτρικά οχήματα, έξυπνα σπίτια και κτήρια συνδεδεμένα σε ένα κέντρο δεδομένων μέσω ενός δικτύου ανταλλαγής πληροφοριών και ενέργειας [12].



Εικόνα 5. Αρχιτεκτονική ενός Έξυπνου Κτηρίου. (Πηγή: [12])

3.1.2. Πλεονεκτήματα Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων

Ως επί το πλείστον η αναβάθμιση ενός συμβατικού ΣΗΕ σε ΕΗΔ προσφέρει οφέλη σε πολλούς τομείς. Χωρίζοντας αυτά τα πλεονεκτήματα ανά τομέα βλέπουμε ότι τα ΕΗΔ παρέχουν:

1. Αξιοπιστία

Το ΕΗΔ μειώνει τις πιθανότητες γενικής διακοπής ρεύματος αριθμητικά και χρονικά. Σε περίπτωση τέτοιας βλάβης απομονώνεται η συγκεκριμένη “περιοχή”, ενώ ταυτόχρονα ξεκινάει η διαδικασία αποκατάστασης της βλάβης. Ως αποτέλεσμα η ενέργεια που φτάνει στους τελικούς χρήστες έχει μια πιο βελτιωμένη ποιότητα και αξιοπιστία ικανοποιώντας όλα τα είδη των πελατών.

2. Αποδοτικότητα

Στον τομέα της αποδοτικότητας ένα ΕΗΔ μειώνει τις απώλειες ενέργειας που προκαλούνται στις ώρες αιχμής, ελέγχοντας την ισχύ του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Συμπληρωματικά, με την χρήση σύγχρονων αποθηκευτικών μέσων ή μηχανισμών ενισχύεται η ευστάθεια και την ορθή λειτουργία ενός τέτοιου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική της αποθήκευσης αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο, συμβάλλοντας στη διατήρηση των τοπικών ορίων ευστάθειας και στην αδιάλειπτη παροχή ισχύος σε περίπτωση διακοπών.

3. Οικονομικά Οφέλη

Η αναβάθμιση του ελληνικού ΣΗΕ σε ΕΗΔ προϋποθέτει την κατασκευή, εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση ολόκληρου του δικτύου δημιουργώντας έτσι νέες θέσεις εργασίας στον εγχώριο δημόσιο και ιδιωτικό τομέα. Ακόμη, οι δαπάνες της σύγχρονης διαβίωσης μειώνονται και ως εκ τούτου αυξάνουμε την αγοραστική δύναμη των καταναλωτών. Τέλος η καινοτομία που δίνει ένα ΕΗΔ, επιτρέπει την ανάπτυξη νέων επιχειρήσεων, οι οποίες στηρίζονται στην εν λόγω τεχνολογία. Δεν πρέπει να λησμονούμε ακόμη ότι η χρήση των υβριδικών οχημάτων συμβάλλουν στην αποφόρτιση του δικτύου ενώ παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως πηγές.

4. Περιβαλλοντικά οφέλη

Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα ΕΗΔ αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται το ενεργειακό αποτύπωμα και οι λοιπές εκπομπές ρύπων λόγω της κατανάλωσης και παραγωγής ενέργειας. Επίσης μειώνεται η συχνότητα περιβαλλοντικών καταστροφών που δημιουργούνται από μεγάλες μονάδες παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας είτε

από συχνές αποτυχίες του παραδοσιακού ΣΗΕ (πετρελαιοκηλίδες- πυρκαγιές από μετασχηματιστές κλπ.).

3.1.3. Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας

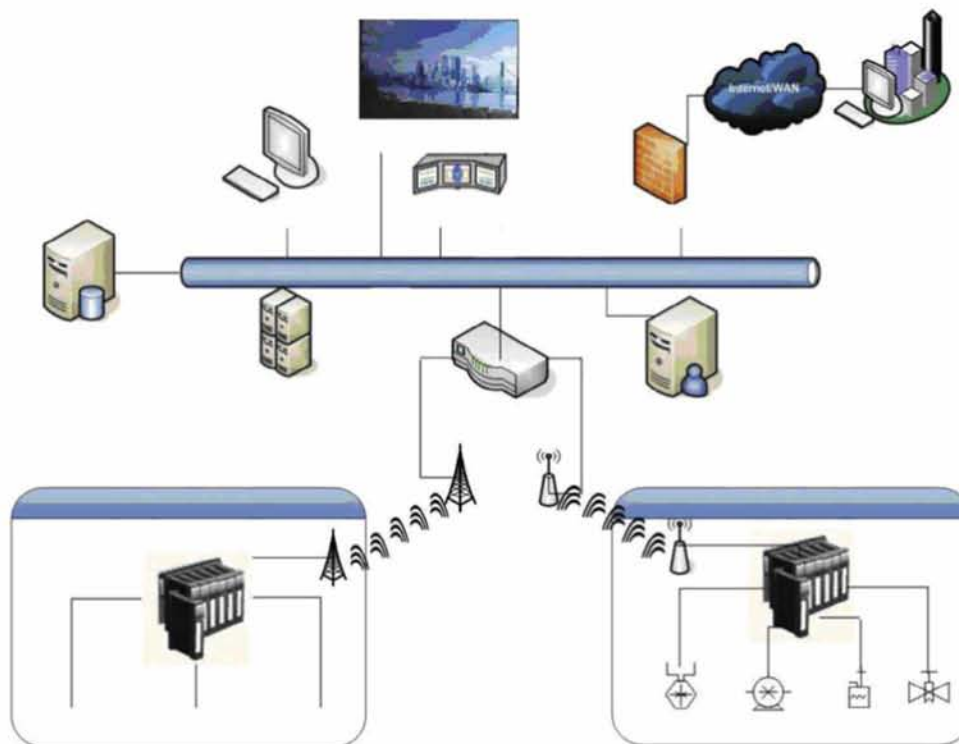
Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management systems) είναι ένα σύστημα που περιλαμβάνει ένα σύνολο εφαρμογών με σκοπό την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας στα σε όλο το δίκτυο, καθώς και το συντονισμό και τη βέλτιστη διαχείριση των μεγάλων μονάδων παραγωγής ενέργειας. Όπως περιγράφεται εδώ [13], τα συστήματα EMS μπορούν να περιγραφούν από δύο διαφορετικές σκοπιές: διαχείριση της ζήτησης (Demand Side Management ή DSM) και την διαχείριση της παροχής (Supply Side Management ή SSM).

3.1.3.1. Supply Side Management

Η διαχείριση της παροχής (SSM) αναφέρεται σε ενέργειες που έχουν αναληφθεί για τη διασφάλιση της παραγωγής, της μεταφοράς και η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο.

Μια υποκατηγορία του SSM είναι τα συστήματα με όνομα Supervisory control and data acquisition (SCADA). Τα συστήματα SCADA είναι παγκοσμίως αποδεκτά ως μέσο παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και ελέγχου των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας της παραγωγής της μεταφοράς αλλά και της διανομής [13]. Ένα τέτοιο σύστημα επιτρέπει να εποπτεύει και τον έλεγχο των διαφόρων κατανεμημένων διεργασιών οι οποίες βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία. Η τυπική διαδικασία που ακολουθεί ένα τέτοιο σύστημα είναι η συλλογή των πληροφοριών σε ένα κεντρικό σημείο, ο αυτόματος ή με χειριστή έλεγχος των παραπάνω πληροφοριών μέσω της απαραίτητης μεθοδολογίας και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο.

Η απόκτηση απομακρυσμένων κατανεμημένων πληροφοριών του δικτύου συνήθως γίνεται μέσω κάποιων ηλεκτρονικών διατάξεων που ονομάζονται απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (Remote Terminal Units ή RTU). Τα RTU είναι μικροελεγκτές (microcontrollers) που είναι συνδεδεμένοι με μια σειρά συσκευών όπως αισθητήρες, ψηφιακούς μετρητές, αυτόματους διακόπτες (relay switch) προστασίας και συναγερμού(μπαταρίας, φορτιστών και συναγερμού πυρκαγιάς) [14].



Εικόνα 6. Ένα δίκτυο συστήματος SCADA

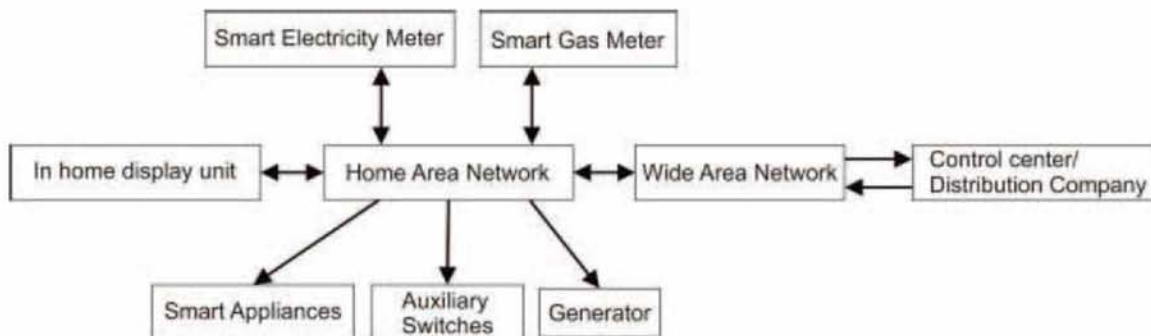
3.1.3.2. Demand Side Management

Η διαχείριση της ζήτησης είναι μία μέθοδος για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε ένα έξυπνο δίκτυο από την σκοπιά του καταναλωτή, χρησιμοποιώντας προηγμένη υποδομή μέτρησης. Για να επιτευχθεί αυτή η μέθοδος απαιτείται η μέτρηση, η επαλήθευση, η πρόβλεψη και η παρακολούθηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας και κατ' επέκταση της δυναμικής τιμολόγησης για την ελαχιστοποίηση του κόστους και της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες αιχμής. Αυτή η διαχείριση επιτυγχάνει την λεγόμενη προηγμένη υποδομή μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure, AMI) χρησιμοποιώντας έξυπνους μετρητές (Smart Meters)

- **Smart Meter**

Ένας έξυπνος μετρητής είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που καταγράφει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας στους προμηθευτές πληροφορίες που χρησιμοποιούν για την παρακολούθηση και τιμολόγηση των πελατών. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της αμφίδρομης επικοινωνίας που παρέχουν, δεν πρέπει να συγχέονται με τους ήδη

υπάρχοντες μετρητές ηλεκτρικού ρεύματος. Οι έξυπνοι μετρητές εγκαθίστανται σε οικιακά δίκτυα και αποτελούν δομικό λίθο στην δημιουργία της προηγμένης υποδομής μέτρησης και ευρύτερα στα έξυπνα σπίτια (Εικόνα 7).



*Εικόνα 7. Ένα τυπικό σύστημα Έξυπνης Μέτρησης
(Πηγή: [13])*

- **Advanced Metering Infrastructure**

Σύμφωνα με το Εθνικό Εργαστήριο Ενεργειακών Τεχνολογιών του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. [15] “ το AMI δεν είναι μια ενιαία τεχνολογία, αλλά μια ενσωμάτωση πολλών τεχνολογιών που παρέχουν έξυπνη σύνδεση μεταξύ των καταναλωτών και των διαχειριστών συστημάτων”. Με άλλα λόγια, το AMI είναι ένα δίκτυο επικοινωνίας μεταξύ των τελικών χρηστών (καταναλωτών) και των παρόχων υπηρεσιών (εταιρείες διανομής). Αυτό επιτυγχάνεται με την σύνδεση συσκευών μέτρησης, όπως μετρητές ηλεκτρικού ρεύματος, μετρητές αερίου, μετρητές θερμότητας, μετρητές νερού κλπ. οι οποίοι λειτουργούν με κάποιο χρονοδιάγραμμα ή κατόπιν ενός αιτήματος του χρήστη και παρέχουν διάφορες πληροφορίες όπως την κατανάλωση του πελάτη, την εκάστοτε τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κ.α.

3.2. Έξυπνα Κτήρια

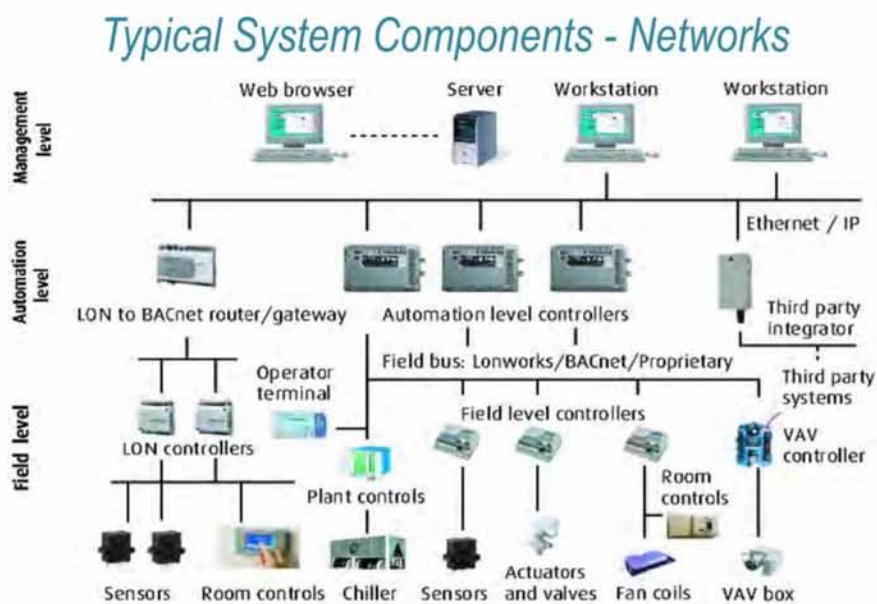
Ζητήματα όπως η εξοικονόμηση ενέργειας, η ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους αλλά και πιο βελτιωμένου και ευκολότερου ελέγχου ενός κτηρίου αποτελούν προβλήματα μείζων σημασίας που αφορούν την παγκόσμια αγορά ακινήτων. Η εξέλιξη της σημερινής τεχνολογίας έχει κάνει μεγάλα βήματα για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων,

εισάγοντας την έννοια των Έξυπνων Κτηρίων. Τα Έξυπνα Κτήρια ή Smart Buildings (SB) είναι κτήρια, τα οποία έχουν ένα εγκατεστημένο σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης των κτηριακών υπηρεσιών. Αυτά τα συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν σε: βιομηχανικές υποδομές όπως εργοστάσια, εμπορικά κέντρα, επιχειρήσεις όπως και σε οικιακά περιβάλλοντα. Σε αυτό το σημείο θα ήταν παράλειψη να μην πούμε πως τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για βιομηχανικές υποδομές έχουν διαφορετική αρχιτεκτονική σε σχέση με τα οικιακά συστήματα, τα οποία θα συζητήσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια στην Ενότητα 3.3.

3.2.1. Αρχιτεκτονική Δόμησης Έξυπνων Κτηρίων

Ένα σύστημα έξυπνου κτηρίου υιοθετεί την αρχιτεκτονική των κατακεκομμένων συστημάτων το οποίο οργανώνεται σε τρία επίπεδα [16]:

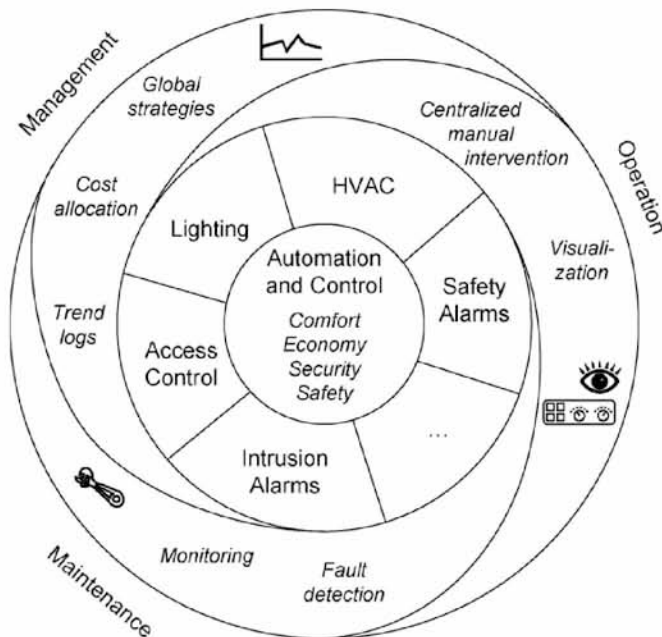
- i. Το **Field Layer**, όπου πρόκειται για το στρώμα επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων συσκευών όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές κλπ.
- ii. **Automation Layer**, που διεκπεραιώνονται οι μετρήσεις, εκτελούνται βρόχοι ελέγχου ή ενεργοποιούνται οι συναγερμοί.
- iii. **Management Layer**, το οποίο είναι υπεύθυνο για την παρουσίαση, την προώθηση, την καταγραφή και την αρχειοθέτηση δεδομένων του συστήματος.



Εικόνα 8. Αρχιτεκτονική Δόμησης Έξυπνων Κτηρίων (Πηγή: [17])

3.2.2. Κεντρικό Σύστημα Διαχείρισης Κτηρίων BMS

Το σύστημα Διαχείριση Κτηρίων (Building Management System ή BMS) ή αυτόματο σύστημα Κτηρίων (Building Automation System ή BAS) είναι ένα οικιακό σύστημα ελέγχου που ελέγχει και παρακολουθεί τον μηχανικό και ηλεκτρικό εξοπλισμό του κτιρίου όπως τον εξαερισμό, τον φωτισμό, την θέρμανση, τα πυροσβεστικά συστήματα και τα συστήματα ασφαλείας (Εικόνα 9). Εν γένει, αυτά τα συστήματα ενσωματώνουν ένα ολοκληρωμένο δίκτυο με το κατάλληλο υλικό (Hardware) και λογισμικό (Software) χρησιμοποιώντας κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας. Σύμφωνα με τους P. H. Shaikh et al., τα BMS χωρίζονται με βάση τον σχεδιασμό τους στα συμβατικά και στα έξυπνα συστήματα ελέγχου [18]. Οι πέντε κορυφαιοί πωλητές στην παγκόσμια αγορά IBMS αποτελούνται από τις Cisco, Honeywell, Johnson Controls και Schneider Electric [19].



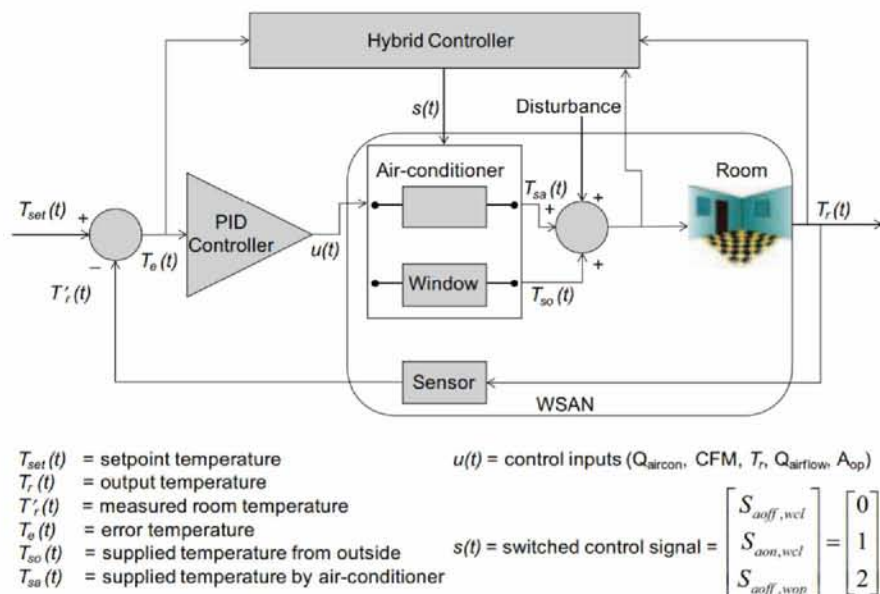
Εικόνα 9. Διάφορες πτυχές λειτουργίας του BMS (Πηγή: [20])

3.2.2.1. Συμβατικά Συστήματα Ελέγχου

Ανά τα χρόνια διάφορες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για να πραγματοποιήσουν ένα οικιακό σύστημα ελέγχου. Οι επικρατέστερες εκδοχές των παραδοσιακών αυτών συστημάτων αποτελούνται από διακόπτες ενεργοποίησης/απενεργοποίησης (on/off switch) και από ελεγκτές P, PI, PID.

Οι διακόπτες ενεργοποίησης/απενεργοποίησης χρησιμοποιούν ένα άνω και κάτω όριο για να ελέγχουν μια διαδικασία ότι είναι εντός επιτρεπτών ορίων. Παρότι οι αυτοί οι διακόπτες είναι μια εύκολα υλοποιήσιμη λύση ελέγχου, αυτή η τεχνολογία παρουσιάζει προβλήματα στην υψηλή κατανάλωση ενέργειας και η αστάθεια που προσδίδουν στο σύστημα, δεν τις καθιστά την καλύτερη επιλογή [18].

Οι ελεγκτές P,PI,PID ή αναλογικός, αναλογικός-ολοκληρωτικός ή τριών όρων αντίστοιχα, είναι ελεγκτές που περιλαμβάνονται στα περισσότερα συμβατικά συστήματα επειδή παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα σε γραμμικά συστήματα. Οι ελεγκτές PID είναι ένας μηχανισμός κλειστού βρόγχου, που υπολογίζει μια μεταβλητή εγγο ανά τακτά χρονικά διαστήματα και προσθέτει μία διόρθωση με βάση τις τιμές των συνιστωσών (αναλογική, διαφορική και ολοκληρωτική). Ο υπολογισμός της μεταβλητής εγγο προκύπτει από την διαφορά τιμής ρύθμισης (Set Point) δηλαδή μιας επιθυμητής τιμής που έχει θέσει ο διαχειριστής και μιας μεταβλητής διαδικασίας (Process Variable) δηλαδή της εκάστοτε τιμής του συστήματος. Μια εφαρμογή όσων είπαμε είναι η μοντελοποίηση των W. Shein και άλλοι, υλοποιούν ένα σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας με την χρήση ενός PID controller [21].



Εικόνα 10. Οικιακό σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας με PID controller (Πηγή: [21])

Εντούτοις, τα συμβατικά συστήματα ελέγχου επειδή δεν παρέχουν τα καλύτερα αποδοτικά αποτελέσματα ούτε προσφέρουν τον βέλτιστο έλεγχο δεν ενδείκνυνται σαν πρώτη επιλογή.

3.2.2.2. Έξυπνα Συστήματα Ελέγχου

Με κίνητρο την δημιουργία πιο σύγχρονων συστημάτων ώστε να προσαρμόζονται ευκολότερα σε ένα περιβάλλον προσφέροντας πιο εξελιγμένες μεθόδους ελέγχου στον τομέα των οικιακών αυτοματισμών, οι περισσότερες έρευνες βασίστηκαν σε τρεις διαφορετικές τεχνικές [18]:

- i. μεθόδους μάθησης
- ii. μοντέλα πρόβλεψης
- iii. ελέγχου μέσω πρακτόρων

3.2.2.2.1. Μέθοδοι Μάθησης

Σε αυτήν την κατηγορία ελέγχου οι επιστήμονες επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη τεχνικών βασισμένες στην τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence) για να αυξήσουν την σταθερότητα και την επίδοση ελέγχου των μη γραμμικών συστημάτων που εμφανίζονται σε ένα οικιακό περιβάλλον.

Η ασαφής λογική (fuzzy logic) είναι μια κατηγορία τεχνητής νοημοσύνης που στόχο έχει να ενσωματώσει την ανθρώπινη νοημοσύνη σε ένα σύστημα για να σκέπτεται και να δρα έξυπνα όπως ο άνθρωπος [22]. Οι ελεγκτές ασαφής λογικής (fuzzy logic controllers) είναι μία υλοποίηση αυτής της τεχνολογίας οι οποίοι ενσωματώνουν μία στρατηγική πολλαπλών κριτηρίων επιτρέποντας τους να λειτουργούν με πιο βελτιωμένο και ορθολογικό τρόπο. Εφαρμογές ελεγκτών ασαφής λογικής στον έλεγχο κεντρικής θέρμανσης [23], φωτισμού [24] και εξαερισμού [25] μας δείχνουν πόσο αποτελεσματική και αποδοτική είναι αυτή η τεχνολογία.

Ακόμη μία εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης στο επίπεδο ελέγχου είναι η χρήση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial neural network ή ANN). Τα ANN είναι δίκτυα με κύρια λειτουργία την συγκέντρωση, επεξεργασία και διάδοση ηλεκτρικών σημάτων και δημιουργία τους βασίστηκε στον ανθρώπινο νευρώνα [26]. Τα εν λόγω δίκτυα χρησιμοποιούνται στα BMS λόγω της ικανότητας να μαθαίνουν από τις εισόδους/εξόδους των ελεγκτών, σε μία προσπάθεια αντικατάστασης των συμβατικών ελεγκτών [27].

3.2.2.2. Μοντέλα Πρόβλεψης

Η χρήση των μοντέλων πρόβλεψης (ΜΠ) είναι ακόμα μία διαδομένη τεχνική με κίνητρο την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας και συνεπώς του κόστους σε μία κτηριακή εγκατάσταση. Η γενική ιδέα πίσω από αυτήν την τεχνική είναι ο συνδυασμός του ελέγχου ανάδρασης και της αριθμητικής βελτιστοποίησης. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία μίας επαναλαμβανόμενης δυναμικής μοντελοποίησης, η οποία είναι ικανή να προβλέψει μελλοντικές καταστάσεις ενός κτηρίου. Για την δημιουργία αυτών των μοντέλων χρησιμοποιούνται κυρίως οι προβλέψεις μελλοντικών διαταραχών (π.χ. εσωτερικά κέρδη, καιρικές συνθήκες κ.λπ.) καθώς επίσης και οι προσωπικές απαιτήσεις του χρήστη (π.χ. εύρος άνεσης) [28]. Στην συνέχεια μοντελοποιούνται οι ενεργειακές ανάγκες ενός κτιρίου ενώ παράλληλα βελτιστοποιούνται αυτές οι ανάγκες με βάση τους καθορισμένους στόχους που έχει θέσει ο χρήστης.

3.2.2.3. Έλεγχος Μέσω Πρακτόρων

Μία τελευταία προσέγγιση των συστημάτων ελέγχου όπως περιγράφεται στο [18], υλοποιείται με την χρήση πολλαπλών πρακτόρων (Multi-agent system). Όπως ορίζεται στο βιβλίο των Russel και άλλοι [26], “Πράκτορας είναι οτιδήποτε μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του μέσω αισθητήρων και επενεργεί σε αυτό το περιβάλλον μέσω μηχανισμού δράσης”. Αυτό πραγματοποιείται μέσω φυσικών ή εικονικών μηχανών, οι οποίες είναι ικανές να επικοινωνούν μεταξύ τους και να συνεργάζονται για την επίλυση ενός κοινού στόχου.

3.2.3. Δίκτυο Επικοινωνίας BMS

Τελειώνοντας την επισκόπηση μας για το BMS, θα περιγράψουμε την βασική λειτουργικότητα ενός δικτύου επικοινωνίας ενός BMS. Η δομή ενός δικτύου BMS, πραγματοποιείται με την βοήθεια μιας οικογένειας διαδικτυακών πρωτοκόλλων που στηρίζονται στο παγκόσμιο πρότυπο IEC 61158, και ονομάζονται fieldbus. Το fieldbus είναι το κύριο δίκτυο επικοινωνίας που υλοποιείται κατά κύριο βαθμό στο Field και Management Layer και επιτρέπει την ψηφιακή επικοινωνία μεταξύ συσκευών όπως ελεγκτές, αισθητήρες και ενεργοποιητές [16]. Υπάρχουν αρκετοί κατασκευαστές οι οποίοι πραγματοποιούν τα εν λόγω δίκτυα αλλά κατά

κύρια βάση χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα BACnet, KNX, LonWorks, Modbus όπως και τα ασύρματα ZigBee και Enocean, τα τελευταία δύο θα συναντήσουμε και παρακάτω στα Πρωτόκολλα επικοινωνίας Έξυπνων Σπιτιών.

3.3. Έξυπνα Σπίτια

Τα τελευταία χρόνια μια υποκατηγορία στον τομέα των κτηριακών αυτοματισμών, η οποία εξελίσσεται με ταχύτατους ρυθμούς, είναι αυτή του οικιακού αυτοματισμού. Οι οικιακοί αυτοματισμοί (Home automation) ή “έξυπνα σπίτια” ή “domotics²” είναι ένας τομέας που αναπτύσσεται στα πλαίσια της αστικής αυτοματοποίησης και αναμένεται μέχρι το 2022 η αγορά του να φτάσει τα 75 δισεκατομμύρια δολάρια.

Τα έξυπνα σπίτια είναι κτήρια τα οποία έχουν εγκατεστημένο ένα σύστημα ελέγχου φωτισμού, ψύξης, θέρμανσης, εξαερισμού, ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών καθώς και συστημάτων ασφάλειας. Αυτά τα μοντέρνα συστήματα συνήθως συνδέουν διάφορες συσκευές (αισθητήρες, ενεργοποιητές κλπ.) ασύρματα ή ενσύρματα για την δημιουργία ενός αυτόματου οικιακού δικτύου (HAN) μικρής εμβέλειας και διενεργούν σύμφωνα με κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας.

Με την πάροδο του χρόνου έχουν αναπτυχθεί διάφορες αρχιτεκτονικές λειτουργίες αυτών των οικημάτων. Ανάλογα με την εκάστοτε λειτουργικότητα και αρχιτεκτονική μπορούμε να διακρίνουμε τρεις διαφορετικές γενιές οικιακών αυτοματισμών [29].

- i. Πρώτη Γενιά: Έλεγχος μέσω ασύρματης σύνδεσης και χρήσης διακομιστών διαμεσολάβησης
- ii. Δεύτερη Γενιά: Έλεγχος μέσω έξυπνων ομιλητών (smart speaker)
- iii. Τρίτη Γενιά: Αλληλεπίδρασης του χρήστη με ρομπότ

Στην πρώτη γενιά των έξυπνων σπιτιών, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες παρακολουθούν τις δραστηριότητες των κατοίκων και ενεργούν ανάλογα με κάποιο προκαθορισμένο μοτίβο [29]. Όλες οι συσκευές συνδέονται σε ένα κεντρικό διανομέα (gateway) και ο χρήστης είναι σε θέση να ελέγχει ολόκληρο το δίκτυο μέσω του περιβάλλοντος χρήστη

² Αγγλική λέξη που παράγεται από την συνένωση των λέξεων “DOMus infOrmaTICS”. Η λατινική λέξη “Domus” μεταφράζεται ως “σπίτι” καθώς επίσης η λέξη infOrmaTICS προέρχεται από την έκφραση “Information technology in the home” ή στα ελληνικά “Τεχνολογία πληροφοριών στο σπίτι”.

(User Interface) το οποίο είναι εγκατεστημένο σε κάποια επιτοίχια συσκευή, tablet, κινητό τηλέφωνο, σταθερό υπολογιστή. Βασικά παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας αποτελούν τα δίκτυα ZigBee, Z-Wave, 6LoWPAN κλπ.

Η δεύτερη γενιά εισάγει μία διαφορετική προσέγγιση στον τομέα των οικιακών αυτοματισμών. Πιο συγκεκριμένα δημιουργήθηκε η έννοια του “Εξυπνου Περιβάλλοντος” (Smart Environment). Η εν λόγω τεχνολογία αποτελείται από ένα οικοσύστημα αλληλοεπιδρώντων αντικειμένων, π.χ. αισθητήρες, συσκευές και γενικά ενσωματωμένα συστήματα, που έχουν την δυνατότητα αυτό-οργάνωσης, με σκοπό την παροχή υπηρεσιών και χειρισμού αλλά και δημοσίευσης σύνθετων δεδομένων [30]. Για την υλοποίηση ενός τέτοιου περιβάλλοντος ο χρήστης αλληλοεπιδρά μέσω φωνητικών εντολών με μία ασύρματη συσκευή γνωστή ως “Εξυπνο Ηχείο” (Smart Speaker). Η τεχνολογία τεχνητής νοημοσύνης που έχει αναπτυχθεί στην εν λόγω συσκευή σε συνδυασμό με μια σύνδεση στο διαδίκτυο, της επιτρέπει να απαντάει σε οποιαδήποτε πληροφορία όσον αφορά τον καιρό, τα νέα κ.λπ., καθώς επίσης μπορεί να ελέγχει διάφορους εγκατεστημένους οικιακούς αυτοματισμούς όπως φωτισμός, θερμοστάτες κ.λπ. Τέλος ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της είναι ότι έχει την ικανότητα να μαθαίνει από την αλληλεπίδραση με το χρήστη συλλέγοντας δεδομένα από τις επιλογές του και να γίνεται “εξυπνότερη” με το πέρασμα του χρόνου

Τα τελευταία χρόνια οι βιομηχανίες οικιακών αυτοματισμών εξελίσσουν την τεχνολογία του “Εξυπνου Περιβάλλοντος” χρησιμοποιώντας ρομπότ υπηρεσίας (robot service). Σύμφωνα με την Διεθνή Ομοσπονδία Ρομποτικής (International Federation of Robotics) είναι “Ένα ρομπότ υπηρεσίας είναι ένα ρομπότ που λειτουργεί με ημί ή πλήρως αυτόνομο τρόπο για να παρέχει υπηρεσίες χρήσιμες για την ευημερία ανθρώπων και εξοπλισμού, εξαιρουμένων των εργασιών κατασκευής” [31]. Τα ρομπότ υπηρεσίας είναι μηχανές που αλληλοεπιδρούν με παρόμοιο τρόπο με τα έξυπνα ηχεία, με την διαφορά ότι μπορούν να κινηθούν στον χώρο, καθώς επίσης ότι έχουν την δυνατότητα να αλληλοεπιδρούν με άλλα ρομπότ υπηρεσίας για την επίτευξη κοινών στόχων. Ως παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε το ρομπότ Ronio το οποίο θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα αυτής της τεχνολογίας. Το ενδιαμέσο λογισμικό το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί για να μπορέσει να επικοινωνήσει με τις υπόλοιπες συσκευές ονομάζεται UPnP, το οποίο βασίζεται σε υπάρχοντα πρωτόκολλα και πρότυπα όπως το TCP / IP, UDP, SSDP, SOAP ή XML [32]. Η επίτευξη της ένταξης της συγκεκριμένης συσκευής σε ένα τέτοιο περιβάλλον με την χρήση του πρωτοκόλλου UPnP, μας αποδεικνύει το πόσο εύκολα μπορούν να

ενσωματωθούν τα ρομπότ υπηρεσίας σε ένα οικιακό αυτοματισμό, παρέχοντας εφόδια για μελλοντικές εξελίξεις.

3.3.1. Πρωτόκολλα επικοινωνίας Έξυπνων Σπιτιών

Ένα “οικιακό δίκτυο αυτοματισμού” ή στα αγγλικά “Home Automation Network” (HAN) όπως ξανά αναφέραμε, είναι ένα δίκτυο το οποίο χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διαδικασία επικοινωνίας και ανταλλαγής πληροφοριών κατά την διάρκεια μίας οικιακής διαχείρισης ενέργειας. Το HAN κατηγοριοποιείται σε ασύρματο και ενσύρματο και σε κάθε περίπτωση έχουμε διαφορετικές συμβάσεις που αφορούν την κατανάλωση ενέργειας, την απόσταση σηματοδότησης, την ευαισθησία σε παρεμβολές και την ασφάλεια [33].

3.3.1.1. Ενσύρματα Πρωτόκολλα

Αρχικά αναφέρουμε ότι τα ενσύρματα δίκτυα που θα περιγράψουμε στην συνέχεια χρησιμοποιούνε ως μέσο μεταφοράς της πληροφορίας τις ηλεκτρονικές καλωδιώσεις, τηλεφωνικές γραμμές, ομοαξονικά καλώδια, μη θωρακισμένα συνεστραμμένα ζεύγη, οπτικές ίνες ή συνδυασμούς των παραπάνω.

- **HomePlug**

Το ‘HomePlug’ είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί τις ήδη υπάρχουσες ηλεκτρικές καλωδιώσεις για την γρήγορη ανταλλαγή δεδομένων.

- **Ethernet**

Η σύνδεση μέσω Ethernet φαίνεται να βρίσκεται στα περισσότερα σπίτια λόγω της συχνής χρήσης σε διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές (εκτυπωτές, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, laptops, servers etc.). Παρ’ όλα αυτά, η συγκεκριμένη σύνδεση έχει υψηλό κόστος και απαιτήσεις ισχύος, καθώς επίσης απαιτεί την επιστροφή μέσω καλωδίου στην κεντρική πηγή αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του δικτύου.

- **X10**

Το πρωτόκολλο ‘X10’ εκμεταλλεύεται τις ηλεκτρικές οικιακές συνδέσεις για επικοινωνία και έλεγχο μέσω σημάτων σε μορφή ραδιοσυχνοτήτων τα οποία αντιστοιχούν σε ψηφιακές πληροφορίες. Μολαταύτα, θα ήταν παράλειψη να μην αναφέρουμε ότι το πρωτόκολλο X10 παρουσιάζει προβλήματα συμβατότητας με κάποιους τύπους καλωδίων και συσκευών, χαμηλές ταχύτητες, αναξιοπιστία στην μεταφορά δεδομένων και έλλειψη κρυπτογράφησης.

- **Insteon**

Ως πιο βελτιωμένη επέκταση του προηγούμενου πρωτοκόλλου, η τεχνολογία με όνομα ‘Insteon’ λύνει τα περισσότερα προαναφερθέντα προβλήματα. Η επικοινωνία των διάφορων συνδεδεμένων συσκευών γίνεται είτε μέσω ασύρματων ραδιοσυχνοτήτων είτε μέσω ηλεκτρικών καλωδίων. Σε περίπτωση που αποτύχει μια από τις δύο επικοινωνίες (ασύρματη ή ενσύρματη) επιλέγεται η δεύτερη για επανεκπομπή του ίδιου μηνύματος αυξάνοντας την αξιοπιστία του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως όλες οι συσκευές συνδέονται σε ένα δίκτυο ομότιμων (peer to peer), που σημαίνει πως κάθε συσκευή μπορεί να διαβιβάζει, να λαμβάνει και να επαναλαμβάνει οποιαδήποτε πληροφορία χωρίς την βοήθεια κάποιου κεντρικού ελεγκτή.

- **G.hn**

Τέλος, μία σημαίνουσα τεχνολογία στον τομέα των ενσύρματων πρωτοκόλλων είναι αυτή του ‘G.hn’. Η σύνδεση αυτού του δικτύου γίνεται μέσω τεσσάρων διαφορετικών καλωδίων: τηλεφωνική καλωδίωση, ομοαξονικά καλώδια, ηλεκτρικά καλώδια και πλαστικές οπτικές ίνες με ταχύτητες των 1 Gbps. Επιπρόσθετα, το G.hn παρέχει ασφαλείς συνδέσεις μεταξύ συσκευών που υποστηρίζουν IP, IPv4 και IPv6 προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως η δυνατότητα σύνδεσης σε οποιοδήποτε δωμάτιο ανεξάρτητα από τον τύπο καλωδίωσης, εγκατάσταση και διαχείριση από τον ίδιο τον καταναλωτή και ενσωματωμένες διαγνωστικές υπηρεσίες.

3.3.1.2. **Ασύρματα Πρωτόκολλα**

Σε αυτήν την παράγραφο θα αναφερθούμε στα κυριότερα ασύρματα πρωτόκολλα οικιακών αυτοματισμών για έλεγχο, διαχείριση και επικοινωνία μεταξύ των διάφορων συνδεδεμένων συσκευών.

- **Zigbee**

Το Zigbee είναι ένα δημοφιλές πρότυπο που ορίζει ένα σύνολο πρωτοκόλλων επικοινωνίας για χαμηλό ρυθμό δεδομένων ασύρματη δικτύωση μικρής εμβέλειας [34]. Το πρότυπο ZigBee υλοποιεί τα επίπεδα δικτύου (Network Layer), εφαρμογής (Application Layer)

και ασφάλειας (Security Layer) ενώ παράλληλα υιοθετεί το πρότυπο IEEE 802.15.4³ στα επίπεδα MAC(υπόστρωμα του επιπέδου ζεύξης- Link Layer) και φυσικού (Physical Layer). Κάθε συνδεδεμένη συσκευή στο δίκτυο ZigBee μπορεί να είναι μία από τις τρεις κατηγορίες [35]:

- **PAN Συντονιστής (Personal Areal Network Coordinator)**

Συσκευές FFD⁴ που έχουν την δυνατότητα να αναμεταδίδουν μηνύματα μέσα στο δίκτυο.

- **Δρομολογητής (Router)**

Μπορεί να συμπεριφέρεται σαν συντονιστής

- **Συσκευή τερματισμού (End Device)**

Μια συσκευή τερματισμού είναι μια συσκευή που έχει το μικρότερο μέγεθος μνήμης και τις λιγότερες δυνατότητες επεξεργασίας και χαρακτηριστικά.

Αξίζει, επιπλέον να αναφέρουμε πως η τοπολογία ενός δικτύου ZigBee μπορεί να είναι σε σχήμα αστέρα (Star topology) (Εικόνα 11) όπου κάθε συσκευή επικοινωνεί μόνο με τον PAN συντονιστή, ή τοπολογία ομότιμων (peer to peer topology) όπου κάθε συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με οποιαδήποτε άλλη γειτονική συσκευή. Στην περίπτωση της τοπολογίας ομότιμων το τελικό σχήμα του δικτύου καθορίζεται από τους εκάστοτε κανόνες που έχουμε θέσει. Εάν δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός, το δίκτυο ονομάζεται τοπολογία πλέγματος (mesh topology) (Εικόνα 12).

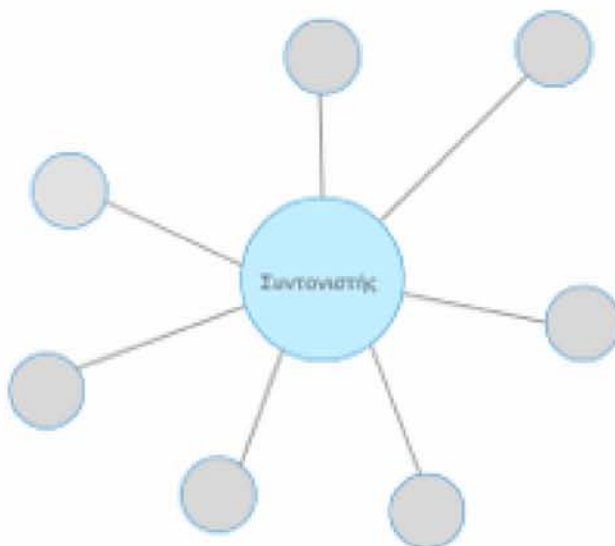
Μια δεύτερη μορφή τοπολογίας είναι η τοπολογία σε δέντρο (Tree topology). Στο tree topology, ο συντονιστής PAN αποτελεί την ρίζα καθιερώνοντας το αρχικό δίκτυο, οι δρομολογητές αποτελούν τα κλαδιά αναμεταδίδοντας τα διάφορα μηνύματα και τέλος οι συσκευές τερματισμού αποτελούν τα φύλλα χωρίς να συμμετέχουν στην δρομολόγηση μηνυμάτων (Εικόνα 12) [35].

Τέλος υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι επικοινωνίας σε ένα δίκτυο ZigBee: με ραδιοφάρο (beacon-enabled) ή χωρίς ραδιοφάρο (beaconless). Στην πρώτη κατηγορία ο PAN

³ Πρότυπο που αναπτύχθηκε από την επιτροπή προτύπων IEEE 802 το 2003, το οποίο ορίζει τις προδιαγραφές για PHY και MAC layers της ασύρματης δικτύωσης, αλλά δεν καθορίζει τις απαιτήσεις για υψηλότερα δίκτυα δικτύωσης.

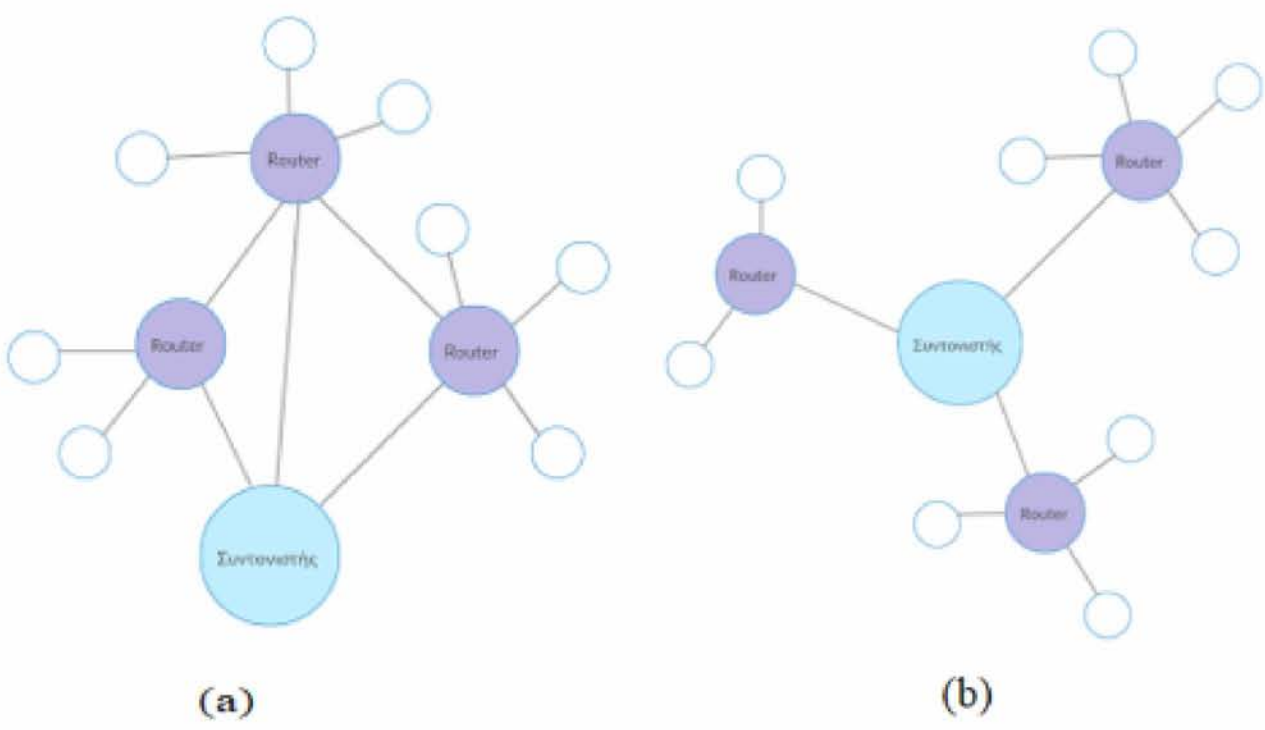
⁴ Full Function Devices: Συσκευές που μπορούν να εκτελούν όλες τις λειτουργίες που περιγράφονται στο πρότυπο IEEE 802.15.4.

συντονιστής στέλνει μηνύματα (beacons) περιοδικά για να συγχρονίσει τα ρολόγια όλων των συνδεδεμένων συσκευών. Επιπρόσθετα, δίνει σε όλες τις συσκευές ξεχωριστά χρονικά διαστήματα (guaranteed time slots) στα οποία μπορούν να στέλνουν μηνύματα με τον μηχανισμό CSMA-CA⁵ έτσι ώστε να μην υπάρχουν συγκρούσεις στις διάφορες αποστολές. Στην δεύτερη περίπτωση χωρίς ραδιοφάρο (beaconless) παρακάμπτεται το βήμα με το συντονισμό των ρολογιών. Στην Εικόνα 13 υπάρχουν δύο σενάρια επικοινωνίας με beacon-enabled και beaconless για καλύτερη κατανόηση των παραπάνω πληροφοριών.

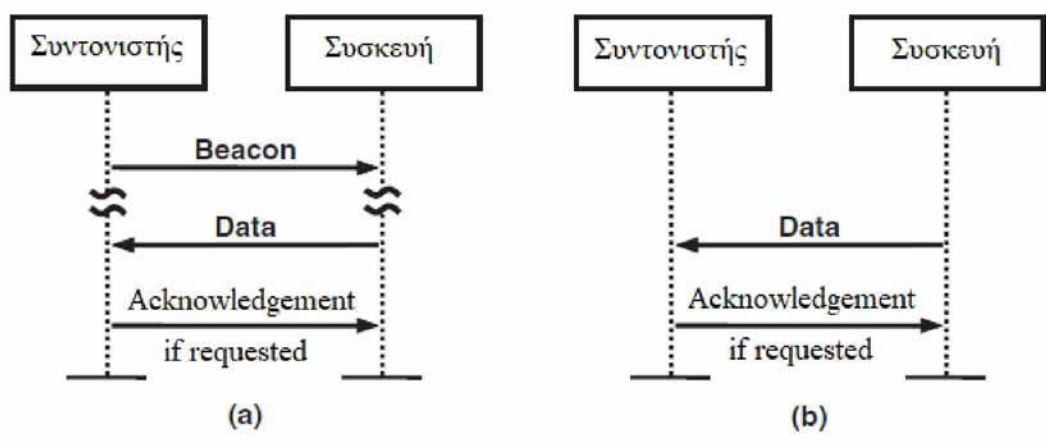


Εικόνα 11. Τοπολογία ZigBee σε Σχήμα Αστέρα (Star Topology)

⁵ Πρωτόκολλο που υλοποιείται στο επίπεδο Ζεύξης και χρησιμοποιείται κυρίως για την αποφυγή συγκρούσεων σε περίπτωση εκπομπής δύο ή περισσότερων κόμβων.



Εικόνα 12. (a) Τοπολογία ZigBee σε Σχήμα Πλέγματος (Mesh Topology)
(b) Τοπολογία ZigBee σε Σχήμα Δέντρου (Tree Topology)



Εικόνα 13. (a) Επικοινωνία με χρήση ραδιοφάρου (beacon-enabled).
(b) Επικοινωνία χωρίς χρήση ραδιοφάρου (beaconless).

(Πηγή: [35])

- **Z-Wave**

Το Z-Wave είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας, σχεδιασμένο κυρίως για οικιακούς αυτοματισμούς. Το Z-Wave ορίζει δύο τύπους συσκευών μέσα σε ένα δίκτυο: τους ελεγκτές(controllers) και τους σκλάβους(slaves). Σκοπός των ελεγκτών είναι να ελέγχουν την εκάστοτε κατάσταση των σκλάβων(on/off, τρέχουσα θερμοκρασία) ή να τους στέλνουν κάποια εντολή. Αντίθετα οι σκλάβοι να απαντούν στα αιτήματα των ελεγκτών ή να εκτελούν τις εντολές που τους ανατέθηκαν. Στο επίπεδο δρομολόγησης οι ελεγκτές κρατάνε πίνακες δρομολόγησης που αντιπροσωπεύουν ολόκληρη την τοπολογία του δικτύου και στην περίπτωση αποστολής κάποιου πακέτου αναγράφουν την διεύθυνση του προορισμού και αποστολέα [36]. Παράλληλα υπάρχει η περίπτωση οι σκλάβοι να συμπεριφέρονται σαν δρομολογητές κρατώντας μερική γνώση των πινάκων δρομολόγησης, στέλνοντας μηνύματα σε γειτονικούς κόμβους αυτόκλητα σε περιπτώσεις που εξαρτώνται από την άμεση χρονική ανταπόκριση(π.χ. ενεργοποίηση συναγερμού). Τέλος, οι σκλάβοι χρησιμοποιούνται κυρίως για την παρακολούθηση διαφόρων αισθητήρων και ενεργοποιητών που εκτελούν κάποια εντολή [36].

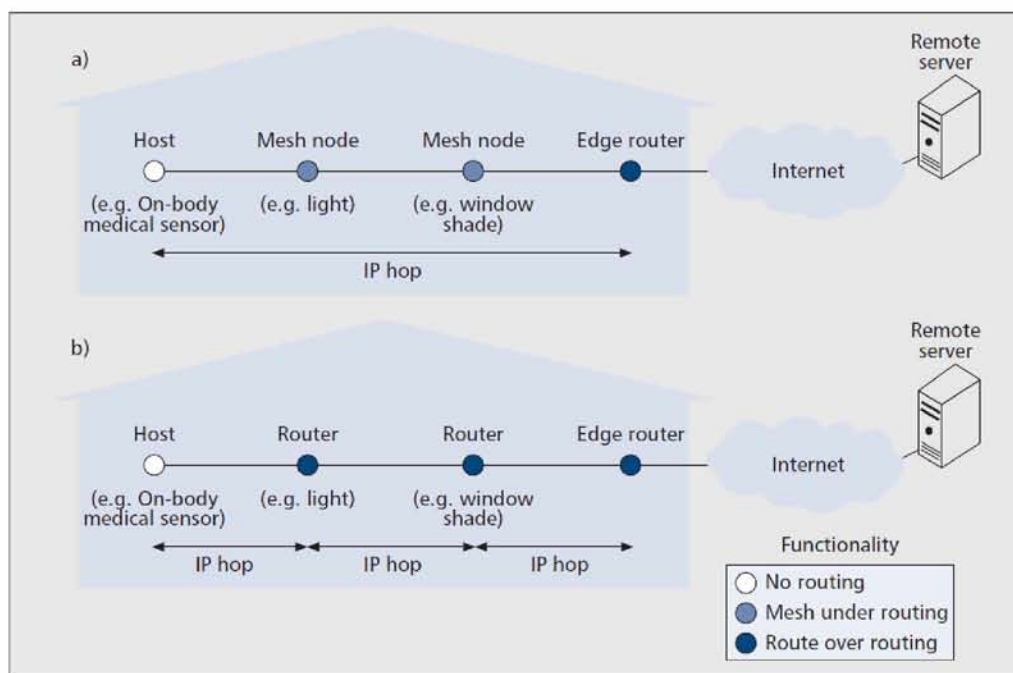
- **Wi-Fi**

Το Wi-Fi είναι μία τεχνολογία ασύρματης σύνδεσης που χρησιμοποιείτε ευρέως στις σημερινές οικίες για την ασύρματη σύνδεση πληθώρας ηλεκτρονικών συσκευών. Η διαδεδομένη επιλογή του συγκεκριμένης τεχνολογίας επιτρέπει στους κατασκευαστές με την χρήση ενός μικροελεγκτή, να διαχειρίζονται και να παρακολουθούν ολόκληρο το δίκτυο [37] [38].

- **6LoWPAN**

Για την υλοποίηση ενός οικιακού δικτύου, πέρα από μια μεγάλη περιοχή απαιτείται και ένας μεγάλος αριθμός κόμβων / συσκευών χαμηλής κατανάλωσης και χαμηλού κόστους με παρατεταμένο κύκλο ζωής [39]. Για τους παραπάνω λόγους αναπτύχθηκε το πρότυπο IEEE 802.15.4, βασισμένο στο πρότυπο IPv6, το οποίο ορίζει μία ασύρματη σύνδεση χαμηλής ισχύος για ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής (6LoWPAN). Τα κύρια χαρακτηριστικά του 6LoWPAN, σε σχέση με το IPv6, που το κάνουν πιο λειτουργικό για οικιακά δίκτυα είναι η μείωση του μεγέθους των πακέτων από 1280 bytes σε 127 bytes και η συμπίεση της επικεφαλίδας των πακέτων (header) από 40 bytes σε 2 bytes. Στο 6LoWPAN έχει υλοποιηθεί ένα στρώμα προσαρμογής (adaptation layer), για την δρομολόγηση και προώθηση των πακέτων, μεταξύ των επιπέδων του δικτύου και των δεδομένων (network layer, data layer). Με την δημιουργία του στρώματος προσαρμογής είναι δυνατόν η λήψη και η διαβίβαση αποφάσεων να

γίνει στο επίπεδο δικτύου (network layer) ή στο στρώμα προσαρμογής. Εάν η απόφαση δρομολόγησης πακέτων ληφθεί στο επίπεδο του δικτύου η διαδρομή ονομάζεται ‘route-over’, αλλιώς αν η απόφαση λαμβάνεται στο στρώμα προσαρμογής η διαδρομή ονομάζεται ‘mesh-under’ [39] (Εικόνα 14). Η κύρια διαφορά των δύο αυτών επιλογών είναι ότι στην περίπτωση του route-over σε κάθε άλμα (hop) έχουμε μια διαφορετική IP(IP hop) και η δρομολόγηση γίνεται στο επίπεδο του IP, εν αντιθέσει στην περίπτωση του mesh-under ανεξαρτήτως πόσα άλματα γίνουν η δρομολόγηση εμφανίζεται με μία ενιαία IP hop [36] (Εικόνα 14).



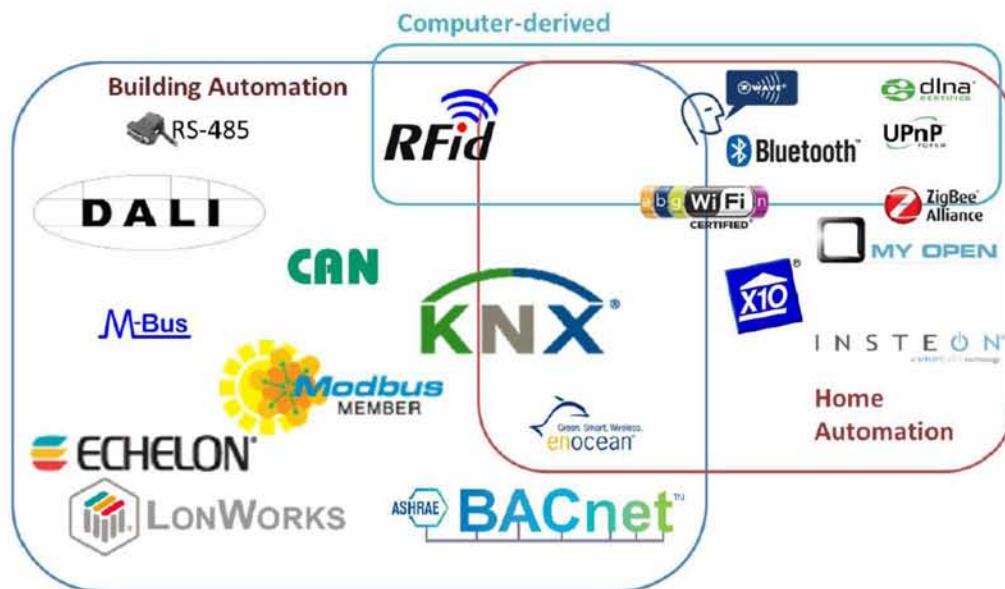
Εικόνα 14. Παράδειγμα για το ασύρματο HAN με βάση το 6LoWPAN. Απόφαση δρομολόγησης με: α) Mesh Under β) Route Over (Πηγή: [36])

- **EnOcean**

Η ευελιξία και λειτουργικότητα των περισσότερων ασύρματων οικιακών δικτύων, επιτυγχάνεται με την συνεχόμενη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις διάφορες συσκευές μέσω κάποιας πηγής ενέργειας όπως μπαταρίες ή πρίζες. Το EnOcean είναι μία τεχνολογία που αναπτύχθηκε με στόχο την λύση του προηγούμενου προβλήματος, ενσωματώνοντας στις διάφορες συσκευές την τεχνική της ενεργειακής συγκομιδής (energy harvesting) [40].

Αναλυτικότερα, όλες οι εγκατεστημένες συσκευές του δικτύου όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές και πομποί συλλέγουν διάφορες μορφές ενέργειας (ηλιακή ενέργεια, πίεση, θερμοκρασία, κίνηση) και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια με την βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών, πιεζοηλεκτρικών και θερμοηλεκτρικών γεννητριών, ηλιακών κυψελών και άλλων μετατροπών ενέργειας [33].

Στην Εικόνα 15 μπορούμε να διακρίνουμε τα συνηθέστερα πρωτοκόλλα που συναντάμε στον τομέα των Έξυπνων Κτηρίων και των Έξυπνων Σπιτιών.



Εικόνα 15. Πρωτόκολλα BMS και Έξυπνων Κτηρίων (Πηγή: [41])

3.3.1.3. Internet of Things

Το “Internet of Things” (IoT) ή στα ελληνικά “Διαδίκτυο των Πραγμάτων” είναι ένα νέο δίκτυο που κερδίζει έδαφος στον τομέα της σύγχρονης ασύρματης σύνδεσης. Η βασική ιδέα αυτού του δικτύου είναι η διάχυτη παρουσία μιας πληθώρας ηλεκτρονικών συσκευών, οι οποίες μέσω μοναδικών σημάτων διεθυνσιοδότησης είναι σε θέση να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και να συνεργάζονται για την επίτευξη κοινών στόχων [42].

Η θεμελιώδης τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του IoT είναι αυτή της ταυτοποίηση ετικετών (Tags) μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RFID). Η RFID τεχνολογία επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση αντικειμένων, μέσω μικροσκοπικών συσκευών, τα ονομαζόμενα RFID tags ή transponder. Τα εν λόγω μικροτσιπ ενσωματώνονται στις διάφορες συσκευές οι οποίες στέλλουν πληροφορίες, μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, σε έναν αναγνώστη (RFID

reader). Χρησιμοποιώντας RFID αναγνώστες, οι άνθρωποι μπορούν να αναγνωρίσουν, να εντοπίσουν και να παρακολουθήσουν οποιαδήποτε αντικείμενα τα οποία περιέχουν ετικέτες RFID [4].

Μία άλλη θεμελιώδης τεχνολογία που χρησιμοποιείται στο δίκτυο IoT είναι το Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ή Wireless Sensor Network (WSN). Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) αποτελείται από διασκορπισμένους αυτόνομους αισθητήρες οι οποίοι αλληλοεπιδρούν με σκοπό να επιτύχουν ένα κοινό στόχο όπως μέτρηση θερμοκρασίας, ήχου, υγρασίας κλπ. Ένα δίκτυο WSN έχει έναν ή περισσότερους σταθμούς (base-stations) οι οποίοι μαζεύουν και επεξεργάζονται τα δεδομένα που έχουν σταλθεί από τους αισθητήρες.

Εκτός από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες, έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες όπως τα barcodes, τα έξυπνα τηλέφωνα (smart phones), τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης και το υπολογιστικό νέφος (cloud computing) [43], [44].

Υπολογίζεται ότι 20 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές διαθέτουν τα κατάλληλα ηλεκτρονικά στοιχεία και λογισμικό για την δημιουργία ενός δικτύου IoT και προβλέπεται να φτάσουν τα 26 δισεκατομμύρια το 2020. Όπως μπορούμε να καταλάβουμε οι χρήσεις του IoT είναι αναρίθμητες. Για τους μεμονωμένους χρήστες, το IoT φέρνει χρήσιμες εφαρμογές στους αυτοματισμούς σπιτιών παρέχοντας ασφάλεια με την χρήση αυτοματοποιημένων συσκευών παρακολούθησης και διαχείρισης καθημερινών εργασιών.

4. Τεχνικές Εγκατάστασης Έξυπνων Σπιτιών

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε κάποιες σύγχρονες εγκαταστάσεις που γίνονται στα έξυπνα σπίτια στους βασικότερους οικιακούς τομείς. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως τα συστήματα που θα αναφέρουμε βασίζονται σε ηλεκτρικά συστήματα.

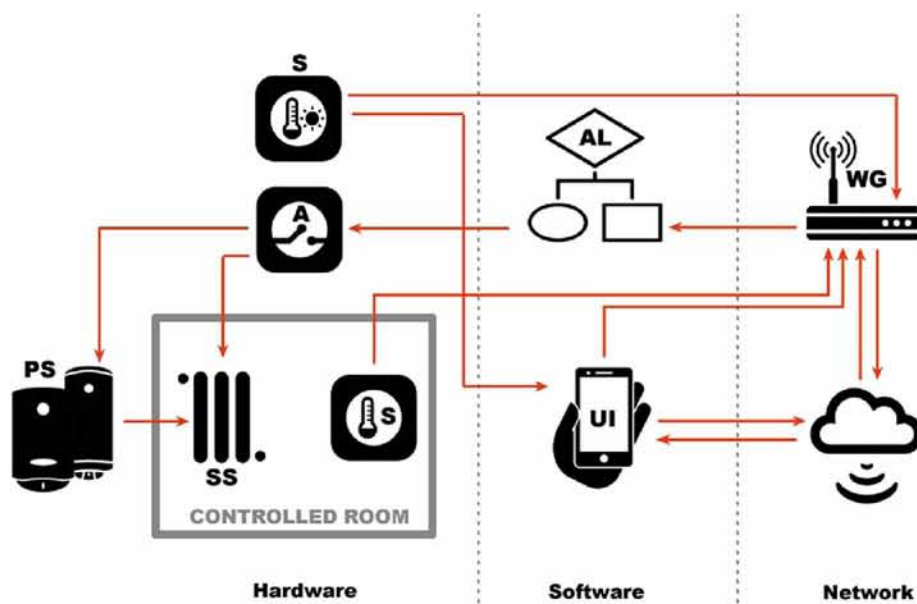
4.1. Θέρμανση και Ψύξη

Η οικιακή θέρμανση και ψύξη ως υποκατηγορία της τεχνολογίας HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές κατανάλωσης ενέργειας σε ένα σπίτι. Ως επί το πλείστον, διάφορες τεχνολογίες έχουν προταθεί για τον βέλτιστο έλεγχο θέρμανσης και ψύξης εσωτερικού χώρου με κύριο γνώμονα την εξασφάλιση της άνεσης του καταναλωτή αλλά και την εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους. Παρά τις πολυάριθμες αυτές υλοποιήσεις, οι περισσότερες εξ' αυτών βασίζονται σε ένα κύριο μοντέλο το οποίο έχει ως κύριο άξονα την χρήση των Έξυπνων Θερμοστατών. Η χρήση των Έξυπνων Θερμοστατών είναι ένα δημοφιλές θέμα που ερευνάται από τους πολλούς επιστήμονες λόγω της σχετικά υψηλής εξοικονόμησης ενέργειας που προσδίδουν σε ένα σύστημα αλλά και της εύκολης εγκατάστασης τους. Σύμφωνα με την έρευνα των Rebecca Ford και άλλοι [45], οι έξυπνοι θερμοστάτες παρέχουν εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης 5% έως 13% στα συστήματα θέρμανσης και 10% έως 25% στα συστήματα ψύξης. Λόγω της παρόμοιας λειτουργικότητας και αρχιτεκτονικής σε σχέση με την ψύξη, σε αυτήν την ενότητα θα καλύψουμε κάποιες βασικές τεχνικές ενός συστήματος θέρμανσης οικιακής χρήσης.

Όπως παρουσιάζεται στο βιβλίο των Pacheco-Torga, F. και άλλοι [46], η ραχοκοκαλιά αυτών των συστημάτων βασίζεται στα παρακάτω στοιχεία:

- **Αισθητήρων**, οι οποίοι παρακολουθούν την εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- **Ενεργοποιητών**, οι οποίοι συνδέονται στο κυρίως σύστημα θερμότητας (Primary System, PS) ή στο δευτερεύον σύστημα (Secondary System, SS) και λειτουργούν με βάση τις εντολές του διανομέα.
- **Αλγορίθμων**, για την δυναμική βελτιστοποίηση του συστήματος ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη.

- **Κεντρικού Διανομέα** (Gateway), που στέλνει εντολές στους ενεργοποιητές ανάλογα με τις τιμές των αισθητήρων. Επίσης, η σύνδεση σε διαδικτυακό Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Server) επιτρέπει τον χειρισμό εξ' αποστάσεως αλλά και την αποθήκευση δεδομένων.
- **Περιβάλλοντος χρήστη** (User Interface), που πρόκειται για την κύρια διεπαφή του χρήστη με το σύστημα, παρέχοντας του τον κύριο έλεγχο και πληροφορίες λειτουργίας, κατανάλωσης κλπ.



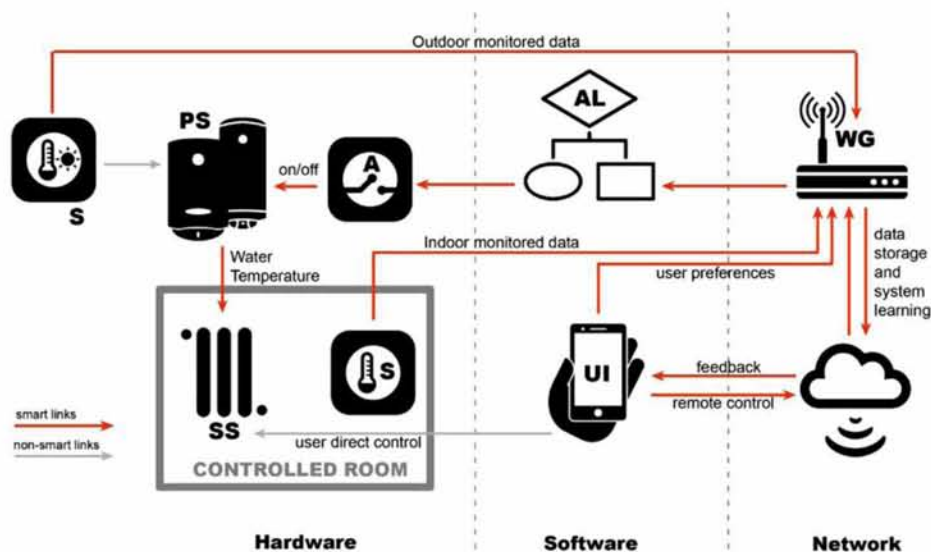
Εικόνα 16. Προοπτική ενός συστήματος θέρμανσης σε ένα Έξυπνο Σπίτι.

(Πηγή: [46])

4.1.1. Κύριο Έξυπνο Σύστημα Θέρμανσης (PS)

Το κύριο σύστημα θέρμανσης είναι αυτό που θερμαίνει το μεγαλύτερο ποσοστό μιας κατοικίας και δεν απευθύνεται σε μεμονωμένους χώρους. Η διαδικασία που μετατρέπει ένα σύστημα σε έξυπνο είναι η αυτόματη απενεργοποίηση ή ενεργοποίηση του συστήματος θέρμανσης ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη. Για να επιτευχθεί αυτή η διαδικασία συνήθως χρησιμοποιούνται έξυπνοι θερμοστάτες οι οποίοι με την βοήθεια των ενεργοποιητών ρυθμίζουν το εγκατεστημένο σύστημα θέρμανσης (υδραυλικά συστήματα θέρμανσης, αντλίες θερμότητας, ενδοδαπέδια θέρμανση κτλ.). Αναφέρουμε επίσης πως οι έξυπνοι θερμοστάτες σε

σχέση με τους παραδοσιακούς θερμοστάτες έχουν δυνατότητες όπως έλεγχος και καταγραφή της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασία, της κατανάλωσης ενέργεια, τον χρόνο λειτουργίας του συστήματος HVAC, την άμεση ενημέρωση σε περίπτωση βλάβης και τον εντοπισμό τυχόν ανθρώπινης παρουσίας έτσι ώστε να ενεργοποιείται και να απενεργοποιείται αυτόματα το σύστημα HVAC [47].

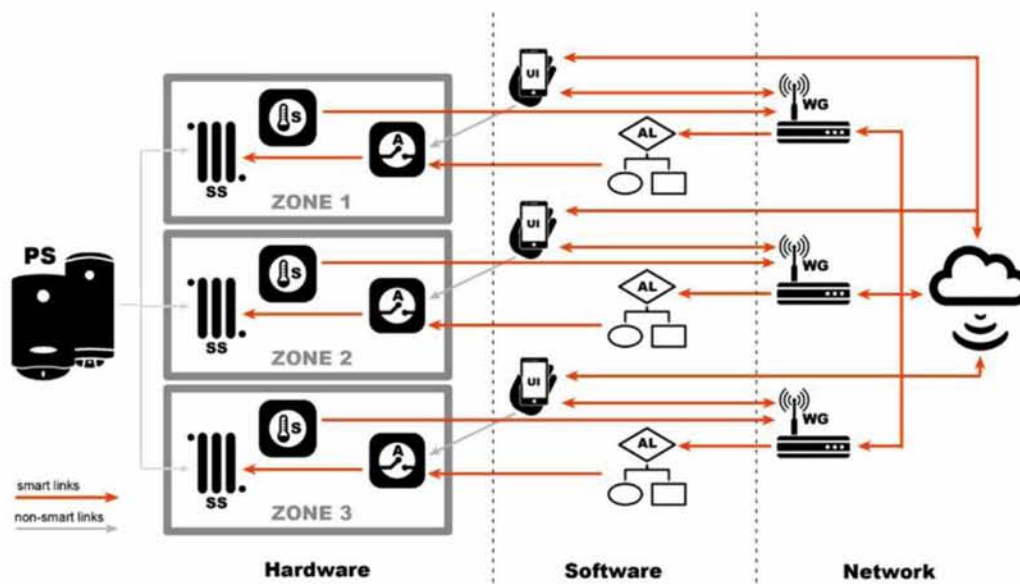


Εικόνα 17. Πρωτεύον Σύστημα Θέρμανσης

(Πηγή: [46])

4.1.2. Δευτερεύων Έξυπνο Σύστημα Θέρμανσης (SS)

Σε μεγαλύτερες μονοκατοικίες ή πολυκατοικίες συχνά χρησιμοποιείται το δευτερεύον σύστημα θέρμανσης το οποίο θερμαίνει αυτόνομα ομαδοποιημένους χώρους οι οποίοι ονομάζονται ζώνες. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούμε έξυπνους θερμοστάτες σε κάθε ζώνη την οποία θέλουμε να θερμάνουμε. Στη περίπτωση που το σύστημα θέρμανσης μας περιλαμβάνει σώματα, χρησιμοποιούνται έξυπνες θερμοστατικές βαλβίδες καλοριφέρ (TRV) που συνδέονται με τους θερμοστάτες ασύρματα. Με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται αυτόματα η θερμότητα που εκλύεται σε κάθε σώμα ξεχωριστά.



Εικόνα 18. Δευτερεύων Σύστημα Θέρμανσης.

(Πηγή: [46])

4.2. Εξαερισμός

Ο έλεγχος του εξαερισμού σε ένα οικιακό περιβάλλον αποτελούσε πάντα ένα κίνητρο απασχόλησης πολλών οικιακών βιομηχανιών. Σε αυτήν την παράγραφο θα σκιαγραφήσουμε εν συντομία μία τεχνική που αναπτύχθηκε από την Επιτροπή Ενέργειας της Καλιφόρνιας και έγκειται στο κομμάτι του Ενεργού Κλιματισμού⁶.

4.2.1. Οικιακός ενσωματωμένος ελεγκτής εξαερισμού-ενέργειας (RIVEC)

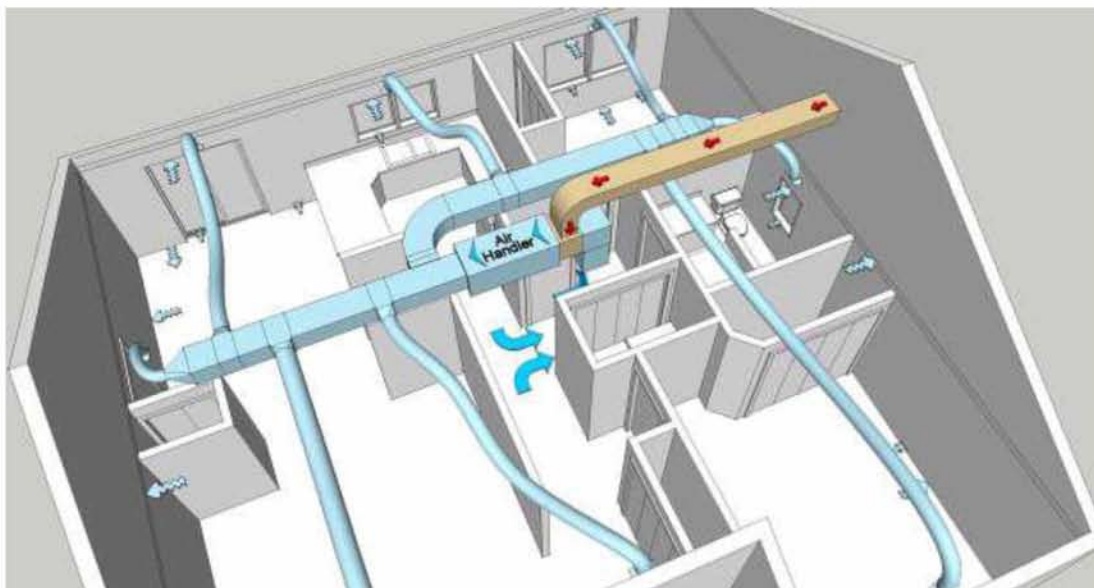
Στα πλαίσια της αυτοματοποίησης ενός οικιακού συστήματος εξαερισμού, αναπτύχθηκε το μοντέλο του οικιακού ενδοελεγχόμενου εξαερισμού-ενέργειας (Residential Integrated VEntilation Controller, RIVEC) το οποίο δημιουργήθηκε αρχικά από την Επιτροπή Ενέργειας της Καλιφόρνιας μέσω του προγράμματος Μικρών Επιχορηγήσεων Ενεργειακής Καινοτομίας [48]. Το RIVEC συμμορφώνεται σύμφωνα με τα πρότυπα ASHRAE Standard 62.2⁷ και ενσωματώνεται σε ένα προ εγκατεστημένο οικιακό σύστημα εξαερισμού σχηματίζοντας το κύριο

⁶ Ενεργός κλιματισμός είναι υποκατηγορία του κλιματισμού και απευθύνεται σε συστήματα περιλαμβάνουν τη χρήση ενέργειας για να ψύξουν ένα χώρο, αντικείμενο κλπ.

⁷ Πρότυπο που προέρχεται από την Αμερικανική Εταιρεία Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE)

συντονιστή με στόχο την βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα και το κόστος λειτουργίας του συστήματος εξαερισμού. Για να γίνει αυτό εφικτό, χρησιμοποιείται ένας δυναμικός αλγόριθμος ο οποίος προσαρμόζει τα διάφορα μέλη του συστήματος εξαερισμού (π.χ. ανεμιστήρες) ανάλογα με τις ώρες αιχμής ηλεκτρικού ρεύματος, τις εξωτερικές συνθήκες ή ακόμα και ανιχνεύοντας ανθρώπινη παρουσία σε ένα χώρο [49]. Όπως αναφέρεται στην έρευνα των Sherman M. H. και Walker S. I. [50], η εξοικονόμηση ενέργειας που παρέχει αυτό το σύστημα είναι της τάξης από 20% έως 40% και εξαρτάται από το σύστημα HVAC που ενσωματώθηκε το RIVEC καθώς επίσης και την συχνότητα χρήσης των συσκευών εξαερισμού.

Μερικά από τα συστήματα μηχανικού εξαερισμού στα οποία έχει την δυνατότητα να ενσωματωθεί το RIVEC είναι ο Εξαερισμός ανάκτησης θερμότητας (Heat recovery ventilation, HRV), οι ανεμιστήρες οροφής, ο Κεντρικός εξαερισμός με παροχή τροφοδοσίας κλπ. [51]. Στην Εικόνα 19 φαίνεται ένα σύστημα με κεντρικό εξαερισμό και παροχή τροφοδοσίας το οποίο ελέγχεται από ένα σύστημα RIVEC. Ένας χειριστής αέρα χρησιμοποιείται για να τραβήξει τον εξωτερικό αέρα ο οποίος αναμιγνύεται με το τον εσωτερικό και διανέμεται μέσα σε όλο το σπίτι διαμέσω αγωγών θέρμανσης/ψύξης. Το σύστημα RIVEC υπολογίζει δυναμικά την ροή του αέρα που θα πρέπει να εισαχθεί στο σύστημα, μέσω των διαφόρων παραγόντων που συζητήσαμε προηγουμένως, και στέλνει την κατάλληλη εντολή στον χειριστή αέρα για να ρυθμιστεί αναλόγως.



Εικόνα 19. Σύστημα με κεντρικό εξαερισμό και παροχή τροφοδοσίας. (Πηγή: [51])

4.3. Φωτισμός

Αναμφίβολα, κάποια από τα κεντρικά οφέλη των έξυπνων συστημάτων φωτισμού είναι η άμεση και μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας στο οικιακό περιβάλλον. Ως εκ τούτου, σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιάσουμε τεχνικές που βασίζονται στην μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας σε συνδυασμό με την μέγιστη αποδοτικότητα. Τα έξυπνα συστήματα φωτισμού μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες [52]:

- Εμπορικά συστήματα έξυπνου φωτισμού.
- Ευφυή συστήματα φωτισμού εξοικονόμησης ενέργειας.
- Προχωρημένα συστήματα φωτισμού.

4.3.1. Εμπορικά Συστήματα Έξυπνου Φωτισμού

Είναι γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά των λαμπτήρων LED όπως υψηλή φωτεινότητα, πιο στιβαρή κατασκευή αλλά και καλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, έχουν τραβήξει την αμέριστη προσοχή πολλών εταιριών για την ανάπτυξη εμπορικών συστημάτων έξυπνου φωτισμού. Οι πιο συνηθισμένες υλοποιήσεις έξυπνου φωτισμού επιτρέπουν στους χρήστες, με την χρήση κάποιου έξυπνου τηλεφώνου, tablet κλπ., τον έλεγχο της φωτεινότητας και του χρώματος (Correlated Color Temperature) που εκπέμπει ο λαμπτήρας. Τα χαρακτηριστικά που παρέχουν αυτά τα συστήματα βελτιώνονται με το πέρασμα του χρόνου κάνοντας τα πιο ελκυστικά προς το καταναλωτικό κοινό. Ενδεικτικά αναφέρουμε μερικές λειτουργίες που ενσωματώθηκαν σε κάποιες από αυτές τις συσκευές όπως ο αυτόματος χρονοπρογραμματισμός λειτουργίας του φωτισμού ή η επιλογή διαφορετικού χρώματος σε περίπτωση ενεργοποίησης κάποιου συμβάντος (π.χ. κόκκινο χρώμα αν γίνει παραλαβή e mail). Στην παρακάτω εικόνα συνοψίζουμε τις δημοφιλέστερες εταιρίες που υλοποιούν την εν λόγω τεχνολογία.

Product	Connectivity	Hub	Mobile control	Sensor integration
Philips Hue	WiFi + ZigBee	✓	✓	X
OSRAM Lightify	WiFi + ZigBee	✓	✓	X
Belkin WeMo	WiFi + ZigBee	✓	✓	X
LightWave RF	WiFi + LightWave RF	X	✓	X
GE Link Smart LED	WiFi + ZigBee	✓	✓	X
LIFX	Mesh WiFi network	✓	✓	X
Elgato Aavea	Bluetooth	X	✓	X

Εικόνα 20. Αξιοσημείωτες σειρές προϊόντων για εμπορικά συστήματα έξυπνου φωτισμού. (Πηγή: [52])

4.3.2. Ευφυή Συστήματα Φωτισμού Εξοικονόμησης Ενέργειας

Συνεχίζοντας σε αυτήν την ενότητα θα μιλήσουμε για τα Ευφυή Συστήματα Φωτισμού Εξοικονόμησης Ενέργειας ή ΕΣΦΕΕ. Τα ΕΣΦΕΕ έχουν ως κύριο σκοπό την καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας μειώνοντας την κατανάλωση, ενώ παράλληλα ενσωματώνουν όλα τα οφέλη που παρέχει ένα αυτοματοποιημένο οικιακό δίκτυο φωτισμού. Οι ουσιαστικότερες τεχνικές αυτής της τεχνολογίας περιλαμβάνουν τον χρονοπρογραμματισμό αυτόματης λειτουργίας του φωτισμού, την ανίχνευση παρουσίας/κίνησης (occupancy sensing), την ημερήσια συγκομιδή φωτός (daylight harvesting) ή τον συνδυασμό των προηγούμενων.

▪ **Occupancy Sensing Systems**

Ο έλεγχος μέσω αισθητήρων ανίχνευσης παρουσίας/κίνησης είναι μία διάσημη τεχνική που χρησιμοποιεί αισθητήρες υπέρυθρων (infrared), υπερήχων (ultrasonic), ανίχνευσης τοπογραφικής κίνησης (tomographic motion detection), αισθητήρες μικροκυμάτων (microwave sensors) ή αισθητήρες με κάμερες (image processing) για να ανιχνεύσει οποιαδήποτε κίνηση σε ένα συγκεκριμένο χώρο [53]. Σε περίπτωση ανίχνευσης κάποιας κίνησης ή παρουσίας σε ένα χώρο ενεργοποιείται αυτόματα ο φωτισμός. Όπως μπορούμε να δούμε στο [54], η εξοικονόμηση ενέργειας κυμαίνεται από 3% έως 60% ανάλογα με τεχνική ανίχνευσης που χρησιμοποιήθηκε.

Απεναντίας, αυτά τα συστήματα προξενούν διάφορα προβλήματα όπου αν δεν αντιμετωπιστούν σωστά έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη κατανάλωση από τα παραδοσιακά συστήματα φωτισμού. Ειδικότερα, εάν τοποθετηθούν σε ακατάλληλα σημεία (σημεία με συχνή παρουσία κόσμου), καθώς επίσης εάν δεν ρυθμιστούν σωστά (σωστή βαθμονόμησης χρονικής καθυστέρησης) τείνουν να έχουν περισσότερη κατανάλωση.

▪ **Daylight Harvesting**

Τα συστήματα daylight harvesting (DH), είναι συστήματα που μετράνε το φυσικό φως της ημέρας και υπολογίζουν την ποσότητα τεχνητού φωτισμού που χρειάζεται για να φωτιστεί σωστά ένα συγκεκριμένος χώρος. Τα συστήματα DH περιλαμβάνουν τα εξής στοιχεία [55]:

○ **Το ηλεκτρικό σύστημα φωτισμού**

λαμπτήρες, στραγγαλιστικά πηνία, καλωδίωση στα φωτιστικά κλπ.

- **Φωτοαισθητήρες**

Συσκευές τοποθετημένες σε οροφές, τοίχους που μετράει αυτόματα το επίπεδο φωτισμού που εισέρχεται στο χώρο ενημερώνοντας τους ελεγκτές.

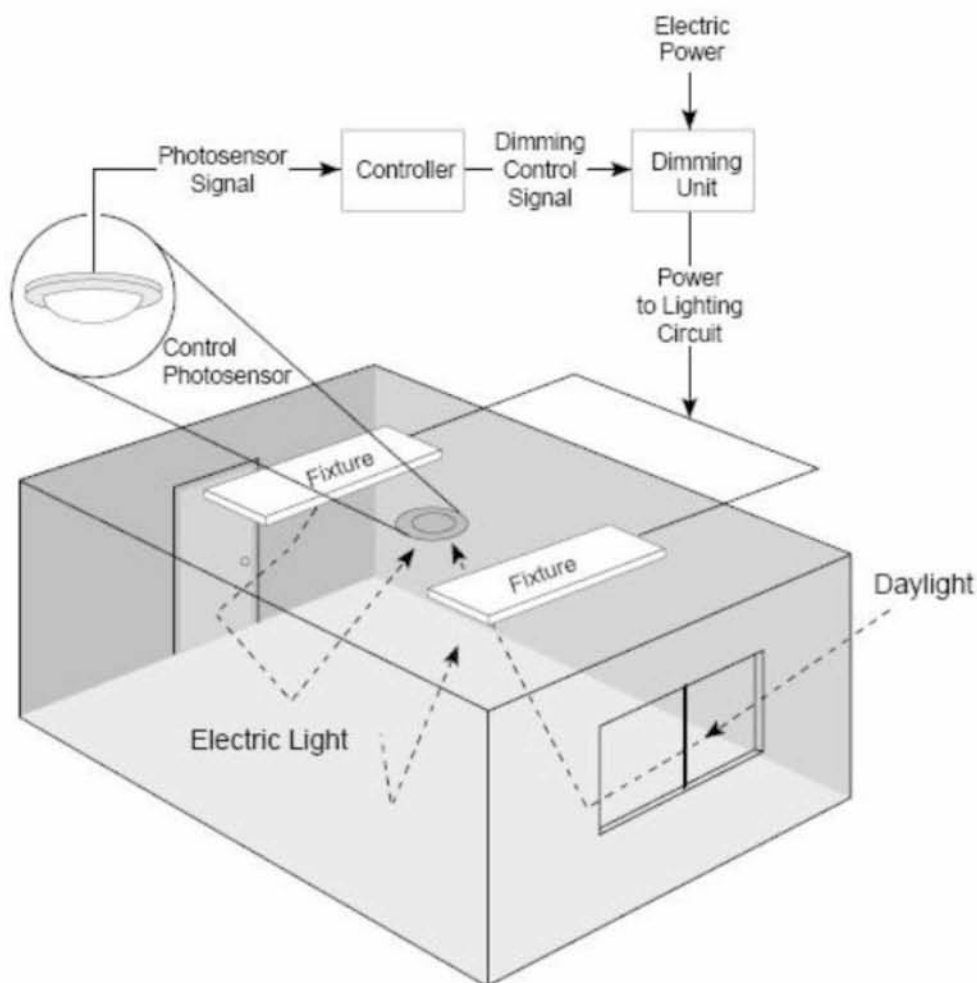
- **Ελεγκτής (Controller)**

Η κύρια μονάδα ελέγχου, όπως ένα ρυθμιζόμενο στραγγαλιστικό πηνίο ή έναν αυτόματο διακόπτη (relay switch) χαμηλής τάσης, στην οποία εισάγονται οι πληροφορίες από ένα φωτοαισθητήρα και στέλνει εντολές στους ροοστάτες να ρυθμίσουν την ένταση του παραγόμενου τεχνητού φωτός.

- **Ροοστάτες**

Ρυθμίζουν την ένταση του ρεύματος με βάση κάποια εντολή των ελεγκτών.

Μία υλοποιημένη επισκόπηση των παραπάνω βρίσκεται στην παρακάτω εικόνα.



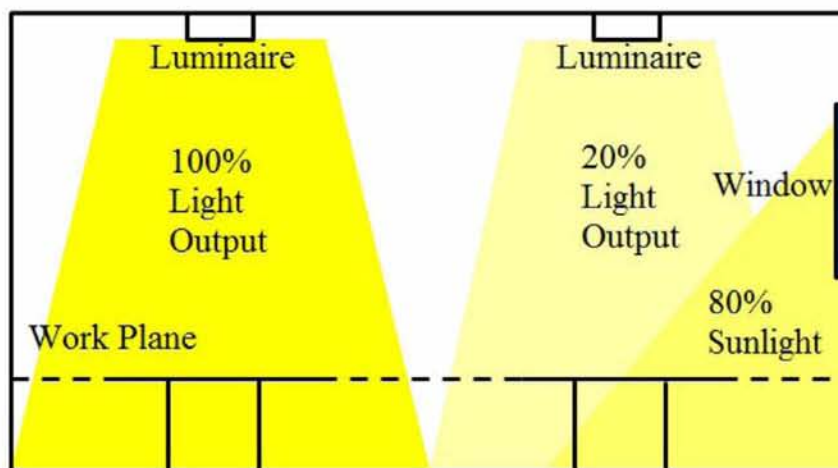
Εικόνα 21. Τυπικό σύστημα ελέγχου ημερήσιας συγκομιδής φωτός.

(Πηγή: [55])

Μία κατηγοριοποίηση με βάση την λειτουργικότητα και την αρχιτεκτονική στα εν λόγω συστήματα είναι τα ανοιχτού και κλειστού βρόγχου.

Τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου μετρούν την ποσότητα του φυσικού φωτός χωρίς την συμβολή οποιαδήποτε τεχνητής πηγής φωτός. Αναλυτικότερα, οι φωτοαισθητήρες καθορίζουν την απαιτούμενη φωτεινότητα όταν φτάσει το ηλιακό φως σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Αβίαστα, λοιπόν, συνάγεται το συμπέρασμα ότι αυτοί οι αισθητήρες θα πρέπει να εγκατασταθούν σε εξωτερικό χώρο ενός κτηρίου ή σε σημεία που έχουν άμεση επαφή με το εξωτερικό ηλιακό φως.

Τέλος στα συστήματα κλειστού βρόγχου, έχουμε μία δυναμική ανάδραση που μετράμε την ποσότητα του φυσικού φωτός σε συνδυασμό με το τεχνητό φως κρατώντας πάλι την φωτεινότητα του χώρου σε επιθυμητά επίπεδα.



Εικόνα 22. Τεχνική συγκομιδής ανοιχτού βρόγχου που χρησιμοποιεί το φυσικό φως για να συμπληρώσει τα επίπεδα φωτεινότητας ενός χώρου.

(Πηγή: [52])

▪ Χρονοπρογραμματισμός Αυτόματης Λειτουργίας Φωτισμού

Ιδιαίτερα σημαντικά θεωρούνται και τα συστήματα αυτόματης λειτουργίας με βάση κάποιο χρονοπρογραμματισμό. Ενδεικτικά, αναφέρουμε πως το σύστημα φωτισμού ανοιγοκλείνει ανάλογα με κάποια χρονολογική ώρα (ώρα της ημέρας) ή ηλιακή ώρα. Παρότι αυτή η τεχνολογία μπορεί να χαρακτηριστεί σαν απλή ή ακατέργαστη, βλέπουμε ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι αυξημένη σε κτηριακές εγκαταστάσεις όπου η περίοδος χρήσης είναι προβλέψιμη (γραφεία, νοσοκομεία, θέατρα κλπ.) [56].

- **Συνδυασμός των προηγούμενων τεχνικών**

Τα τελευταία χρόνια ολοένα και περισσότεροι επιστήμονες επιλέγουν να συνδυάσουν τις παραπάνω τεχνικές για να μεγιστοποιήσουν την ενεργειακή απόδοση παρέχοντας καλύτερα προϊόντα στους καταναλωτές. Όπως μπορούμε να δούμε στην υλοποίηση ενός ηλεκτρικού συστήματος των Lucio Ciabattoni et al., συνδυάζονται οι δύο πρώτες τεχνικές που αναφέρουμε (Occupancy Sensing, Daylight Harvesting) πετυχαίνοντας ενεργειακή αποδοτικότητα κοντά στο 50% [57].

4.3.3. Προχωρημένα Συστήματα Φωτισμού

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει συστήματα φωτισμού που βελτιώνουν δυναμικά την φωτεινότητα και την ποιότητα φωτισμού σε έναν δεδομένο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας διάφορους αισθητήρες ένα τέτοιο σύστημα είναι σε θέση να μετρήσει διάφορες εξωτερικές μεταβλητές όπως την Φασματική κατανομή ισχύος (SPD), την Θερμοκρασία χρώματος (CCT), χρωματικές συντεταγμένες κ.α. Τέλος, αυτές οι μεταβλητές εισάγονται σε αλγόριθμους ελέγχου, οι οποίοι βελτιώνουν δυναμικά το παραγόμενο φως σε έναν χώρο [52].

5. Συμπεράσματα

Παραθέτοντας όλη αυτήν την πληροφορία σχετικά με τα Έξυπνα Σπίτια μπορούμε με σιγουριά να ισχυριστούμε πως η νέα προσέγγιση οικιακού περιβάλλοντος ξεφεύγει από τα πλαίσια των συμβατικών οικιακών εγκαταστάσεων. Όπως είδαμε, ο όρος “έξυπνο” δεν έγκειται στην ανάπτυξης μεμονωμένων συσκευών αλλά αντίθετα είναι ένα συνονθύλευμα ανάπτυξης πολλών επιστημονικών κλάδων που εναρμονίζονται σε μία ενιαία αρχιτεκτονική.

Είναι γεγονός, πως η κατανάλωση στον κτιριακό τομέα αγγίζει το 40% παγκοσμίως αλλά με την χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας μπορούμε να πετύχουμε μία πολύ σημαντική μείωση. Με μία προσεκτική μελέτη εγκατάστασης έξυπνων συστημάτων ο ιδιοκτήτης μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα της ζωής του με αποδοτικό και οικολογικό τρόπο. Η ανάπτυξη της πράσινης τεχνολογίας δεν θα πρέπει να θεωρείτε ως προαιρετικό προτέρημα αλλά ως ένα κύριο συστατικό στοιχείο, καθώς η εξάντληση των συμβατικών πηγών ενέργειας μετατρέπουν το ενεργειακό ισοζύγιο σε ωρολογιακή βόμβα.

Παρά τις πολυάριθμες υλοποιήσεις που αναφέραμε κατά την διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας, το τελικό ερώτημα που συνήθως εγείρεται είναι αν αυτή η τεχνολογία είναι τελικά εφικτή ή ουσιαστικά είναι απραγματοποίητη. Η άποψη μου περί του ζητήματος είναι ότι εάν μελλοντικά οι οικιακοί αυτοματισμοί μπορέσουν και εναρμονιστούν πλήρως στην καθημερινότητα μας, καθώς βρίσκονται ακόμα σε εμβρυακό στάδιο, μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις ζωές των ανθρώπων και του περιβάλλοντος.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Kanellakis, G. Martinopoulos and T. Zachariadis, "European energy policy—A review," *Elsevier*, vol. 62, pp. 1020-1030, 2013.
- [2] Eurostat (European Commission), *Smarter, greener, more inclusive?*, Luxembourg: EU publication, 2017, pp. 9-10.
- [3] European Commission, *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS*, Luxembourg: EU publication, 2014.
- [4] R. C. Dorf and R. H. Bishop, in *Modern Control Systems*, Harlow, England, Pearson, 2017, p. 35.
- [5] M. A. Abraham and N. Nguyen, "'Green engineering: Defining the principles"— results from the sandestin conference," in *Engineering Conferences International*, Sandestin, Florida, 2003.
- [6] X. I. Κορωναίος, "ΔΠΜΣ Περιβάλλον και Ανάπτυξη," ΜΑΡΤΙΟΣ 2012. [Online]. Available: <http://environ.survey.ntua.gr/files/mathimata/6420/APE-kef1-6.pdf>. [Accessed 19 June 2018].
- [7] P. Siano, "Demand response and smart grids—A survey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 461-478, 2014.
- [8] European Commission, *Smart Grids: from innovation to deployment*, Brussels: European Union, 2011.
- [9] United States Department of Energy, "2014 Smart Grid Report," United States Department of Energy, Washington, DC 20585, 2014.
- [10] X. Fang, S. Misra and G. Xue, "Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 4, pp. 944 - 980, 2011.
- [11] S. Bou Ghosn, R. Prakash , S. Salem, J. Tang, D. Loegering and K. E. Nygard, "Agent-Oriented Designs for a Self Healing Smart Grid," in *IEEE*, Gaithersburg, MD, USA,

USA, 2010.

- [12] Y. Kabalci, "A survey on smart metering and smart grid communication," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 302-318, 2016.
- [13] H. Yenginer, C. Cetiz and E. Dursun, "A review of energy management systems for smart grids," in *3rd International Istanbul Smart Grid Congress and Fair (ICSG)*, Istanbul, Turkey, 2015.
- [14] K. Sayed and H. Gabbar, "SCADA and smart energy grid control automation," in *Smart Energy Grid Engineering*, Academic Press, 2017, pp. 483-485.
- [15] Strategy, NETL Modern Grid, "Advanced metering infrastructure.," US Department of Energy Office of Electricity and Energy Reliability., 2008.
- [16] P. Domingues, P. Carreira, R. Vieira and W. Kastner, "Building automation systems: Concepts and technology review," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 45, pp. 1-12, 2016.
- [17] A. Smith, *Building Management System Seminar 1 – The Basics Explained*, Melbourn.
- [18] P. H. Shaikh, N. B. M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi and T. Ibrahim, "A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 409-429, 2014.
- [19] Technavio, "Top 5 Vendors in the Global Integrated Building Management Systems Market from 2017-2021: Technavio," Technavio, 06 January 2017. [Online]. Available: <https://www.businesswire.com/news/home/20170106005181/en/Top-5-Vendors-Global-Integrated-Building-Management>. [Accessed 22 June 2018].
- [20] W. Kastner, G. Neuschwandtner, S. Soucek and M. H. Newman, "Communication systems for building automation and control," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1178 - 1203, 2005.
- [21] W. W. Shein, Y. Tan and A. O. Lim, "PID Controller for Temperature Control with Multiple Actuators in Cyber-Physical Home System," in *2012 15th International Conference on Network-Based Information Systems*, Melbourne, VIC, Australia, 2012.
- [22] B. K. Bose, "Fuzzy Logic Principles and Applications," in *Modern Power Electronics and*

AC drives, USA, Prentice Hall., 2002, pp. 535-536.

- [23] F. Mendi, K. Boran and M. K. Kulekci, "Fuzzy controlled central heating system," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, vol. 26, p. 1313–1322, 2002.
- [24] A.-M. Vainio, M. Valtonen and J. Vanhala, "Proactive Fuzzy Control and Adaptation Methods for Smart Homes," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 42 - 49, 2008.
- [25] R. N. Lea, E. Dohman, W. Prebilsky and Y. Jani, "An HVAC fuzzy logic zone control system and performance results," in *Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems*, New Orleans, LA, USA, USA, 2002.
- [26] S. Russell and P. Norvig, "Νευρωνικά Δίκτυα," in *Τεχνητή Νοημοσύνη Μια σύγχρονη προσέγγιση Δεύτερη Αμερικάνικη Έκδοση*, Κλειδάριθμος, 2005, p. 824.
- [27] A. Afram and F. Janabi-Sharifi, "Theory and applications of HVAC control systems e A review of model," *Building and Environment*, vol. 72, pp. 343-355, 2014.
- [28] G. Serale, M. Fiorentini, A. Capozzoli, D. Bernardini and A. Bemporad, "Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities," *Energies*, vol. 11, no. 3, p. 631, 2018.
- [29] R. Y. M. Li, H. C. Y. Li, C. K. Mak and T. B. Tang, "Sustainable Smart Home and Home Automation: Big Data Analytics Approach," *International Journal of Smart Home*, vol. 10, no. 8, pp. 177-198, 2016.
- [30] G. Styliaras, D. Koukopoulos and F. Lazarinis, *Handbook of Research on Technologies and Cultural Heritage: Applications and Environment*, Athens: Information Science Reference, 2010.
- [31] International Federation of Robotics, "Service Robots," [Online]. Available: <https://ifr.org/service-robots/>. [Accessed 22 June 2018].
- [32] R. Borja, J. de la Pinta, A. Álvarez and J. Maestre, "Integration of service robots in the smart home by means of UPnP: A surveillance robot case study," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, no. 2, pp. 153-160, 2013.

- [33] A. Kailas, V. Cecchi and A. Mukherjee, "A Survey of Communications and Networking Technologies for Energy Management in Buildings and Home Automation," *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2012, no. 932181, p. 12, 2012.
- [34] ZigBee Alliance, "Standards: Zigbee Specification," 7 September 2012 . [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/download/standards-zigbee-specification/>. [Accessed 16 June 2018].
- [35] S. Farahani, "ZigBee Basics," in *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, Elsevier, 2008, p. 9.
- [36] C. Gomez and J. Paradells, "Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 6, pp. 92 - 101, 2010.
- [37] B. B. Wilson, C. L. Brownfield, M. B. Hubacher, J. E. Savard and M. S. Wul , "Home automation system and method". United States of America Patent US 8,516,087 B2, 20 August 2013.
- [38] N. Aggarwal and P. Singh, "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A WIFI BASED HOME AUTOMATION SYSTEM," *International Journal of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 06, no. 02, pp. 273-279, 2014.
- [39] A. H. Chowdhury, M. Ikram, H.-S. Cha, H. Redwan, S. S. Shams, K.-H. Kim and S.-W. Yoo, "Route-over vs mesh-under routing in 6LoWPAN," in *Proceedings of the 2009 ACM International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Leipzig, Germany, 2009.
- [40] J. Ploennigs, U. Ryssel and K. Kabitzsch, "Performance analysis of the EnOcean wireless sensor network protocol," in *2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010)*, Bilbao, Spain, 2010.
- [41] D. Bonino, F. Corno and L. De Russis, "A Semantics-Rich Information Technology Architecture for Smart Buildings," *Buildings*, vol. 4, pp. 880-910, 2014.
- [42] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Computer Networks*, pp. 2787-2805, 28 October 2010.
- [43] S. Li, L. Xu, X. Wang and J. Wang, "Integration of hybrid wireless networks in cloud

- services oriented enterprise information systems," *Enterprise Information Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 165-187, 2012.
- [44] D. Uckelmann, M. Harrison and F. Michahelles, "An architectural approach toward the future internet of things," in *Architecting the Internet*, Berlin, Springer, 2011, pp. 1-24.
- [45] R. Ford, M. Pritoni, A. Sanguinetti and B. Karlin, "Categories and functionality of smart home technology for energy management," *Building and Environment*, vol. 123, pp. 543-554, 2017.
- [46] F. Pacheco-Torga, C. Granqvist, B. Jelle, G. Vanoli, N. Bianco and J. Kurnitski, "Smart Heating Systems for Cost-Effective Retrofitting," in *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting*, Woodhead Publishing, 2017, pp. 279-304.
- [47] P. Ponce, T. Peffer and A. Molina, "Framework for communicating with consumers using an expectationinterface in smart thermostats," *Energy and Buildings*, vol. 145, pp. 44-56, 2017.
- [48] M. H. Sherman, B. Singer, I. S. Walker and C. Wray, "RESIDENTIAL ENERGY SAVINGS FROM AIR TIGHTNESS AND VENTILATION EXCELLENCE (RESAVE)," California Energy Commission, California, 2013.
- [49] G. Guyot, M. H. Sherman and I. S. Walker, "Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review," *Energy and Buildings*, vol. 165, pp. 416-430, 2017.
- [50] M. H. Sherman and I. S. Walker, "Meeting residential ventilation standards through dynamic control of ventilation systems," *Energy and Buildings*, vol. 43, p. 1904–1912, 2011.
- [51] W. J. N. Turner and I. Walker, "Advanced Controls and Sustainable Systems for Residential Ventilation," Berkeley Lab, California, 2012.
- [52] I. Chew, D. Karunatilaka, C. P. Tan and V. Kalavally, "Smart lighting: The way forward? Reviewing the past to shape the future," *Energy and Buildings*, vol. 149, pp. 180-191, 2017.
- [53] Z. Chen, C. Jiang and L. Xie, "Building occupancy estimation and detection: A review," *Energy and Buildings*, vol. 169, pp. 260-270, 2018.

- [54] "An Analysis of the Energy and Cost Savings Potential of Occupancy Sensors for Commercial Lighting Systems," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 30, no. 2, pp. 111-125, 2001.
- [55] C. DiLouie, "Designing a Daylight Harvesting System," August 2007. [Online]. Available: <http://www.automatedbuildings.com/news/aug07/articles/zing/070723051101dilouie.htm>. [Accessed 21 June 2018].
- [56] J. L. Lindsey, *Applied Illumination Engineering*, The Fairmont Press, 1997.
- [57] L. Ciabattoni, A. Freddi and G. Ippoliti, "A smart lighting system for industrial and domestic use," in *2013 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Vicenza, Italy, 2013.